



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 117134668 A

(43) 申请公布日 2023. 11. 28

(21) 申请号 202310601357.4

H02P 25/022 (2016.01)

(22) 申请日 2023.05.25

H02P 27/12 (2006.01)

(30) 优先权数据

H02P 27/08 (2006.01)

17/824,557 2022.05.25 US

H02P 6/28 (2016.01)

(71) 申请人 电力集成公司

地址 美国加利福尼亚州

(72) 发明人 J·E·A·谭 E·B·安东尼奥

J·M·Q·卡尔德隆

J·H·R·普恩特

(74) 专利代理机构 北京汇知杰知识产权代理有

限公司 11587

专利代理师 李洁 董江虹

(51) Int.Cl.

H02P 21/22 (2016.01)

H02P 21/18 (2016.01)

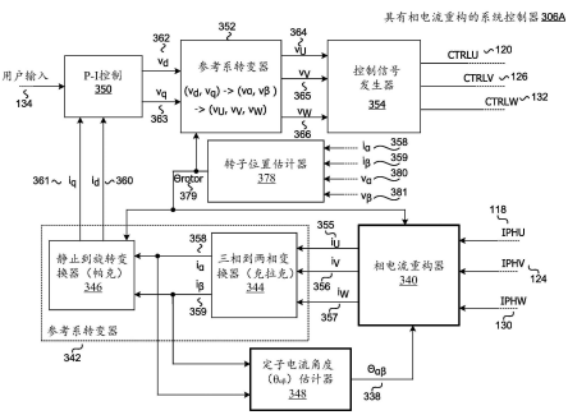
权利要求书6页 说明书23页 附图12页

(54) 发明名称

电动机相电流重构

(57) 摘要

一种用于电动机驱动系统的系统控制器包括被配置为执行操作的相电流重构器。所述操作包括:接收定子电流角度和来自在操作中驱动所述电动机驱动系统的相应的多个设备的多个相电流感测信号;基于接收的定子电流角度,从存储用于相应的相电流的重构缩放因子的多个参考表之中选择一个参考表;从所选择的参考表,获得用于所述相应的相电流的相应的重构缩放因子;根据所获得的重构缩放因子,生成用于所述多个设备的相应的重构的相电流大小值;以及输出所述重构的相电流大小值。



1. 一种用于电动机驱动系统的系统控制器,包括:
相电流重构器,其被配置为执行包括以下的操作:
接收定子电流角度和来自在操作中驱动所述电动机驱动系统的相应的多个设备的多个相电流感测信号,
基于接收的定子电流角度,从存储用于相应的相电流的重构缩放因子的多个参考表之中选择一个参考表,
从所选择的参考表,获得用于所述相应的相电流的相应的重构缩放因子,
根据所获得的重构缩放因子,生成用于所述多个设备的相应的重构的相电流大小值,以及
输出所述重构的相电流大小值;
参考系转变器,其被配置为接收输出的重构的相电流大小值并且生成所述定子的参考系的阿尔法分量和贝塔分量;以及
定子电流角度估计器,其被配置为:接收所述阿尔法分量和所述贝塔分量,计算所述定子电流角度的估计,并且将所述定子电流角度的所述估计提供回给所述相电流重构器;以及
控制信号发生器,其被配置为基于所述重构的相电流大小值生成用于所述多个设备的控制信号。
2. 根据权利要求1所述的系统控制器,其中所述相电流重构器响应于所述定子电流角度而确定扇区和扇区角度。
3. 根据权利要求2所述的系统控制器,其中所述相电流重构器确定用于所述多个参考表的索引,其中所述索引基本上是所述定子电流角度与所述扇区角度之差。
4. 根据权利要求3所述的系统控制器,其中所述多个参考表包括第一参考表、第二参考表和第三参考表,其中存储在所述第一参考表、所述第二参考表和所述第三参考表中的所述重构缩放因子响应于所述索引。
5. 根据权利要求4所述的系统控制器,其中存储在所述第一参考表中的所述重构缩放因子基本上是所述索引与一百二十度之和的正弦除以所述索引的正弦。
6. 根据权利要求4所述的系统控制器,其中存储在所述第二参考表中的所述重构缩放因子基本上是所述索引与一百二十度之差的正弦除以所述索引的正弦。
7. 根据权利要求4所述的系统控制器,其中存储在所述第三参考表中的所述重构缩放因子基本上是所述索引的正弦除以所述索引与一百二十度之差的正弦。
8. 根据权利要求3所述的系统控制器,其中所述多个参考表包括第一参考表和第二参考表,并且其中存储在所述第一参考表和所述第二参考表中的所述重构缩放因子响应于所述索引。
9. 根据权利要求8所述的系统控制器,其中存储在所述第一参考表中的所述重构缩放因子基本上是所述索引与六十度之和的正弦除以六十度与所述索引之差的正弦。
10. 根据权利要求8所述的系统控制器,其中存储在所述第二参考表中的所述重构缩放因子基本上是所述索引的正弦除以所述索引与六十度之和的正弦。
11. 根据权利要求1所述的系统控制器,其中所述定子电流角度估计器包括锁相环。
12. 根据权利要求11所述的系统控制器,其中所述定子电流角度估计器进一步包括:

第一乘法器,其被配置为接收所述贝塔分量和所述定子电流角度的余弦,并且还被配置为将所述贝塔分量和所述定子电流角度的所述余弦相乘;

第二乘法器,其被配置为接收所述阿尔法分量和所述定子电流角度的正弦,并且还被配置为将所述阿尔法分量和所述定子电流角度的所述正弦相乘;

第一算术运算器,其被配置为从所述第一乘法器的输出减去所述第二乘法器的输出;

第一放大器,其被配置为以增益 K_p 放大所述第一算术运算器的输出;

第二放大器,其被配置为以增益 K_i 放大所述第一算术运算器的输出;

第一积分器,其被配置为对所述第二放大器的输出进行积分;

第二算术运算器,其被配置为接收所述第一放大器的输出和所述第一积分器的输出,其中所述第二算术运算器将所述第一放大器的输出和所述第一积分器的输出相加;以及

第二积分器,其被配置为对所述第二算术运算器的输出进行积分并且提供所述定子电流角度。

13. 根据权利要求1所述的系统控制器,还包括转子位置估计器,所述转子位置估计器被配置为响应于所述阿尔法分量和所述贝塔分量而输出表示转子磁通矢量的角位置的转子角度。

14. 根据权利要求1所述的系统控制器,其中所述参考系转变器被配置为进一步将所述阿尔法分量和所述贝塔分量转变为交分量和直分量,其中所述交分量和所述直分量是所述阿尔法分量和所述贝塔分量的静止到旋转系变换。

15. 根据权利要求14所述的系统控制器,还包括:

比例积分器控制块,其被配置为接收所述交分量、所述直分量以及表示所述电动机的属性的输入,其中所述比例积分器控制块被配置为响应于所述电动机的所述属性而输出用以调节所述交分量的控制信号和用以调节所述直分量的控制信号;以及

第二参考系转变器,其被配置为接收用以调节所述交分量的控制信号和用以调节所述直分量的控制信号并且输出用以调节所述相电流大小的多个控制信号,其中用以调节所述相电流大小的所述多个控制信号是用以调节所述交分量的控制信号和用以调节所述直分量的控制信号的变换;其中所述控制信号发生器还被配置为接收用以调节所述相电流大小的所述多个控制信号并且输出用于所述多个设备的所述多个控制信号。

16. 根据权利要求13所述的系统控制器,还包括:

比例积分器控制块,其被配置为接收所述转子角度,其中所述比例积分器控制块被配置为响应于所述电动机的所述属性和所述转子角度而输出用以调节所述交分量的控制信号和用以调节所述直分量的控制信号;以及

第二参考系转变器,其被配置为接收用以调节所述交分量的控制信号和用以调节所述直分量的控制信号并且输出用以调节所述相电流大小的多个控制信号,其中用以调节所述相电流大小的所述多个控制信号是用以调节所述交分量的控制信号和用以调节所述直分量的控制信号的变换;并且

其中所述控制信号发生器还被配置为接收用以调节所述相电流大小的所述多个控制信号并且输出用于所述多个设备的所述多个控制信号。

17. 一种用于重构电动机的多个相电流的方法,所述方法包括:

接收第一相电流感测信号、第二相电流感测信号和第三相电流感测信号;

响应于定子电流角度而从有度数的多个扇区中选择一个扇区；

响应于所选择的扇区而确定扇区角度；

确定是否所述第一相电流感测信号、所述第二相电流感测信号和所述第三相电流感测信号中的一个是可用的；

响应于所述扇区和确定是否所述第一相电流感测信号、所述第二相电流感测信号和所述第三相电流感测信号中的一个是可用的而选择参考表；

响应于所述定子电流角度与所述扇区角度之差而确定索引；以及

响应于所述索引而选择存储在所选择的参考表中的缩放因子，以及

响应于所选择的缩放因子和确定的可用的相电流感测信号而输出重构的相电流大小值。

18. 根据权利要求17所述的方法，其中所述有度数的多个扇区基本上是所述定子电流角度的六十度增量，并且包括第零扇区、第一扇区、第二扇区、第三扇区、第四扇区和第五扇区。

19. 根据权利要求17所述的方法，还包括：

将所述第一相电流感测信号与第一阈值比较；

将所述第二相电流感测信号与第二阈值比较；以及

将所述第三相电流感测信号与第三阈值相比较。

20. 根据权利要求19所述的方法，还包括：

确定所述第一相电流感测信号大于所述第一阈值并且所述第二相电流感测信号大于所述第二阈值；

确定第一重构的相电流大小基本上是负的所述第一相电流感测信号；

确定第二重构的相电流大小基本上是负的所述第二相电流感测信号；以及

确定第三重构的相电流大小基本上是所述第一相电流感测信号与所述第二相电流感测信号之和。

21. 根据权利要求19所述的方法，还包括：

确定所述第一相电流感测信号大于所述第一阈值并且所述第三相电流感测信号大于所述第三阈值；

确定第一重构的相电流大小基本上是负的所述第一相电流感测信号；

确定第二重构相电流大小基本上是所述第一相电流感测信号与所述第三相电流感测信号之和；以及

确定第三重构的相电流大小基本上是负的所述第三相电流感测信号。

22. 根据权利要求19所述的方法，还包括：

确定所述第二相电流感测信号大于所述第二阈值并且所述第三相电流感测信号大于所述第三阈值；

确定第一重构的相电流大小基本上是所述第二相电流感测信号与所述第三相电流感测信号之和；

确定第二重构的相电流大小基本上是负的所述第二相电流感测信号；以及

确定第三重构的相电流大小基本上是负的所述第三相电流感测信号。

23. 根据权利要求17所述的方法，还包括：

确定启动操作是否完成;

如果所述启动操作未完成,利用接收的转子角度来确定所述定子电流角度;并且

如果所述启动操作完成,利用接收的估计的定子电流角度用于所述定子电流角度。

24. 根据权利要求18所述的方法,其中响应于所述扇区而选择所述参考表还包括:

如果所述扇区是所述第零扇区并且所述第一相电流感测信号是可用的,或如果所述扇区是所述第二扇区并且所述第二相电流感测信号是可用的,或如果所述扇区是所述第四扇区并且所述第三相电流感测信号是可用的,选择第一参考表。

25. 根据权利要求24所述的方法,其中存储在所述第一参考表中的所述重构缩放因子基本上是所述索引与一百二十度之和的正弦除以所述索引的正弦。

26. 根据权利要求18所述的方法,其中响应于所述扇区而选择所述参考表还包括:

如果所述扇区是所述第零扇区并且所述第一相电流感测信号是可用的,或如果所述扇区是所述第二扇区并且所述第二相电流感测信号是可用的,或如果所述扇区是所述第四扇区并且所述第三相电流感测信号是可用的,选择第二参考表。

27. 根据权利要求26所述的方法,其中存储在所述第二参考表中的所述重构缩放因子基本上是所述索引与一百二十度之差的正弦除以所述索引的正弦。

28. 根据权利要求18的方法,其中响应于所述扇区而选择所述参考表还包括:

如果所述扇区是所述第一扇区并且所述第一相电流感测信号是可用的,或如果所述扇区是所述第三扇区并且所述第二相电流感测信号是可用的,或如果所述扇区是所述第五扇区并且所述第三相电流感测信号是可用的,选择第三参考表。

29. 根据权利要求28所述的方法,其中存储在所述第三参考表中的所述重构缩放因子基本上是所述索引的正弦除以所述索引与一百二十度之差的正弦。

30. 根据权利要求18所述的方法,其中响应于所述扇区而选择所述参考表还包括:

如果所述扇区是所述第零扇区并且所述第三相电流感测信号是可用的,或如果所述扇区是所述第二扇区并且所述第一相电流感测信号是可用的,或如果所述扇区是所述第四扇区并且所述第二相电流感测信号是可用的,选择反向第一参考表。

31. 根据权利要求18所述的方法,其中响应于所述扇区而选择所述参考表还包括:

如果所述扇区是所述第零扇区并且所述第三相电流感测信号是可用的,或如果所述扇区是所述第二扇区并且所述第一相电流感测信号是可用的,或如果所述扇区是所述第四扇区并且所述第二相电流感测信号是可用的,选择反向第二参考表。

32. 根据权利要求18所述的方法,其中响应于所述扇区而选择所述参考表还包括:

如果所述扇区是所述第一扇区并且所述第一相电流感测信号是可用的,或如果所述扇区是所述第三扇区并且所述第二相电流感测信号是可用的,或如果所述扇区是所述第五扇区并且所述第三相电流感测信号是可用的,选择反向第三参考表。

33. 根据权利要求18所述的方法,其中响应于所述扇区而选择所述参考表还包括:

如果所述扇区是所述第零扇区并且所述第三相电流感测信号是可用的,或如果所述扇区是所述第二扇区并且所述第一相电流感测信号是可用的,或如果所述扇区是所述第四扇区并且所述第二相电流感测信号是可用的,选择第一参考表。

34. 根据权利要求33所述的方法,其中存储在所述第一参考表中的所述重构缩放因子基本上是所述索引与六十度之和的正弦除以六十度与所述索引之差的正弦。

35. 根据权利要求18所述的方法, 其中响应于所述扇区而选择所述参考表还包括:

如果所述扇区是所述第一扇区并且所述第一相电流感测信号是可用的, 或如果所述扇区是所述第三扇区并且所述第二相电流感测信号是可用的, 或如果所述扇区是所述第五扇区并且所述第三相电流感测信号是可用的, 选择第二参考表。

36. 根据权利要求35所述的方法, 其中存储在所述第二参考表中的所述重构缩放因子基本上是所述索引的正弦除以所述索引与六十度之和的正弦。

37. 根据权利要求18所述的方法, 其中响应于所述扇区而选择所述参考表还包括:

如果所述扇区是所述第零扇区并且所述第一相电流感测信号是可用的, 或如果所述扇区是所述第二扇区并且所述第二相电流感测信号是可用的, 或如果所述扇区是所述第四扇区并且所述第三相电流感测信号是可用的, 选择反向第一参考表。

38. 根据权利要求18所述的方法, 其中响应于所述扇区而选择所述参考表还包括:

如果所述扇区是所述第一扇区并且所述第一相电流感测信号是可用的, 或如果所述扇区是所述第三扇区并且所述第二相电流感测信号是可用的, 或如果所述扇区是所述第五扇区并且所述第三相电流感测信号是可用的, 选择反向第二参考表。

39. 一种用于重构电动机的多个相电流的方法, 所述方法包括:

接收定子电流角度和来自在操作中驱动电动机驱动系统的相应的多个设备的多个相电流感测信号,

基于接收的定子电流角度, 从存储用于相应的相电流的重构缩放因子的多个参考表之中选择一个参考表,

从所选择的参考表中, 获得用于相应的相电流的相应的重构缩放因子,

根据所获得的重构缩放因子, 生成用于所述多个设备的相应的重构的相电流大小值, 以及

输出所述重构的相电流大小值。

40. 根据权利要求39所述的方法, 其中基于接收的定子电流角度, 从所述多个参考表之中选择所述参考表, 还包括:

确定所述多个相电流感测信号中的哪个是可用的; 以及

基于接收的定子电流角度和所述多个相电流感测信号中的可用的一个, 从所述多个参考表之中选择所述参考表。

41. 根据权利要求40所述的方法, 其中确定所述多个相电流感测信号中的哪个是可用的, 还包括:

将所述多个相电流感测信号与相应的阈值比较; 以及

如果所述相电流感测信号大于所述相应的阈值, 确定所述相电流感测信号是可用的。

42. 根据权利要求39所述的方法, 其中从所选择的参考表, 获得相应的重构缩放因子, 还包括:

根据接收的定子电流角度, 响应于定子电流角度而从有度数的多个扇区确定一个扇区;

确定来自确定的扇区的扇区角度;

响应于所述定子电流角度与所述扇区角度之差而确定索引; 以及

利用所述索引以从所选择的参考表获得所述相应的重构缩放因子。

43. 根据权利要求39所述的方法, 其中根据所获得的重构缩放因子, 生成用于所述多个设备的相应的重构的相电流大小值, 还包括:

确定所述多个相电流感测信号中的哪个是可用的; 以及

将所述重构缩放因子与确定的可用的相电流感测信号相乘, 以产生用于所述多个设备的所述相应的重构的相电流大小值。

电动机相电流重构

技术领域

[0001] 本发明总体上涉及电动机驱动器,并且更具体地,涉及无刷直流(dc)电动机驱动器。

背景技术

[0002] 诸如通风机、冷却系统、冰箱、洗碗机、洗衣机/干衣机的家用和工业电器以及许多其他白色产品/商品通常利用将能量从电源传递到机械负载的电动机。用于驱动电动机的电能通过驱动系统提供,该驱动系统从电源(例如,从交流(AC)低频源)汲取电能。该电能通过功率转换器处理并且被转换成供应给电动机以实现期望的机械输出的期望的形式的电能。电动机的期望的机械输出可以是例如电动机的速度、扭矩或电动机轴的位置。

[0003] 电动机及其相关电路系统——诸如电动机驱动器——表示网络负载的一大部分。电动机驱动器的功能、效率、尺寸和价格是这些产品的供应商考虑的挑战性和竞争性因素。电动机驱动器中的功率转换器的功能包括向电动机提供输入电信号,诸如电压、电流、频率和相(phase),用于电动机轴上的期望的机械输出负载运动(例如,旋转/力)。在一个实施例中,功率转换器可以是将直流输入传递到期望的电压、电流、频率和相的交流输出的逆变器。功率转换器的控制器响应于从传感器块接收的信号而调节能量流。来自电动机或功率转换器的低功率感测信号通过比较实际值与期望值而被发送到闭环系统中的控制器。控制器在实际值与期望值的比较中调整输出以维持目标输出。

[0004] 无刷直流(BLDC)电动机——因其较高的可靠性和效率而被已知——正在成为市场上替代有刷直流和交流电动机的受欢迎的选择。它们被广泛用于家用电器,诸如冰箱、空调、真空吸尘器、洗衣机/干衣机和其他白色商品以及诸如电钻的电动工具,或其他电动工具。BLDC电动机需要功率转换器,该功率转换器通常包括呈半桥切换器模块的形式的逆变器级。半桥切换器模块可以包括在集成电路内部的功率开关和控制块,这提供了具有较小尺寸和较高效率的紧凑结构。

附图说明

[0005] 参考以下附图描述了本发明的非限制性和非穷举性实施方案,其中除非另有说明,否则相同的参考数字在所有各个视图中指代相同的部分。

[0006] 图1A例示了根据本公开内容的教导的具有用于三相电动机的相电流重构的示例电动机驱动系统。

[0007] 图1B例示了根据本公开内容的教导的半桥模块和具有图1A的相电流重构的系统控制器的一个实施例。

[0008] 图2A例示了根据本公开内容的教导的用于图1A的三相电动机的相电流和相电流感测信号的图。

[0009] 图2B例示了根据本公开内容的教导的用于图1A的电动机驱动系统的具有二维参考轴和三维参考轴的矢量图。

[0010] 图3A是根据本公开内容的教导的具有图1A的相电流重构的系统控制器的功能块图。

[0011] 图3B是根据本公开内容的教导的具有图1A的相电流重构的另一个系统控制器的功能块图。

[0012] 图4是根据本公开内容的教导的图3A和图3B的定子电流角度估计的功能块图。

[0013] 图5是根据本公开内容的教导的例示了相电流重构的一种示例方法的流程图。

[0014] 图6A是根据本公开内容的教导的用于选择图5的用于重构相电流的适当的参考表的一个示例表。

[0015] 图6B是根据本公开内容的教导的例示了图6A的用于重构相电流的参考表的内容的一个示例表。

[0016] 图7A是根据本公开内容的教导的用于选择图5的用于重构相电流的适当的参考表的另一个示例表。

[0017] 图7B是根据本公开内容的教导的例示了图7A的用于重构相电流的参考表的内容的另一个示例表。

[0018] 在附图的所有若干视图中,对应的参考字符指示对应的部件。技术人员将理解,附图中的元件是为了简化和清楚而例示的,并且不一定按比例绘制。例如,附图中的一些元件的尺寸可能相对于其他元件被夸大,以帮助改善对本发明的各实施方案的理解。此外,通常未描绘在商业上可行的实施方案中有用的或必要的常见但容易理解的元件,以便于较不妨碍对本发明的这些各实施方案的查看。

具体实施方式

[0019] 在以下描述中,阐述了许多具体细节,以提供对本发明的透彻理解。然而,对于本领域普通技术人员将明了的是,不需要采用具体细节来实践本发明。在其他情况下,未详细描述众所周知的材料或方法,以避免模糊本发明。

[0020] 贯穿本说明书提及“一个实施方案(one embodiment)”、“一实施方案(an embodiment)”、“一个实施例(one example)”或“一实施例(an example)”意味着,结合该实施方案或实施例描述的具体特征、结构或特性被包括在本发明的至少一个实施方案中。因此,贯穿本说明书在各个地方出现的短语“在一个实施方案中”、“在一实施方案中”、“一个实施例”或“一实施例”不一定全指代相同的实施方案或实施例。此外,具体特征、结构或特性可以在一个或多个实施方案或实施例中以任何合适的组合和/或子组合进行组合。具体特征、结构或特性可以被包括在集成电路、电子电路、组合逻辑电路或提供所描述的功能的其他合适的部件中。另外,应理解,随此提供的附图用于向本领域普通技术人员进行解释的目的,并且附图不一定按比例绘制。

[0021] 无刷直流(BLDC)电动机正在成为替代有刷直流和交流电动机的受欢迎的选择。它们被广泛用于家用电器,诸如冰箱、空调、真空吸尘器、洗衣机/干衣机和其他白色商品以及诸如电钻的电动工具,或其他电动工具。BLDC电动机利用功率转换器,该功率转换器通常包括一个或多个半桥模块的逆变器级。半桥切换器模块通常包括功率开关、以半桥配置耦合的高侧功率开关和低侧功率开关、以及它们相应的开关控制器,以驱动功率开关导通(ON)或断开(OFF)。用于BLDC电动机的电动机驱动系统通常还包括系统控制器,该系统控制器接

收关于电动机的属性的感测信号并且将控制信号发送到半桥模块以控制功率开关的接通和关断,并且因此控制BLDC电动机的转子轴的期望的运动。

[0022] 三相电动机具有三个端子,被称为U、V和W,使用三个绕组。绕组和随后的相通常由它们与之对应的端子来指代。用于三相电动机的电动机驱动系统利用系统控制器和三个半桥模块来控制电动机的三相电流的大小和方向: I_{PHASEU} 、 I_{PHASEV} 、 I_{PHASEW} 。系统控制器可以采用数个不同的控制方案,诸如梯形或正弦换向(commutation)。对于梯形换向,每次一对地通过电动机端子来控制电流,其中第三电动机端子电断开。然而,由于电动机端子仅被成对地控制,存在电动机可以被控制的仅六个离散方向。这样,不对中(misalignment)是常见的并且在缓慢电动机速度下控制可能是常变的(choppy)。正弦换向试图使用相电流 I_{PHASEU} 、 I_{PHASEV} 、 I_{PHASEW} 驱动三个电动机绕组成正弦形状。电动机位置和相电流二者的反馈信息以及对瞬态的快速响应通常对于正弦换向是必需的。然而,在高电动机速度下,正弦换向的瞬时响应可能是不够的,并且在高电动机速度下控制可能显著降低。

[0023] 场定向控制是系统控制器可以利用的另一个控制方案,该控制方案利用相电流 I_{PHASEU} 、 I_{PHASEV} 、 I_{PHASEW} 的表示作为矢量,通常被称为电流空间矢量。用于一个给定的绕组的电流空间矢量具有表示由该绕组产生的磁场的方向以及与通过该绕组的相电流成正比的大小。总定子电流可以由如下矢量来呈现,该矢量是电动机的每个绕组的每个电流相矢量之和。三相电动机的每个电流空间矢量基本上相隔一百二十度(120°)。

[0024] 对于场定向控制(FOC),相电流 I_{PHASEU} 、 I_{PHASEV} 、 I_{PHASEW} 的电流空间矢量允许定子电流在电动机绕组的三轴参考系中的表示:U轴、V轴和W轴,它们相隔一百二十度(120°)。利用克拉克(Clarke)变换,定子电流矢量在三轴参考系中的表示可以被转变为定子电流矢量在定子的两轴参考系中的表示:阿尔法轴(α -轴)和贝塔轴(β -轴),它们相隔九十度(90°)。使用帕克(Park)变换,在定子的两轴参考系中的定子电流矢量可以在转子的旋转两轴参考系中被进一步表示:直轴(direct-axis,d轴)和交轴(quadrature-axis,q轴),它们相隔九十度(90°)并且相对于定子旋转。定子电流矢量的直d轴分量产生不使转子转动的压缩力,而定子电流矢量的交q轴分量产生扭矩。比例积分(PI)控制然后可以被用来最小化定子电流矢量的直分量并且最大化定子电流矢量的交分量。PI控制的输出然后被转换回到定子的固定两轴参考系(相隔 90° 的 α 轴和 β 轴),并且然后被转换回到电动机绕组的三轴参考系。这样,利用FOC的系统控制器可以在低速度下具有平滑运动并且在高速度下具有高效操作。然而,为了利用FOC,系统控制器应接收相电流 I_{PHASEU} 、 I_{PHASEV} 、 I_{PHASEW} 的全部。使电动机驱动系统测量相电流 I_{PHASEU} 、 I_{PHASEV} 、 I_{PHASEW} 的一种常用技术是添加与半桥模块的每个脚(leg)的低侧开关串联的分流电阻器。附加的部件(诸如运算放大器和偏移部件)也被添加使系统控制器测量相电流 I_{PHASEU} 、 I_{PHASEV} 、 I_{PHASEW} ,这利用相当大的物理空间、增加部件计数和总系统成本。

[0025] 相比之下,BridgeSwitch™半桥模块包括提供相电流感测信号(IPH)的端子,该相电流感测信号与流过半桥模块的低侧开关的电流成比例并且因此与相电流的一部分成比例。然而,相电流感测信号中的每个提供它们相应的感测相电流 I_{PHASEU} 、 I_{PHASEV} 、 I_{PHASEW} 的一部分,具体地提供相电流 I_{PHASEU} 、 I_{PHASEV} 、 I_{PHASEW} 的负部分。这样,在任何给定的时间点,所有三相电流 I_{PHASEU} 、 I_{PHASEV} 、 I_{PHASEW} 可能不可得自相电流感测信号。为了利用FOC,相电流应由存在的至少一个相电流感测信号(IPH)重构。

[0026] 相电流的重构已经在S.Baeurle和M.Ahmed于2019年8月发表在<https://>

www.power.com/design-support/whitepapers/direct-use-bridgeswitch-current-sense-signal-output-field-oriented-control-brushless-dc-motors的题为“Direct Use of BridgeSwitch™ Current Sense Signal Output in Field Oriented Control of Brushless DC Motors”的白皮书中被讨论,该白皮书通过引用整体被并入本文。然而,在该白皮书中提出的重构算法是三角计算和除法的组合以产生重构缩放因子,这可能需要系统控制器的相当大的处理能力。重构的相电流基本上是重构缩放因子和相电流感测信号的乘积。例如,微控制器,诸如48MHz Cortex-M0微控制器,经常被用于电动机驱动系统的系统控制器。这些微控制器通常具有大约32-200kB闪存,大约8-16kB的RAM,其中处理速度为大约48MHz。这些微控制器可能不能够以快到足以利用FOC的速度执行用于电流重构的三角计算。例如,对于通常与典型的电动机驱动系统一起使用的微控制器,遵循该白皮书的提出的过程的相电流重构可能花费大约836.63μs的处理时间。

[0027] 对于控制方案,诸如场定向控制,感测相电流 I_{PHASEU} 、 I_{PHASEV} 、 I_{PHASEW} 需要相电流的电流反馈。据一些估计,在半桥模块外部的总共二十九个部件被利用以提供三相电流 I_{PHASEU} 、 I_{PHASEV} 、 I_{PHASEW} 的电流反馈。相比之下,本公开内容的实施方案利用一个半桥模块,该模块包括提供内部感测的相电流感测信号(IPH)的端子,该相电流感测信号与流过一个半桥模块的低侧开关的电流成比例并且因此与相电流的一部分成比例。这样,每个半桥模块的单个电阻器可以被利用以提供三相电流 I_{PHASEU} 、 I_{PHASEV} 、 I_{PHASEW} 的电流反馈,并且将用于电流反馈的外部部件计数减少百分之九十。对于传统的分流电阻器,整个相电流流过该电阻器并且由于分流电阻器导致的功率损耗可能是相当大的。相比之下,内部感测的相电流感测信号(IPH)是比相电流本身小得多的值。例如,相电流可以是1安培(A),而相电流感测信号可以是100μA。传统的分流电阻器通常是0.22欧姆电阻器,而单个电阻器是大致10k欧姆以将相电流感测信号转换成电压值。由于传统的电阻器导致的功率损耗可能是约220mW,而由于IPH相电流感测信号导致的功率损耗是约0.1mW,功率损耗有99.95%的改进。

[0028] 本公开内容的实施方案已经识别了被用于相电流重构的计算结果中的模式。具体地,本公开内容的实施方案已经识别到数个重复模式每六十度(60°)出现。这样,相电流的三百六十度(360°)可以被划分成基本上六十度(60°)增量的六个扇区(扇区0到扇区5),并且重复模式响应于定子电流矢量的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 。这样,重复模式可以由参考表来表示,该参考表允许计算结果的预加载,这减少用于相电流重构的过程时间。该参考表可以响应于定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 而被索引并且适当的参考表的选择可以响应于定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 和至少一个相电流感测信号(IPH)。定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 可以根据定子电流矢量的阿尔法分量和贝塔分量被估计。此外,参考表中的存储的值表示重构缩放因子。重构的相电流基本上是重构缩放因子和可用的相电流感测信号的乘积。这样,代替执行复杂的三角计算,系统控制器利用响应于相电流感测信号(IPH)和定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 而选择的多个参考表来重构电动机的相电流。一旦相电流被重构,系统控制器就可以执行控制方案,诸如FOC,以提供控制信号来接通和关断半桥模块的多个开关。如上文所提及的,微控制器可能花费与836.63μs一样的处理时间来执行相电流重构的三角计算,不包括还确定定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 的附加的量的处理时间。相比之下,利用呈现的公开内容的利用参考表的实施方案的系统控制器可能花费约2.63μs的处理时间来执行相电流重构。这样,本公开内容的实施方案可以减少用于相电流重构的处理时间并且便于用于电动机驱动系统的场定向控制。

[0029] 图1A例示了包括三个半桥逆变器模块102a、102b和102c的多相电动机驱动系统100,所述逆变器模块耦合到高电压(HV)总线107并且通过系统控制器106控制以驱动电动机104,诸如例如三相电动机。如所示出的,每个半桥逆变器模块102a、102b和102c以及系统控制器106参考回线111。每个半桥模块102a、102b和102c耦合到电动机104的三相端子U、V和W。用于电动机104的每个相/脚的电流被表示为相电流 I_{PHASEU} 116、 I_{PHASEV} 122和 I_{PHASEW} 128。此外,每个半桥模块102a、102b和102c被配置为向系统控制器106输出相电流感测信号IPHU 118、IPHV 124和IPHW 130,所述相电流感测信号表示它们相应的相电流 I_{PHASEU} 116、 I_{PHASEV} 122和 I_{PHASEW} 128。在一个实施例中,根据本公开内容的教导,系统控制器106可以根据至少一个相电流感测信号IPHU 118、IPHV 124和IPHW 130来确定相电流 I_{PHASEU} 116、 I_{PHASEV} 122和 I_{PHASEW} 128。应理解,相电流感测信号IPHU 118、IPHV 124和IPHW 130可以被称为第一相电流感测信号IPHU、第二相电流感测信号IPHV和第三相电流感测信号IPHW,而相电流 I_{PHASEU} 116、 I_{PHASEV} 122和 I_{PHASEW} 128可以被称为第一相电流 I_{PHASEU} 、第二相电流 I_{PHASEV} 、和第三相电流 I_{PHASEW} 。

[0030] 每个半桥模块102a、102b和102c分别包括高侧功率开关108a、108b、108c和低侧功率开关110a、110b、110c,所述高侧功率开关和所述低侧功率开关以半桥配置耦合在一起作为功率转换器或逆变器。高侧开关108a、108b、108c和低侧开关110a、110b、110c被示出为具有它们相应的反并联二极管的n型金属氧化物半导体场效应晶体管。然而,应理解,可以使用其他晶体管,诸如绝缘栅双极型晶体管(IGBT)、双极型晶体管、注入增强栅极晶体管(IEGT)和栅极关断晶闸管(GTO)。此外,半桥模块102a、102b和102c可以与基于氮化镓(GaN)半导体或碳化硅(SiC)半导体的功率开关一起使用。它们相应的半桥模块102a、102b和102c的每个高侧开关108a、108b、108c和低侧开关110a、110b、110c之间的半桥中点端子HB1、HB2、HB3耦合到多相电动机104的三相端子U、V、W。在一个实施例中,电动机104是无刷三相直流电动机。

[0031] 每个高功率开关108a、108b、108c的接通和关断由其相应的高侧开关控制器112a、112b、112c控制,而每个低侧功率开关110a、110b、110c的接通和关断由其相应的低侧开关控制器114a、114b、114c控制。开关108a、108b、108c、110a、110b和110c的开关属性由它们相应的开关控制器控制,以调节到电动机104的能量流。换句话说,开关控制器112a、112b、112c、114a、114b和114c调整到电动机104的输出以维持电动机104的目标操作。在操作中,半桥模块102a、102b和102c从由HV总线107供应的电向电动机104提供输入电信号(诸如用于期望的机械输出负载运动的电压、电流、频率和相)。在一个实施例中,半桥模块102a、102b和102c控制相电流 I_{PHASEU} 116、 I_{PHASEV} 122和 I_{PHASEW} 128以关于目标操作控制电动机104。

[0032] 半桥模块102a、102b、102c各自分别包括电流感测电路115a、115b、115c。如所示出的,低侧开关控制器114a、114b、114c各自分别包括电流感测电路115a、115b、115c。电流感测电路115a、115b、115c被配置为接收它们相应的低侧功率开关110a、110b、110c的电流。在一个实施例中,电流感测电路115a、115b、115c接收它们相应的低侧功率开关110a、110b、110c的漏极电流。当低侧功率开关110a、110b、110c传导时,低侧功率开关110a、110b、110c的漏极电流表示它们相应的电动机相电流 I_{PHASEU} 116、 I_{PHASEV} 122和 I_{PHASEW} 128。具体地,电流感测电路115a接收低侧功率开关110a的漏极电流,当低侧功率开关110a传导时,该漏极

电流表示相电流 I_{PHASEU} 116。电流检测电路115b接收低侧功率开关110b的漏极电流,当低侧功率开关110b传导时,该漏极电流表示相电流 I_{PHASEV} 122。电流感测电路115c接收低侧功率开关110c的漏极电流,当低侧功率开关110c传导时,该漏极电流表示相电流 I_{PHASEW} 128。这样,电流感测电路115a、115b、115c感测相电流 I_{PHASEU} 116、 I_{PHASEV} 122和 I_{PHASEW} 128的相应的负值。

[0033] 每个电流感测电路115a、115b、115c输出它们相应的相电流感测信号IPHU 118、IPHV 124、IPHW 130。在一个实施例中,相电流感测信号IPHU 118、IPHV 124、IPHW 130是电流信号。对于所示出的实施例,正相电流被定义为从半桥模块流向电动机的电流。这样,相电流感测信号IPHU 118、IPHV 124、IPHW 130表示它们相应的相电流 I_{PHASEU} 116、 I_{PHASEV} 122和 I_{PHASEW} 128的负值。例如,相电流感测信号IPHU 118表示相电流 I_{PHASEU} 116的负值,相电流感测信号IPHV 124表示相电流 I_{PHASEV} 122的负值,并且相电流感测信号IPHW 130表述相电流 I_{PHASEW} 128的负值。在一个实施例中,相电流感测信号IPHU 118、IPHV 124、IPHW 130可以是代表它们相应的相电流 I_{PHASEU} 116、 I_{PHASEV} 122和 I_{PHASEW} 128的正值的恒定值。在一个实施例中,该恒定值基本上为零。然而,在电流感测电路115a、115b和115c的一些实施方式中,即使当没有电流传递通过低侧功率开关110a、110b、110c时,相电流感测信号IPHU 118、IPHV 124、IPHW 130具有最小的非零输出值。然而,应理解,相电流感测信号IPHU 118、IPHV 124、IPHW 130提供代表相电流 I_{PHASEU} 116、 I_{PHASEV} 122和 I_{PHASEW} 128的感测的负值的正值。这样,相电流感测信号IPHU 118、IPHV 124、IPHW 130分别对于相电流 I_{PHASEU} 116、 I_{PHASEV} 122和 I_{PHASEW} 128的正值是基本上恒定的,并且分别与相电流 I_{PHASEU} 116、 I_{PHASEV} 122和 I_{PHASEW} 128的负值成镜像。

[0034] 系统控制器106被配置为从用户输入134接收一个或多个命令信号以控制电动机104的操作。例如,系统控制器106可以接收“导通”命令以接通并且开始电动机104的操作,或相反地,可以接收“断开”命令以停止电动机104的操作。来自用户输入134的另外的命令信号可以包括电动机104的期望的机械输出,诸如速度或扭矩。此外,系统控制器106还被耦合以接收表示电动机104的相电流 I_{PHASEU} 116、 I_{PHASEV} 122和 I_{PHASEW} 128的相电流感测信号IPHU 118、IPHV 124、IPHW 130。系统控制器106利用这些相电流感测信号IPHU 118、IPHV 124、IPHW 130来控制电动机104的期望的机械输出。

[0035] 响应于来自用户输入134的命令信号和相电流感测信号IPHU 118、IPHV 124、IPHW 130,系统控制器106将控制信号CTRLU 120、CTRLV 126和CTRLW 132分别输出到半桥模块102a、102b、102c,以控制高侧功率开关108a、108b、108c和低侧功率开关110a、110b、110c的接通和关断。在一个实施例中,控制信号CTRLU 120、CTRLV 126和CTRLW 132表示接通和关断适用的半桥模块的高侧和低侧功率开关的命令。在另一个实施例中,控制信号CTRLU 120、CTRLV 126和CTRLW 132也可以表示相应的功率开关的开关属性。开关属性可以包括功率开关的导通时间、断开时间、占空比(通常是开关的导通时间与总开关周期的比)、开关频率或功率开关的每单位时间的脉冲的数目。此外,控制信号CTRLU 120、CTRLV 126和CTRLW 132可以是电压信号或电流信号。

[0036] 在一个实施例中,控制信号CTRLU 120、CTRLV 126和CTRLW 132是具有变化长度的高持续时间和低持续时间的矩形脉冲宽度波形。在一个实施例中,用于控制信号CTRLU 120、CTRLV 126和CTRLW 132的高值可以与接通相应的高侧开关108a、108b、108c并且关断

相应的低侧开关110a、110b、110c对应。用于控制信号CTRLU 120、CTRLV 126和CTRLW 132的低值可以与接通相应的低侧开关110a、110b、110c并且关断相应的高侧开关108a、108b、108c对应。响应于相应的接收的控制信号CTRLU 120、CTRLV 126和CTRLW 132,高侧开关控制器112a、112b、112c驱动高侧开关108a、108b、108c的接通或关断,而低侧开关控制器114a、114b、114c驱动低侧开关110a、110b、110c的接通或关断。

[0037] 根据本公开内容的实施方案,系统控制器106还执行相电流重构。如上文所讨论的,接收的相电流感测信号IPHU 118、IPHV 124、IPHW 130表示电动机104的相电流 I_{PHASEU} 116、 I_{PHASEV} 122和 I_{PHASEW} 128的一部分。在一个实施例中,相电流感测信号IPHU 118、IPHV 124、IPHW 130分别对于相电流 I_{PHASEU} 116、 I_{PHASEV} 122和 I_{PHASEW} 128的正值是基本上恒定的,并且分别与相电流 I_{PHASEU} 116、 I_{PHASEV} 122和 I_{PHASEW} 128的负值成镜像。此外,相电流 I_{PHASEU} 116、 I_{PHASEV} 122和 I_{PHASEW} 128相对于彼此偏移一百二十度(120°),并且相电流感测信号IPHU 118、IPHV 124、IPHW 130也相对于彼此偏移一百二十度(120°)。这样,存在相电流感测信号IPHU 118、IPHV 124、IPHW 130中的一个或多个基本上等于恒定值并且不提供关于它们相应的相电流 I_{PHASEU} 116、 I_{PHASEV} 122和 I_{PHASEW} 128的信息的部分时间。可以由系统控制器106利用的一些控制方案(诸如场定向控制)利用所有三相电流 I_{PHASEU} 116、 I_{PHASEV} 122和 I_{PHASEW} 128来确定控制信号CTRLU 120、CTRLV 126和CTRLW 132。这样,在本公开内容的实施方案中,当由于相电流感测信号IPHU 118、IPHV 124、IPHW 130中的一个或多个基本上等于恒定值(诸如零或电流感测电路的最小输出)而导致关于相电流 I_{PHASEU} 116、 I_{PHASEV} 122和 I_{PHASEW} 128中的一个或多个的信息丢失时,系统控制器106包括相电流重构。

[0038] 如将进一步讨论的,系统控制器106利用定子电流矢量的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 和多个参考表来重构相电流 I_{PHASEU} 116、 I_{PHASEV} 122和 I_{PHASEW} 128。系统控制器106还包括定子电流角度估计器,该定子电流角度估计器根据定子电流矢量的阿尔法分量和贝塔分量来确定定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 。对于用于相电流重构的复三角方程,数个模式基本上每六十度(60°)重复一次。这样,相电流 I_{PHASEU} 116、 I_{PHASEV} 122和 I_{PHASEW} 128的三百六十度(360°)可以被划分成基本上六十度(60°)增量的六个扇区(扇区0到扇区5),并且重复模式与定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 相关。可以利用参考表来表示允许用于相电流重构的复三角计算结果的预加载的模式。在本公开内容的实施方案中,适当的参考表可以响应于定子电流矢量的估计的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 和相电流感测信号IPHU 118、IPHV 124、IPHW 130而被选择。参考表本身关于定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 和定子电流矢量的扇区被索引。参考表本身包括被用于重构相应的相电流的重构缩放因子。在一个实施方案中,相应的相电流的重构响应于重构缩放因子和相电流感测信号IPHU 118、IPHV 124、IPHW 130中的一个而被完成。

[0039] 图1B例示了半桥模块102a的一个实施例,该半桥模块被耦合以将相电流感测信号IPHU 118提供给系统控制器106。应理解,类似地命名和编号的元件如上文所描述的那样耦合和起作用。此外,在图1B中仅示出了半桥模块102a,但是应理解,所示出的耦合也可以被用于半桥模块102b和102c。

[0040] 相电流感测信号IPHU 118可以是由半桥模块102a输出到系统控制器106的电流信号。相电流感测信号IPHU 118表示低侧功率开关110a的漏极电流和相电流 I_{PHASEU} 116的负值。电阻器121耦合到回线111和输出相电流感测信号IPHU 118的半桥模块102a的端子。相电流感测信号IPHU 118的电流信号输出可以经由电阻器117被转换为电压信号 V_{IPHU} 121。

应理解,在图1B中仅示出了半桥模块102a,但是应理解,可以利用电阻器来将由半桥模块102b、102c输出的相电流感测信号转换为电压信号。

[0041] 提供相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 、 $I_{\text{PHASEV}} 122$ 和 $I_{\text{PHASEW}} 128$ 的反馈的先前的技术包括与半桥模块102a、102b、102c的每个脚的低侧开关110a、110b、110c串联的分流电阻器的使用。附加的部件,诸如运算放大器和偏移部件,也被添加使系统控制器接收感测的相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 、 $I_{\text{PHASEV}} 122$ 和 $I_{\text{PHASEW}} 128$,这利用相当大的物理空间、增加部件计数和总系统成本。例如,在先前的解决方案中,在半桥模块102a、102b、102c外部的总共二十九个部件被利用以提供三相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 、 $I_{\text{PHASEV}} 122$ 和 $I_{\text{PHASEW}} 128$ 的电流反馈。相比之下,本公开内容的实施方案包括半桥模块102a、102b、102c,所述半桥模块输出表示低侧功率开关110a、110b、110c的漏极电流并且因此与它们相应的相电流成比例的相电流感测信号 $IPHU 118$ 、 $IPHV 124$ 、 $IPHW 130$ 。这样,每个半桥模块102a、102b、102c的如图1B中所示出的单个电阻器可以被利用以提供三相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 、 $I_{\text{PHASEV}} 122$ 和 $I_{\text{PHASEW}} 128$ 的反馈,并且将用于电流反馈的外部部件计数减少百分之九十。对于传统的分流电阻器,整个相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 流过分流电阻器并且功率损耗可以是相当大的。相比之下,由半桥模块102a内部地提供的相电流感测信号 $IPHU 118$ 表示相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 并且是与相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 本身(其是约1A)相比小得多的值,约100 μA 。这样,由于传统的分流电阻器导致的功率损耗可以是约220mW,而由于相电流感测信号 $IPHU 118$ 导致的功率损耗可以是约0.1mW,功率损耗有99.95%的改进。

[0042] 图2A例示了示例相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 、 $I_{\text{PHASEV}} 122$ 和 $I_{\text{PHASEW}} 128$ 的图200和对应的示例相电流感测信号 $IPHU 118$ 、 $IPHV 124$ 、 $IPHW 130$ 的图201。相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 、 $I_{\text{PHASEV}} 122$ 和 $I_{\text{PHASEW}} 128$ 是基本上正弦的,并且相对于彼此移位一百二十度(120°)。例如,相电流 $I_{\text{PHASEV}} 122$ 相对于相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 移位一百二十度(120°),而相电流 $I_{\text{PHASEW}} 128$ 相对于相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 移位二百四十度(240°)。图200和图201二者的x轴表示时间和定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 。如所示出的,在零度(0°)处定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 基本上对应于相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 的峰正值,在一百二十度(120°)处定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 基本上对应于相电流 $I_{\text{PHASEV}} 122$ 的峰正值,而在二百四十度(240°)处定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 基本上对应于 $I_{\text{PHASEW}} 128$ 的峰正值。相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 、 $I_{\text{PHASEV}} 122$ 和 $I_{\text{PHASEW}} 128$ 中的每个基本上具有基本上三百六十度(360°)的周期。

[0043] 相电流感测信号 $IPHU 118$ 、 $IPHV 124$ 、 $IPHW 130$ 表示它们相应的相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 、 $I_{\text{PHASEV}} 122$ 和 $I_{\text{PHASEW}} 128$ 的负值。此外,相电流感测信号 $IPHU 118$ 、 $IPHV 124$ 、 $IPHW 130$ 对于它们相应的相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 、 $I_{\text{PHASEV}} 122$ 和 $I_{\text{PHASEW}} 128$ 的正值是基本上恒定的。在一个实施例中,该恒定值基本上为零。然而,在电流感测电路115a、115b和115c的一些实施方式中,相电流感测信号 $IPHU 118$ 、 $IPHV 124$ 、 $IPHW 130$ 具有最小的非零输出值。这样,在一个实施例中,该恒定值是非零输出值。然而,应理解,输出的相电流感测信号 $IPHU 118$ 、 $IPHV 124$ 、 $IPHW 130$ 对于相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 、 $I_{\text{PHASEV}} 122$ 和 $I_{\text{PHASEW}} 128$ 的感测的负值是正的。这样,相电流感测信号 $IPHU 118$ 、 $IPHV 124$ 、 $IPHW 130$ 分别对于相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 、 $I_{\text{PHASEV}} 122$ 和 $I_{\text{PHASEW}} 128$ 的正值是基本上恒定的,并且分别与相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 、 $I_{\text{PHASEV}} 122$ 和 $I_{\text{PHASEW}} 128$ 的负值成镜像。

[0044] 如图201中所示出的,相电流感测信号 $IPHU 118$ 从零度(0°)到九十度(90°)基本上是恒定值。在九十度(90°)和二百七十度(270°)之间,相电流感测信号 $IPHU 118$ 基本上与在

九十度(90°)和二百七十度(270°)之间的相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 的负值成镜像。相电流感测信号IPHU 118从二百七十度(270°)到四百五十度(450°)基本上是恒定值。

[0045] 类似地,相电流感测信号IPHV 124从三十度(30°)到二百一十度(210°)基本上是恒定值,并且基本上与在二百一十度(210°)和三百九十度(390°)之间的相电流 $I_{\text{PHASEV}} 122$ 的负值成镜像。相电流感测信号IPHW 130在一百五十度(150°)到三百三十度(330°)之间基本上是恒定值,并且基本上与在三百三十度(330°)和五百一十度(510°)之间的相电流 $I_{\text{PHASEW}} 128$ 的负值成镜像。这样,相电流感测信号IPHU 118、IPHV 124、IPHW 130在一百八十度(180°)部段内基本上是恒定值,并且在一百八十度(180°)部段内与它们相应的相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 、 $I_{\text{PHASEV}} 122$ 和 $I_{\text{PHASEW}} 128$ 的负值成镜像。相电流感测信号IPHU 118、IPHV 124、IPHW 130也具有基本上三百六十度(360°)的周期。

[0046] 图2A中所示出的是扇区0到扇区5。每个扇区基本上是以定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 的六十度(60°)增量。扇区0与基本上在九十度(90°)和一百五十度(150°)之间的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 对应。扇区1与基本上在一百五十度(150°)和二百一十度(210°)之间的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 对应。扇区2与基本上在二百一十度(210°)和二百七十度(270°)之间的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 对应。扇区3与基本上在二百七十度(270°)和三百三十度(330°)之间的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 对应。扇区4与基本上在三百三十度(330°)和三百九十度(390°)之间的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 对应。或换句话说,扇区4与基本上在三百三十度(330°)和三百六十度(360°)之间以及在零度(0°)和三十度(30°)之间的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 对应。扇区5与基本上在三十度(30°)和九十度(90°)之间的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 对应。

[0047] 图2B例示了与图2A中所示出的时序图对应的矢量图203。图2B中的度数标记与定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta} 238$ 对应, $\Theta_{\alpha\beta} 238$ 也相对于图2A被示出。相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 、 $I_{\text{PHASEV}} 122$ 、 $I_{\text{PHASEW}} 128$ 连同它们相应的相电流感测信号IPHU 118、IPHV 124、IPHW 130可以被表示为矢量——通常被称为电流空间矢量。用于一个给定的绕组的电流空间矢量具有表示该绕组产生的磁场的方向和与通过该绕组的相电流成比例的大小。总定子电流可以由矢量来呈现,该矢量是电动机的每个绕组的每个电流相矢量的之和。三相电动机的每个电流空间矢量基本上相隔一百二十度(120°)。

[0048] 相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 、 $I_{\text{PHASEV}} 122$ 和 $I_{\text{PHASEW}} 128$ 的电流空间矢量允许定子电流在电动机绕组的三轴参考系中的表示。电动机绕组的三轴参考系通常被称为U轴、V轴和W轴,所述轴彼此相隔一百二十度(120°)。如所示出的,U轴与零度(0°)对应,V轴与一百二十度(120°)对应,并且W轴与二百四十度(240°)对应。相电流感测信号IPHU 118、IPHV 124、IPHW 130提供用于表示相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 、 $I_{\text{PHASEV}} 122$ 和 $I_{\text{PHASEW}} 128$ 的相应的电流空间矢量的大小。表示相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 的电流空间矢量的方向将在零度(0°)处,表示相电流 $I_{\text{PHASEV}} 122$ 的电流空间矢量的方向将在一百二十度(120°)处,并且表示相电流 $I_{\text{PHASEW}} 128$ 的电流空间矢量的方向将在两百四十度(240°)处。用于相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 、 $I_{\text{PHASEV}} 122$ 和 $I_{\text{PHASEW}} 128$ 中的每个的单独的电流空间矢量可以被相加在一起以提供定子电流矢量 $I_{\alpha\beta} 236$ 。

[0049] 定子电流矢量 $I_{\alpha\beta} 236$ 在三轴参考系(U轴、V轴和W轴)中的表示可以被转变为定子电流矢量 $I_{\alpha\beta} 236$ 在定子的两轴参考系中的表示。定子的两轴参考系通常被称为相隔九十度(90°)的阿尔法轴(α -轴)和贝塔轴(β -轴)。如所示出的,阿尔法轴(α -轴)与零度(0°)对应,而贝塔轴(β -轴)与九十度(90°)对应。三相到两相变换(诸如克拉克变换)可以被利用以将

定子电流矢量 $I_{\alpha\beta}236$ 在三轴参考系(U轴、V轴和W轴)中的表示转变到阿尔法轴(α -轴)和贝塔轴(β -轴)的两轴参考系。

[0050] 图2B示出了具有大小和方向的定子电流矢量 $I_{\alpha\beta}236$ 的一个实施例。该方向可以由定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 定义,该定子电流角度是阿尔法轴(α -轴)和定子电流矢量 $I_{\alpha\beta}236$ 之间的角距离。定子电流矢量 $I_{\alpha\beta}236$ 可以由阿尔法分量矢量 i_α 和贝塔分量矢量 i_β 表示。阿尔法分量矢量 i_α 基本上是定子电流矢量 $I_{\alpha\beta}236$ 在阿尔法轴(α -轴)上的投影,而贝塔分量矢量 i_β 基本上是定子电流矢量 $I_{\alpha\beta}236$ 在贝塔轴(β -轴)上的投影。阿尔法分量与贝塔分量之和将基本上等于定子电流矢量 $I_{\alpha\beta}236$ 。

[0051] 类似于图2A,扇区0到扇区5由图2B的矢量图203上的阴影区域示出。每个扇区基本上以定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 的六十度(60°)增量。扇区0与基本上在九十度(90°)和一百五十度(150°)之间的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 对应并且由重密度虚线区域示出。扇区1与基本上在一百五十度(150°)和二百一十度(210°)之间的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 对应并且由轻密度虚线区域示出。扇区2与基本上在二百一十度(210°)和二百七十度(270°)之间的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 对应并且由中等密度虚线区域示出。扇区3与基本上在二百七十度(270°)和三百三十度(330°)之间的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 对应并且由重密度虚线区域示出。扇区4与基本上在三百三十度(330°)和三百六十度(360°)之间以及在零度(0°)和三十度(30°)之间的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 对应并且由轻密度虚线区域示出。扇区5与基本上在三十度(30°)和九十度(90°)之间的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 对应并且由中等密度虚线区域示出。

[0052] 如上文所提及的,在定子的两轴参考系中的定子电流矢量 $I_{\alpha\beta}236$ 可以由转子的旋转两轴参考系进一步表示。转子的旋转两轴参考系通常被称为直轴(d轴)和交轴(q轴),它们相隔九十度(90°)并且相对于定子的两轴参考系旋转。静止到旋转系变换(诸如帕克变换)可以被利用以根据定子电流矢量 $I_{\alpha\beta}236$ 在d轴上的直分量和定子电流矢量 $I_{\alpha\beta}236$ 在q轴上的交分量来表示定子电流矢量 $I_{\alpha\beta}236$ 。定子电流矢量 $I_{\alpha\beta}236$ 的直分量产生不使转子转动的压缩力,而定子电流矢量 $I_{\alpha\beta}236$ 的交分量产生扭矩。比例积分(PI)控制可以被利用以最小化定子电流矢量 $I_{\alpha\beta}236$ 的直分量并且最大化定子电流矢量 $I_{\alpha\beta}236$ 的交分量。

[0053] 这样,将相电流 $I_{\text{PHASEU}}116$ 、 $I_{\text{PHASEV}}122$ 和 $I_{\text{PHASEW}}128$ 表示为电流空间矢量可以允许由系统控制器106利用控制方案,诸如场定向控制。然而,如图2A中所示出的,相电流感测信号 $IPHU118$ 、 $IPHV124$ 、 $IPHW130$ 可能不同时提供关于所有相电流 $I_{\text{PHASEU}}116$ 、 $I_{\text{PHASEV}}122$ 和 $I_{\text{PHASEW}}128$ 的信息。例如,在基本上一百八十度(180°)处,仅相电流感测信号 $IPHU118$ 表示其相电流 $I_{\text{PHASEU}}116$,并且这样,仅关于相电流 $I_{\text{PHASEU}}116$ 的信息对系统控制器106是可用的。这样,在本公开内容的实施方案中,系统控制器106利用相电流重构。

[0054] 在实施方案中,系统控制器106利用定子电流矢量 $I_{\alpha\beta}236$ 的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}238$ 和多个参考表来重构相电流 $I_{\text{PHASEU}}116$ 、 $I_{\text{PHASEV}}122$ 和 $I_{\text{PHASEW}}128$ 。系统控制器106还包括定子电流角度估计器,该电流角度估计器根据定子电流矢量 $I_{\alpha\beta}236$ 的阿尔法分量 i_α 和贝塔分量 i_β 来确定定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}238$ 。参考表可以被利用并且允许用于相电流重构的复三角计算结果的预加载。在一个实施方案中,这些复三角计算结果表示重构缩放因子。在本公开内容的实施方案中,适当的参考表可以响应于定子电流矢量 $I_{\alpha\beta}236$ 的估计的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}238$ 和相电流感测信号 $IPHU118$ 、 $IPHV124$ 、 $IPHW130$ 中的一个而被选择。参考表本身关于定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}238$ 和定子电流矢量 $I_{\alpha\beta}236$ 的扇区而被索引。在一个实施方案中,参考

表中的存储的值表示重构缩放因子,并且相应的相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 、 $I_{\text{PHASEV}} 122$ 和 $I_{\text{PHASEW}} 128$ 的重构基本上是由适当的参考表提供的存储的重构缩放因子和由相电流感测信号 $\text{IPHU} 118$ 、 $\text{IPHV} 124$ 、 $\text{IPHW} 130$ 中的一个提供的大小的乘积。

[0055] 图3A例示了根据本公开内容的教导的具有相电流重构器340的一个示例系统控制器306A。系统控制器306A是系统控制器106的一个实施例,另外,类似地命名和编号的元件如上文所描述的那样耦合和起作用。系统控制器306A被示出为包括相电流重构器340、参考系变换器342、定子电流估计器348、转子位置估计器378、比例积分器(P-I)控制块350、参考系变换器352和控制信号发生器354。参考系变换器342被进一步示出为包括三相到两相变换器344(诸如克拉克变换器344),以及静止到旋转系变换器346(诸如帕克变换器346)。应理解,图3A中所示出的系统控制器306A可以表示软件架构、硬件设计或软件架构和硬件设计二者的组合。图3A中所示出的系统控制器306A实施用于电动机驱动系统的场定向控制,然而,应理解,其他控制方案可以与本公开内容的实施方案一起被利用。例如,利用正弦换向的系统控制器可以利用重构的相电流大小,如关于本公开内容所讨论的。

[0056] 系统控制器306A接收相电流感测信号 $\text{IPHU} 118$ 、 $\text{IPHV} 124$ 和 $\text{IPHW} 130$ 并且输出控制信号 $\text{CTRLU} 120$ 、 $\text{CTRLV} 126$ 和 $\text{CTRLW} 132$ 。如所示出的,相电流重构器340接收相电流感测信号 $\text{IPHU} 118$ 、 $\text{IPHV} 124$ 和 $\text{IPHW} 130$ 以及估计的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta} 338$ 。响应于接收到相电流感测信号 $\text{IPHU} 118$ 、 $\text{IPHV} 124$ 和 $\text{IPHW} 130$ 以及估计的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta} 338$,相电流重构器340重构相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 、 $I_{\text{PHASEV}} 122$ 和 $I_{\text{PHASEW}} 128$ 。重构的相电流通过相电流重构器340被输出为u分量 $i_u 355$ 、v分量 $i_v 356$ 和w分量 $i_w 357$ 。在一个实施方案中,u分量 $i_u 355$ 表示相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 的重构的大小,v分量 $i_v 356$ 表示相电流 $I_{\text{PHASEV}} 122$ 的重构的大小,并且w分量 $i_w 357$ 表示相电流 $I_{\text{PHASEW}} 128$ 的重构的大小。应理解,u分量 $i_u 355$ 、v分量 $i_v 356$ 和w分量 $i_w 357$ 可以被称为第一重构的相电流大小 i_u 、第二重构的相电流大小 i_v 和第三重构的相电流大小 i_w 。

[0057] 相电流重构器340包括具有表示重构缩放因子的预加载值的至少一个参考表。在一个实施方案中,重构的相电流大小——u分量 $i_u 355$ 、v分量 $i_v 356$ 和w分量 $i_w 357$ ——可以基本上是适当的存储的重构缩放因子和由相电流感测信号 $\text{IPHU} 118$ 、 $\text{IPHV} 124$ 或 $\text{IPHW} 130$ 中的一个提供的大小的乘积。每个参考表包括六十个值,并且对将被输出用于u分量 $i_u 355$ 、v分量 $i_v 356$ 和w分量 $i_w 357$ 的重构缩放因子的适当值的选择是响应于估计的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta} 338$ 。此外,预加载值是基于定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta} 338$ 计算的并且表示重构缩放因子。这样,参考表关于定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta} 338$ 被索引。在本公开内容的实施方案中,适当的参考表可以是响应于估计的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta} 338$ 和相电流感测信号 $\text{IPHU} 118$ 、 $\text{IPHV} 124$ 、 $\text{IPHW} 130$ 而被选择的。如将进一步讨论的,参考表可以是响应于估计的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta} 338$ 和接收的相电流感测信号 $\text{IPHU} 118$ 、 $\text{IPHV} 124$ 、 $\text{IPHW} 130$ 中的哪个是可用的而被选择的。如果接收的相电流感测信号 $\text{IPHU} 118$ 、 $\text{IPHV} 124$ 、 $\text{IPHW} 130$ 分别大于阈值 UMIN 、 VMIN 或 WMIN ,接收的相电流感测信号 $\text{IPHU} 118$ 、 $\text{IPHV} 124$ 、 $\text{IPHW} 130$ 可以被认为可用或存在。应理解,阈值 UMIN 、 VMIN 或 WMIN 可以被称为第一阈值 UMIN 、第二阈值 VMIN 和第三阈值 WMIN 。在一个实施例中,阈值 UMIN 、 VMIN 或 WMIN 的值是基本上相等的。参考系变换器342将来自电动机绕组的三轴参考系的重构的相电流大小——u分量 $i_u 355$ 、v分量 $i_v 356$ 和w分量 $i_w 357$ ——转变成与转子的旋转两轴参考系相关的对应的直分量 $i_d 360$ 和交分量 $i_q 361$ 。如所示出的,参考系转

变器342的三相到两相变换器344(例如克拉克变换器344)接收u分量 i_u 355、v分量 i_v 356和w分量 i_w 357,并且输出与定子的两轴参考系相关的阿尔法分量 i_a 358和贝塔分量 i_b 359。阿尔法分量 i_a 358和贝塔分量 i_b 359分别是定子电流矢量 $I_{a\beta}$ 在 α 轴和 β 轴上的投影的大小。在一个示例操作中,三相到两相变换器344(克拉克变换器344)对u分量 i_u 355、v分量 i_v 356和w分量 i_w 357执行克拉克变换以输出阿尔法分量 i_a 358和贝塔分量 i_b 359。

[0058] 定子电流角度估计器348接收阿尔法分量 i_a 358和贝塔分量 i_b 359并且输出估计的定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 338。如上文所提及的,阿尔法分量 i_a 358与贝塔分量 i_b 359之和产生定子电流矢量 $I_{a\beta}$ 236。这样,定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 338可以从阿尔法分量 i_a 358和贝塔分量 i_b 359得出。在一个实施例中,并且关于图4进一步所示出的,可以利用锁相环(PLL)来根据阿尔法分量 i_a 358和贝塔分量 i_b 359确定估计的定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 338。然而,应理解,可以利用其他角度估计器。例如,利用标准C库的反正切角度估计器或利用特定硬件的反正切角度估计器。

[0059] 转子位置估计器378也被耦合以接收阿尔法分量 i_a 358和贝塔分量 i_b 359并且输出转子角度 Θ_{rotor} 379。在一个实施例中,转子位置估计器378确定转子磁通矢量(例如转子角度 Θ_{rotor} 379)的角位置。在本公开内容的一个实施例中,系统控制器306A是无传感器的并且不使用外部传感器来确定转子的位置。这样,系统控制器306A包括转子位置估计器378。在一个实施例中,转子位置估计器378响应于阿尔法分量 i_a 358和贝塔分量 i_b 359以及由参考系变换器352产生的控制信号 v_a 380和 v_b 381而确定转子角度 Θ_{rotor} 379。如将进一步讨论的,控制信号 v_a 380被输出以调节阿尔法分量 i_a 358而控制信号 v_b 381被输出以调节贝塔分量 i_b 359到期望值。但是,应理解,本公开内容的实施方案可以被实施为外部转子位置传感器。在一个实施例中,转子磁通矢量在定子电流矢量 $I_{a\beta}$ 236之后基本上九十度(90°)。

[0060] 定子电流角度估计器348可能需要时间来初始化以提供更准确的估计的定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 338。具体地,定子电流角度估计器348可以在电动机驱动系统和系统控制器306A的启动操作期间被初始化。然而,转子磁通矢量在定子电流矢量 $I_{a\beta}$ 236之后基本上九十度(90°)。这样,在启动操作期间,相电流重构器340可以利用转子角度 Θ_{rotor} 379来确定定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 而不是由定子电流角度估计器348提供的估计的定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 338。在所示出的实施方案中,相电流重构器340接收转子角度 Θ_{rotor} 379。在启动操作期间,相电流重构器340确定定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 338基本上是转子角度 Θ_{rotor} 379与预设偏移角度 Θ_{angle} 之和。在一个实施例中,预设偏移角度 Θ_{angle} 是基本上九十度(90°)。这样,在启动操作期间,定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 338以预定速率在零度(0°)和三百六十度(360°)之间变化,以输出u分量 i_u 355、v分量 i_v 356和w分量 i_w 357。一旦启动操作被完成,相电流重构器340就利用由定子电流角度估计器348提供的估计的定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 338。

[0061] 静止到旋转系变换器346(例如帕克变换器346)接收对应于定子的固定两轴参考系的贝塔分量 i_b 359、阿尔法分量 i_a 358、以及转子角度 Θ_{rotor} 379,并且输出对应于转子的旋转两轴参考系的直分量 i_d 360和交分量 i_q 361。在一个示例操作中,静止到旋转系变换器346(例如帕克变换器346)对阿尔法分量 i_a 358和贝塔分量 i_b 359执行帕克变换以输出直分量 i_d 360和交分量 i_q 361。

[0062] P-I控制块350接收直分量 i_d 360和交分量 i_q 361并且输出控制信号 v_d 362和控制信号 v_q 363。P-I控制块350还接收用户输入134。在一个实施例中,用户输入134表示电动机的期望的机械输出,诸如电动机的速度、扭矩或位置。在一个实施例中,用户输入134可以表

示电动机的扭矩。直分量 i_d 360表示电动机的压缩力,而交分量 i_q 361表示电动机的扭矩。P-I控制块350可以利用两个P-I控制器,用于直分量 i_d 360和交分量 i_q 361各一个。在操作中,P-I控制块350的一个P-I控制器确定用于控制信号 v_d 362的值,使得直分量 i_d 360被调节到期望值。这样,控制信号 v_d 362表示直分量 i_d 360到期望值的调节。在一个实施方案中,P-I控制块350使直分量 i_d 360最小化到基本上为零。P-I控制块350的另一个P-I控制器确定用于控制信号 v_q 363的值,使得交分量 i_q 361被调节到由用户输入134指示的电动机的期望的扭矩。这样,控制信号 v_q 363表示交分量 i_q 361到期望值的调节。

[0063] 参考系变压器352接收控制信号 v_d 362和控制信号 v_q 363并且输出控制信号 v_u 364、控制信号 v_v 365和控制信号 v_w 366。参考系变压器352将转子的旋转两轴参考系的控制信号 v_d 362和控制信号 v_q 363转变成电动机绕组的三轴参考系的对应的控制信号 v_u 364、控制信号 v_v 365和控制信号 v_w 366。在一个实施例中,参考系变压器352可以执行逆帕克变换,接着执行逆克拉克变换,以输出控制信号 v_u 364、控制信号 v_v 365和控制信号 v_w 366。然而,应理解,存在其他用于根据控制信号 v_d 362和控制信号 v_q 363确定对应的控制信号 v_u 364、控制信号 v_v 365和控制信号 v_w 366的技术。例如,也可以使用空间矢量调制。在一个实施例中,控制信号 v_u 364表示用以调节u分量 i_u 355的值(例如相电流 I_{PHASEU} 的大小),控制信号 v_v 365表示用以调节v分量 i_v 356的值(例如相电流 I_{PHASEV} 的大小),并且控制信号 v_w 366表示用以调节w分量 i_w 357的值(例如相电流 I_{PHASEW} 的大小)。应理解,类似于参考系变压器342,参考系变压器352执行从转子的旋转两轴参考系到定子的两轴参考系、接着到变换到电动机绕组的三轴参考系的两步变换。这样,参考系变压器352生成表示用以阿尔法分量 i_α 358调节到期望值的值的控制信号 v_α 380,以及表示用以将贝塔分量 i_β 359调节到期望值的值的控制信号 v_β 381。

[0064] 控制信号发生器354接收控制信号 v_u 364、 v_v 365和 v_w 366,并且作为响应,输出控制信号CTRLU 120、CTRLV 126和CTRLW 132到它们相应的半桥模块。例如,控制信号发生器354可以响应于控制信号 v_u 364而输出控制信号CTRLU 120,响应于控制信号 v_v 365而输出控制信号CTRLV 126,并且响应于控制信号 v_w 366而输出控制信号CTRLW 132。在操作中,控制信号发生器354可以执行脉冲宽度调制(PWM)以响应于控制信号 v_u 364、 v_v 365和 v_w 366而输出控制信号CTRLU 120、CTRLV 126和CTRLW 132。在一个实施例中,控制信号CTRLU 120、CTRLV 126和CTRLW 132是具有变化长度的高持续时间和低持续时间的矩形脉冲宽度波形。用于控制信号CTRLU 120、CTRLV 126和CTRLW 132的低值可以与接通相应的高侧开关和关断相应的低侧开关对应。用于控制信号CTRLU 120、CTRLV 126和CTRLW 132的高值可以与接通相应的低侧开关和关断相应的高侧开关对应,反之亦然。控制信号CTRLU 120、CTRLV 126和CTRLW 132的高部段的持续时间和低部段的持续时间可以是响应于接收到控制信号 v_u 364、 v_v 365和 v_w 366而被计算。

[0065] 在一个实施例中,系统控制器306A、相电流重构器340和定子电流角度估计器348可以由专用逻辑电路系统或执行计算机可执行指令的微控制器(诸如48MHz Cortex-M0微控制器)来实施。这些微控制器通常具有大约32-200kB闪存、大约8-16kB的RAM,其中处理速度是大约48MHz。例如,可以利用软件来对用于系统控制器306A的微控制器进行编程。

[0066] 图3B例示了根据本公开内容的教导的具有相电流重构器340的另一个示例系统控制器306B。系统控制器306B是系统控制器106的一个实施例,并且与系统控制器306A共享许

多类似之处,并且类似地命名和编号的元件如上文所描述的那样耦合和起作用。然而,至少一个不同是系统控制器306B实施伪场定向控制并且不存在用于参考系转变器342的静止到旋转变换。然而,应理解,相电流重构器340和定子电流角度估计器348如上文关于图3A所描述的那样耦合和起作用。

[0067] 参考系转变器342包括三相到两相变换器344(例如克拉克变换器344)。如所示出的,三相到两相变换器344接收表示重构的相电流大小的u分量 i_u 355、v分量 i_v 356和w分量 i_w 357,并且输出与定子的两轴参考系相关的阿尔法分量 i_α 358和贝塔分量 i_β 359。阿尔法分量 i_α 358和贝塔分量 i_β 359分别是定子电流矢量 $I_{a\beta}$ 在 α 轴和 β 轴上的投影的大小。定子电流角度估计器348接收阿尔法分量 i_α 358和贝塔分量 i_β 359并且输出估计的定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 338。

[0068] 在图3A中所示出的示例系统控制器306A中,P-I控制块350接收交分量 i_q 361和直分量 i_d 360。然而,对于在图3B中所示出的系统控制器306B,P-I控制块350接收转子角度 Θ_{rotor} 379。如上文所描述的,转子位置估计器378确定转子磁通矢量的角位置(例如转子角度 Θ_{rotor} 379)。在图3B中所示出的实施例中,P-I控制块350响应于用户输入134而确定控制信号 v_q 363,该控制信号表示对电动机的交分量的调节。表示对电动机的直分量的调节的控制信号 v_d 362基本上为零。P-I控制块350还响应于转子角度 Θ_{rotor} 379而估计和调节电动机的速度。

[0069] 图4例示了定子电流角度估计器448,该电流角度估计器是定子电流角度估计器348的一个实施例,并且应理解,类似地命名和编号的元件如上文所描述的那样耦合和起作用。定子电流角度估计器448被示出为包括乘法器467、乘法器468、算术运算器469、放大器 K_p 470、放大器 K_i 471、积分器472、算术运算器473、积分器475、余弦块476和正弦块477。

[0070] 定子电流角度估计器448接收定子电流矢量 $I_{a\beta}$ 的阿尔法分量 i_α 458和贝塔分量 i_β 459并且输出估计的定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 438。乘法器467被耦合以接收贝塔分量 i_β 459和估计的定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 438的余弦。乘法器467的输出基本上是贝塔分量 i_β 459和估计的定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 438的余弦的乘积,或在数学上是: $i_\beta \cos(\Theta_{a\beta})$ 。乘法器468被耦合以接收阿尔法分量 i_α 458和估计的定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 438的正弦,并且其输出基本上是阿尔法分量 i_α 458和估计的定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 438的正弦的乘积,或在数学上是: $i_\alpha \sin(\Theta_{a\beta})$ 。

[0071] 乘法器467的输出和乘法器468的输出在算术运算器469处被接收。如所示出的,算术运算器469执行减法并且输出乘法器467的输出与乘法器468的输出之差,或在数学上是: $i_\beta \cos(\Theta_{a\beta}) - i_\alpha \sin(\Theta_{a\beta})$ 。放大器470和471被耦合以接收算术运算器469的输出,并且将算术运算器469的输出分别按其增益 K_p 和 K_i 放大。积分器472接收放大器 K_i 的输出并且对该输出进行积分。

[0072] 算术运算器473被耦合以接收放大器470的输出和积分器472的输出。如所示出的,算术运算器473是加法器并且其输出是放大器470的输出与积分器472的输出之和。积分器475被耦合以接收算术运算器473的输出并且对该输出进行积分。积分器475的输出是估计的定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 438。余弦块476被耦合以接收估计的定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 438并且将定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 438的余弦输出到乘法器467。类似地,正弦块477被耦合以接收估计的定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 438并且将定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 438的正弦输出到乘法器468。

[0073] 图5例示了由系统控制器进行相电流重构的一种示例方法的流程图500。示例过程

可以由根据本说明书编程的相电流重构器(例如,图3A和图3B中所示出的相电流重构器)执行。应理解,u分量 i_u 、v分量 i_v 和w分量 i_w 分别表示对于相电流 I_{PHASEU} 、 I_{PHASEV} 和 I_{PHASEW} 的重构的相电流的大小。

[0074] 在块505处,相电流感测信号IPHU、IPHV、和IPHW被接收。过程进行到判定块510。在判定块510处,将相电流感测信号IPHU与阈值UMIN比较并且将相电流感测信号IPHV与阈值VMIN比较。如果相电流感测信号IPHU大于阈值UMIN并且相电流感测信号IPHV大于VMIN,过程进行到块513。在块513处,相电流的重构的大小——u分量 i_u 、v分量 i_v 和w分量 i_w ——可以根据相电流感测信号IPHU和IPHV被确定。在块513处,u分量 i_u 基本上是负的相电流感测信号IPHU的值($i_u = -\text{IPHU}$),v分量 i_v 基本上是负的相电流感测信号IPHV的值($i_v = -\text{IPHV}$),并且分量 i_w 基本上是相电流感测信号IPHU与相电流感测信号IPHV之和($i_w = \text{IPHU} + \text{IPHV}$)。然后,过程继续到块555并且确定的重构的相电流大小——u分量 i_u 、v分量 i_v 和w分量 i_w ——被输出。

[0075] 如果相电流感测信号IPHU或相电流感测信号IPHV中的任一个或二者小于它们相应的阈值UMIN或VMIN,过程进行到判定块515。在判定块515处,将相电流感测信号IPHU与阈值UMIN比较并且将相电流感测信号IPHW与阈值WMIN比较。如果相电流感测信号IPHU大于阈值UMIN并且相电流感测信号IPHW大于WMIN,过程进行到块518。在块518处,相电流的重构的大小——u分量 i_u 、v分量 i_v 和w分量 i_w ——可以根据相电流感测信号IPHU和IPHW被确定。在块518处,u分量 i_u 基本上是负的相电流感测信号IPHU的值($i_u = -\text{IPHU}$),w分量 i_w 基本上是负的相电流感测信号IPHW的值($i_w = -\text{IPHW}$),并且v分量 i_v 基本上是相电流感测信号IPHU与相电流感测信号IPHW之和($i_v = \text{IPHU} + \text{IPHW}$)。然后,过程继续到块555并且确定的重构的相电流大小——u分量 i_u 、v分量 i_v 和w分量 i_w ——被输出。

[0076] 如果相电流感测信号IPHU或相电流感测信号IPHW中的任一个或二者小于它们相应的阈值UMIN或WMIN,过程进行到判定块520。在判定块520处,将相电流感测信号IPHV与阈值VMIN比较并且将相电流感测信号IPHW与阈值WMIN比较。如果相电流感测信号IPHV大于阈值VMIN并且相电流感测信号IPHW大于WMIN,过程进行到块523。在块523处,相电流的重构的大小——u分量 i_u 、v分量 i_v 和w分量 i_w ——可以根据相电流感测信号IPHV和IPHW被确定。在块523处,v分量 i_v 基本上是负的相电流感测信号IPHV的值($i_v = -\text{IPHV}$),w分量 i_w 基本上是负的相电流感测信号IPHW的值($i_w = -\text{IPHW}$),并且u分量 i_u 基本上是相电流感测信号IPHV与相电流感测信号IPHW之和($i_u = \text{IPHV} + \text{IPHW}$)。然后,过程继续到块555并且确定的重构的相电流大小——u分量 i_u 、v分量 i_v 和w分量 i_w ——被输出。

[0077] 阈值UMIN、阈值VMIN和阈值WMIN是偏移阈值并且是被利用以检查相电流感测信号IPHU、IPHV和IPHW的存在的阈值。在一个实施方案中,即使当没有电流流过半桥模块的低侧功率开关时,相电流感测信号IPHU、IPHV和IPHW也具有最小恒定值。这样,阈值UMIN、VMIN和WMIN可以被选择以忽视最小恒定值。此外,阈值UMIN、VMIN和WMIN可以被用于噪声抑制。在一个实施例中,阈值UMIN、VMIN或WMIN的值是基本上相等的。

[0078] 如果相电流感测信号IPHV或相电流感测信号IPHW中的任一个或二者小于它们相应的阈值VMIN或WMIN,过程进行到判定块525。如果过程进行到判定块525,相电流感测信号IPHU、IPHV或IPHW中的一个大于它们相应的阈值UMIN、VMIN或WMIN,而其他两相电流感测信号小于它们相应的阈值UMIN、VMIN或WMIN。当相电流感测信号中的仅一个大于其相应的阈

值时,相电流重构器利用参考表和估计的定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 来重构相电流并且确定重构的相电流大小——u分量 i_u 、v分量 i_v 和w分量 i_w 。

[0079] 在判定块525处,确定对于电动机驱动系统启动操作是否完成。如果启动操作未完成,过程进行到块530并且相电流重构器接收转子角度 Θ_{rotor} 和预设偏移角度 Θ_{offset} 以确定定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 。在一个实施例中,定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 基本上是转子角度 Θ_{rotor} 与预设偏移角度 Θ_{offset} 之和,或在数学上是: $\Theta_{a\beta} = \Theta_{rotor} + \Theta_{offset}$ 。预设偏移角度 Θ_{offset} 可以是基本上九十度(90°)并且表示转子磁通矢量在定子电流矢量之后的角距离。根据转子角度 Θ_{rotor} 和预设偏移角度 Θ_{offset} 确定的定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 由相电流重构器利用以重构相电流大小——u分量 i_u 、v分量 i_v 和w分量 i_w 。如果启动操作完成,过程进行到块535并且相电流重构器接收来自定子电流角度估计器的估计的定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 。来自估计的定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 由相电流重构器利用以重构相电流大小——u分量 i_u 、v分量 i_v 和w分量 i_w 。

[0080] 从块530或块535,过程进行到块540。在块540处,相电流重构器确定相电流感测信号IPHU、IPHV或IPHW中的哪个是可用的。换句话说,相电流重构器确定相电流感测信号IPHU、IPHV和IPHW中的哪个大于其相应的阈值UMIN、VMIN和WMIN。对于相电流感测信号IPHU、IPHV或IPHW中的无论哪个被确定为存在,其对应的重构的相电流大小 i_u 、 i_v 或 i_w 基本上是负的可用的相电流信号的值。例如,如果相电流感测信号IPHU存在,其对应的u分量 i_u (例如重构的相电流大小)基本上是负的相电流感测信号IPHU,或在数学上是: $i_u = -IPHU$ 。如果相电流感测信号IPHV存在,其对应的v分量 i_v (例如重构的相电流大小)基本上是负的相电流感测信号IPHV,或在数学上是: $i_v = -IPHV$ 。如果相电流感测信号IPHW存在,其对应的w分量 i_w (例如重构的相电流大小)基本上是负的相电流感测信号IPHW,或在数学上是: $i_w = -IPHW$ 。一旦可用的相电流感测信号被确定并且对应的重构的相电流大小被确定,过程进行到块545。

[0081] 在块545处,选择适当的扇区。如上文关于图2A和图2B所提及的,三百六十度(360°)周期可以被分段成基本上六十度(60°)增量的六个扇区。响应于从块530或块535提供的确定的或估计的定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 的值而选择扇区。例如,等于八十五度(85°)的定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 将对应于扇区5。

[0082] 在一个实施例中,扇区0与从九十度(90°)到一百四十九度(149°)的定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 对应。扇区1与从一百五十度(150°)到二百零九度(209°)的定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 对应。扇区2与从二百一十度(210°)到二百六十九度(269°)的定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 对应。扇区3与从二百七十度(270°)到三百二十九度(329°)的定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 对应。扇区4与从三百三十度(330°)到三百五十九度(359°)以及从零度(0°)到二十九度(29°)的定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 对应。扇区5与从三十度(30°)到八十九度(89°)的定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 对应。

[0083] 一旦扇区已经被确定,扇区角度 Θ_{sector} 也就可以被确定。扇区角度 Θ_{sector} 与从逆时针方向在一个扇区中第一个出现的度数对应。如将进一步讨论的,定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 连同扇区角度 Θ_{sector} 一起被用来确定用于适当的参考表的索引 Θ_{index} 。索引 Θ_{index} 被用来确定参考表中表示重构缩放因子的哪个存储的值被用于适当的u/v/w分量。扇区和对应的扇区角度 Θ_{sector} 被示出在下文的表1中:

[0084]	定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$	扇区	扇区角度 Θ_{sector}
--------	--------------------------	----	------------------------

[0085]

90°-149°	扇区 0	90°
150°-209°	扇区 1	150°
210°-269°	扇区 2	210°
270°-329°	扇区 3	270°
330°-359°; 0°-29°	扇区 4	330°
30°-89°	扇区 5	30°

[0086] 表1对应的定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 、扇区以及扇区角度 Θ_{sector}

[0087] 一旦扇区已经被确定,就可以响应于扇区和扇区角度 Θ_{sector} 以及相电流感测信号IPHU、IPHV或IPHW中的哪个是可用的而选择适当的参考表。图6A和图7A例示了用于确定用于相电流重构的适当的参考表的实施例。应理解,由于相电流感测信号IPHU、IPHV或IPHW中的仅一个是可用的,因此两个参考表被选择用于不可用的其他两个电动机绕组。

[0088] 然后,过程进行到块550。定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 连同扇区角度 Θ_{sector} 一起被利用以确定用于适当的参考表的索引 Θ_{index} ,以确定表示用于重构的相电流大小——u分量 i_u 、v分量 i_v 和/或w分量 i_w ——的重构缩放因子的存储的值。如将讨论的,索引 Θ_{index} 是定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 与扇区角度 Θ_{sector} 之差,或在数学上是: $\Theta_{index} = \Theta_{a\beta} - \Theta_{sector}$ 。

[0089] 例如,如果相电流感测信号IPHU是可用的,参考表被选择以确定被利用以重构分别与相电流 I_{PHASEV} 和 I_{PHASEW} 对应的相电流大小——v分量 i_v 和w分量 i_w ——的缩放因子。响应于根据定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 确定的扇区而选择两个参考表。此外,如果定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 是八十五度(85°),扇区将是扇区5,扇区角度 Θ_{sector} 是三十度(30°)并且索引 Θ_{index} 是五十五度(55°)。这样,五十五度(55°)的索引 Θ_{index} 被利用以确定缩放因子在它们对应的参考表中的位置,以被用来重构相电流大小——v分量 i_v 和w分量 i_w 。

[0090] 一旦缩放因子被选择,过程就进行到块553,并且重构的相电流大小——u分量 i_u 、v分量 i_v 和w分量 i_w ——根据缩放因子和相电流感测信号IPHU、IPHV或IPHW中的哪个是可用的而被确定。应理解,对于其中对应的相电流感测信号不可用的重构的相电流大小,重构的相电流大小基本上是来自适当的参考表的选择的缩放因子和可用的相电流感测信号的乘积。例如,如果相电流感测信号IPHU是可用的并且相电流感测信号IPHV和IPHW不是可用的,重构的相电流大小——v分量 i_v 和w分量 i_w ——基本上是适当的缩放因子和相电流感测信号IPHU的乘积。例如,重构的相电流大小——v分量 i_v ——基本上是来自步骤550的选择的缩放因子和相电流感测信号IPHU的乘积。类似地,重构的相电流大小——w分量 i_w ——基本上是来自步骤550的选择的缩放因子和相电流感测信号IPHU的乘积。重构的相电流大小——u分量 i_u ——与负的相电流感测信号IPHU对应,或在数学上是: $i_u = -IPHU$ 。

[0091] 一旦重构的相电流大小——u分量 i_u 、v分量 i_v 和/或w分量 i_w ——被确定,过程就进行到块555,并且相电流重构器输出u分量 i_u 、v分量 i_v 和/或w分量 i_w 。应理解,u分量 i_u 表示相电流 I_{PHASEU} 的大小,v分量 i_v 表示相电流 I_{PHASEV} 的大小,并且w分量 i_w 表示相电流 I_{PHASEW} 的大小。

[0092] 图6A例示了表600,该表示出了用于响应于定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 和相电流感测信号IPHU、IPHV或IPHW中的哪个是可用的而选择重构参考表的一个示例过程。如上所提及的,扇区和扇区角度 Θ_{sector} 根据定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 被确定。一旦扇区被确定,就响应于电流感测信

号IPHU、IPHV、IPHW中的哪个是可用的而选择适当的参考表。换句话说,相电流重构器确定相电流感测信号IPHU、IPHV和IPHW中的哪个大于其相应的阈值UMIN、VMIN和WMIN。

[0093] 对于所示出的实施例,扇区0与从九十度(90°)到一百四十九度(149°)的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 对应。扇区1与从一百五十度(150°)到二百零九度(209°)的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 对应。扇区2与从二百一十度(210°)到二百六十九度(269°)的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 对应。扇区3与从二百七十度(270°)到三百二十九度(329°)的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 对应。扇区4与从三百三十度(330°)到三百五十九度(359°)以及从零度(0°)到二十九度(29°)的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 对应。扇区5与从三十度(30°)到八十九度(89°)的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 对应。

[0094] 参考第一行,该行对应于针对从九十度到一百四十九度(90°-149°)的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 的扇区0。如果对于0扇区相电流感测信号IPHU是可用的,参考表A被利用以确定用于w分量 i_w 的缩放因子以重构相电流 I_{PHASEW} 。如上文所提及的,w分量 i_w 表示相电流 I_{PHASEW} 128的大小并且基本上是从参考表A选择的缩放因子和相电流感测信号IPHU的乘积。此外,参考表B被利用以确定用于v分量 i_v 的缩放因子以重构相电流 I_{PHASEV} ,v分量 i_v 表示相电流 I_{PHASEV} 的大小并且基本上是从参考表B选择的缩放因子和相电流感测信号IPHU的乘积。

[0095] 如果对于扇区0相电流感测信号IPHW是可用的,参考表A' 被利用以确定用于u分量 i_u 的缩放因子以重构相电流 I_{PHASEU} ,u分量 i_u 表示相电流 I_{PHASEU} 的大小并且基本上是从参考表A' 选择的缩放因子和相电流感测信号IPHW的乘积。此外,参考表B' 被利用以确定用于v分量 i_v 的值以重构相电流 I_{PHASEV} ,v分量 i_v 表示相电流 I_{PHASEV} 的大小并且基本上是从参考表B' 选择的缩放因子和相电流感测信号IPHW的乘积。

[0096] 如图6A中所示出的,在一个实施方案中,相电流重构器利用三个参考表,即参考表A、B和C。这些参考表也可以被称为第一参考表(A)、第二参考表(B)和第三参考表(C)。表600还例示了参考表A'、B'和C'。这些参考表也可以被称为反向第一参考表(A')、反向第二参考表(B')和反向第三参考表(C')。参考表A'、B'和C'基本上与参考表A、B和C对应,然而,从参考表A、B和C反向地被索引。如上文所提及的,用于参考表的索引 Θ_{index} 基本上是定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 与扇区角度 Θ_{sector} 之差,或在数学上是: $\Theta_{index} = \Theta_{\alpha\beta} - \Theta_{sector}$ 。这样,索引 Θ_{index} 具有六十个值并且从0度到59度(0°-59°)变化。

[0097] 例如,表示用以重构相电流大小的缩放因子的预存储的值被存储在参考表A中、在对应于在零度(0°)处的索引 Θ_{index} 的位置处。相同的预存储的值被反向地存储在参考表A'中。例如,预存储的值被存储在参考表A'中、对应于在五十九度(59°)处的索引 Θ_{index} 的位置处。预存储的值被存储在参考表A中、在对应于在一度(1°)处的索引 Θ_{index} 的位置处。相同的预存储的值被存储在参考表A'中、在对应于在五十八度(58°)处的索引 Θ_{index} 的位置处,并且以此类推。对于参考表B与参考表B'以及参考表C与参考表C',此索引是类似的。

[0098] 如果对于扇区0相电流感测信号IPHV是可用的,参考表C被利用以确定u分量 i_u 的值以重构相电流 I_{PHASEU} ,u分量 i_u 表示相电流 I_{PHASEU} 的大小并且基本上是从参考表C选择的缩放因子和相电流感测信号IPHV的乘积。此外,参考表C' 被利用以确定用于w分量 i_w 的值以重构相电流 I_{PHASEW} ,w分量 i_w 表示相电流 I_{PHASEW} 的大小并且基本上是从参考表C' 选择的缩放因子和相电流感测信号IPHV的乘积。然而,600的这些部段被加灰色突出,因为通常在扇区0中,相电流感测信号IPHU和IPHW是可用的。

[0099] 参考表600的第二行,该行对应于针对从一百五十度到二百零九度(150°-209°)的

定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 的扇区1。如果对于1扇区相电流感测信号IPHU是可用的,参考表C被利用以确定用于w分量 i_w 的缩放因子,并且w分量 i_w 基本上是从参考表C选择的缩放因子和相电流感测信号IPHU的乘积。此外,参考表C' 被利用以确定用于v分量 i_v 的缩放因子,并且v分量 i_v 基本上是从参考表C' 选择的缩放因子和相电流感测信号IPHU的乘积。

[0100] 如果对于扇区1相电流感测信号IPHW是可用的,参考表B被利用以确定u分量 i_u 的缩放因子以重构相电流 I_{PHASEU} 。此外,参考表A被利用以确定用于v分量 i_v 的缩放因子以重构相电流 I_{PHASEV} 。如果对于扇区1相电流感测信号IPHV是可用的,参考表B' 被利用以确定u分量 i_u 的缩放因子并且参考表A' 被利用以确定用于w分量 i_w 的缩放因子。然而,600的这些部段被加灰色突出,因为通常在扇区1中,相电流感测信号IPHU是可用的。

[0101] 参考表600的第三行,该行对应于针对从二百一十度到二百六十九度(210° - 269°)的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 的扇区2。如果对于2扇区相电流感测信号IPHU是可用的,参考表B' 被利用以确定用于w分量 i_w 的缩放因子并且参考表A' 被利用以确定用于v分量 i_v 的缩放因子。w分量 i_w 基本上是从参考表B' 选择的缩放因子和相电流感测信号IPHU的乘积,并且v分量 i_v 基本上是从参考表A' 选择的缩放因子和相电流感测信号IPHU的乘积。如果对于扇区2相电流感测信号IPHV是可用的,参考表A被利用以确定u分量 i_u 的缩放因子并且参考表B被利用以确定用于w分量 i_w 的缩放因子。u分量 i_u 基本上是从参考表A选择的缩放因子和相电流感测信号IPHV的乘积,并且w分量 i_w 基本上是从参考表B选择的缩放因子和相电流感测信号IPHV的乘积。

[0102] 如果对于扇区2相电流感测信号IPHW是可用的,参考表C' 被利用以确定u分量 i_u 的缩放因子并且参考表C被利用以确定用于v分量 i_v 的缩放因子。然而,600的这些部段被加灰色突出,因为通常在扇区2中,相电流感测信号IPHU和IPHV是可用的。

[0103] 参考表600的第四行,该行对应于针对从二百七十度到三百二十九度(270° - 329°)的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 的扇区3。如果对于3扇区相电流感测信号IPHV是可用的,参考表C被利用以确定用于u分量 i_u 的值并且参考表C' 被利用以用于定w分量 i_w 的值。u分量 i_u 基本上是从参考表C选择的缩放因子和相电流感测信号IPHV的乘积,并且w分量 i_w 基本上是从参考表C' 选择的缩放因子和相电流感测信号IPHV的乘积。

[0104] 如果对于扇区3相电流感测信号IPHV是可用的,参考表A被利用以确定用于w分量 i_w 的缩放因子并且参考表B被利用以确定用于v分量 i_v 的缩放因子。如果对于扇区3相电流感测信号IPHW是可用的,参考表A' 被利用以确定u分量 i_u 的缩放因子并且参考表B' 被利用以确定用于v分量 i_v 的缩放因子。然而,600的这些部段被加灰色突出,因为通常在扇区3中,相电流感测信号IPHV是可用的。

[0105] 参考表600的第五行,该行对应于针对从三百三十度到三百五十九度以及从零度到二十九度(330° - 359° ; 0° - 29°)的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 的扇区4。如果对于4扇区相电流感测信号IPHW是可用的,参考表B被利用以确定u分量 i_u 的缩放因子并且参考表A被利用以确定用于v分量 i_v 的缩放因子。u分量 i_u 基本上是从参考表B选择的缩放因子和相电流感测信号IPHW的乘积,并且v分量 i_v 基本上是从参考表A选择的缩放因子和相电流感测信号IPHW的乘积。如果对于扇区4相电流感测信号IPHV是可用的,参考表B' 被利用以确定u分量 i_u 的缩放因子并且参考表A' 被利用以确定用于w分量 i_w 的缩放因子。u分量 i_u 基本上是从参考表B' 选择的缩放因子和相电流感测信号IPHV的乘积,并且w分量 i_w 基本上是从参考表A' 选择的缩

放因子和相电流感测信号 IPHV 的乘积。

[0106] 如果对于扇区4相电流感测信号 IPHU 是可用的,参考表C被利用以确定用于w分量 i_w 的缩放因子并且参考表C' 被利用以确定用于v分量 i_v 的缩放因子。然而,600的这些部段被加灰色突出,因为通常在扇区4中,相电流感测信号 IPHW 和 IPHV 是可用的。

[0107] 参考表600的第六行,该行对应于针对从三十度到八十九度 (30° - 89°) 的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 的扇区5。如果对于5扇区相电流感测信号 IPHW 是可用的,参考表C' 被利用以确定u分量 i_u 的缩放因子并且参考表C被利用以确定用于v分量 i_v 的缩放因子。u分量 i_u 基本上是从参考表C' 选择的缩放因子和相电流感测信号 IPHW 的乘积,并且v分量 i_v 基本上是从参考表C 选择的缩放因子和相电流感测信号 IPHW 的乘积。

[0108] 如果对于扇区5相电流感测信号 IPHU 是可用的,参考表B' 被利用以确定用于w分量 i_w 的缩放因子并且参考表A' 被利用以确定用于v分量 i_v 的缩放因子。如果对于扇区5相电流感测信号 IPHV 是可用的,参考表A被利用以确定u分量 i_u 的缩放因子并且参考表B被利用以确定用于w分量 i_w 的缩放因子。然而,600的这些部段被加灰色突出,因为通常在扇区5中,相电流感测信号 IPHW 是可用的。

[0109] 这样,响应于定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$,扇区和扇区角度 Θ_{sector} 可以被确定,并且适当的参考表和缩放因子响应于可用的相电流感测信号 IPHU、IPHV、IPHW 而被选择以重构不可用的其他相电流大小。

[0110] 图6B例示了另一个表601,该表示出了用于重构相电流的参考表A、B和C的内容。如上文所提及的,参考表利用索引 Θ_{index} 来指示参考表中的预存储的值的位。在一个实施例中,预存储的值表示被利用以重构相电流大小的缩放因子。此外,预存储的值也是基于索引 Θ_{index} 计算的。索引 Θ_{index} 基本上是定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 与扇区角度 Θ_{sector} 之差,或在数学上是: $\Theta_{\text{index}} = \Theta_{\alpha\beta} - \Theta_{\text{sector}}$ 。这样,索引 Θ_{index} 具有六十个值并且从0度到五十九度 (0° - 59°) 变化。

[0111] 参考表A、B和C中的每个存储对应于索引 Θ_{index} 的不同值的值。在一个实施例中,参考表A、B和C中的每个对于索引 Θ_{index} 的六十度以一度增量来存储值。对于参考表A,表示缩放因子的每个存储的值基本上等于索引 Θ_{index} 与一百二十度之和的正弦除以索引 Θ_{index} 的正弦,或在数学上是: $\frac{\sin(\Theta_{\text{index}}+120)}{\sin(\Theta_{\text{index}})}$ 。

[0112] 对于参考表B,表示缩放因子的每个存储的值基本上等于索引 Θ_{index} 与一百二十度之差的正弦除以索引 Θ_{index} 的正弦,或在数学上是: $\frac{\sin(\Theta_{\text{index}}-120)}{\sin(\Theta_{\text{index}})}$ 。

[0113] 对于参考表C,表示缩放因子的每个存储的值基本上等于索引 Θ_{index} 的正弦除以索引 Θ_{index} 与一百二十度之差的正弦,或在数学上是: $\frac{\sin(\Theta_{\text{index}})}{\sin(\Theta_{\text{index}}-120)}$ 。

[0114] 考表A'、B' 和C' 基本上与参考表A、B和C对应,然而,从参考表A、B和C反向地被索引。例如,预存储的值被存储在参考表A中、在对应于在零度 (0°) 处的索引 Θ_{index} 的位置处。相同的预存储的值被反向地存储在参考表A' 中。例如,预存储的值被存储在参考表A' 中、在对应于在五十九度 (59°) 处的索引 Θ_{index} 的位置处。预存储的值被存储在参考表A中、在对应于在一度 (1°) 处的索引 Θ_{index} 的位置处。相同的预存储的值被存储在参考表A' 中、在对应于

在五十八度(58°)处的索引 Θ_{index} 的位置处,并且以此类推。对于参考表B与参考表B'以及参考表C与参考表C',此索引是类似的。

[0115] 如前文所提及的,本公开内容的实施方案利用相电流感测信号IPHU、IPHV、IPHW,这与传统的相电流反馈相比便于部件计数、成本、功率损耗的总体减少。此外,利用参考表允许增加用于相电流重构的处理速度。

[0116] 图7A例示了表700,该表示出了用于响应于定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 和相电流感测信号IPHU、IPHV或IPHW中的哪个是可用的而选择重构参考表的另一个示例过程。在本公开内容的实施方案中,对于每个扇区,存在交叉并且基本上彼此相反的两个相电流,而另一个相电流具有相反的极性。例如,在扇区0,相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 和 $I_{\text{PHASEW}} 128$ 交叉并且相电流 $I_{\text{PHASEU}} 122$ 具有与相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 和 $I_{\text{PHASEW}} 128$ 相反的极性。在扇区1,相电流 $I_{\text{PHASEV}} 122$ 和 $I_{\text{PHASEW}} 128$ 交叉,而相电流 $I_{\text{PHASEU}} 116$ 具有与相电流 $I_{\text{PHASEV}} 122$ 和 $I_{\text{PHASEW}} 128$ 相反的极性。以此类推。此外,在“偶数”扇区(扇区0、2和4)中,交叉的相电流的极性是负的,并且在“奇数”扇区(扇区1、3和5)中,交叉的相电流的极性是正的。这样,另一个模式被识别,并且关于图6A和图6B所利用的三个参考表可以被简化为两个参考表——被称为参考表E和参考表D。

[0117] 如上文所提及的,扇区和扇区角度 Θ_{sector} 根据定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 被确定。一旦扇区被确定,就响应于相电流感测信号IPHU、IPHV、IPHW中的哪个是可用的而选择适当的参考表。换句话说,相电流重构器确定相电流感测信号IPHU、IPHV和IPHW中的哪个大于其相应的阈值UMIN、VMIN和WMIN。

[0118] 对于所示出的实施例,扇区0与从九十度(90°)到一百四十九度(149°)的定子电流角 $\Theta_{\alpha\beta}$ 对应。扇区1与从一百五十度(150°)到二百零九度(209°)的定子电流角 $\Theta_{\alpha\beta}$ 对应。扇区2与从二百一十度(210°)到二百六十九度(269°)的定子电流角 $\Theta_{\alpha\beta}$ 对应。扇区3与从二百七十度(270°)到三百二十九度(329°)的定子电流角 $\Theta_{\alpha\beta}$ 对应。扇区4与从三百三十度(330°)到三百五十九度(359°)以及从零度(0°)到二十九度(29°)的定子电流角 $\Theta_{\alpha\beta}$ 对应。扇区5与从三十度(30°)到八十九度(89°)的定子电流角 $\Theta_{\alpha\beta}$ 对应。

[0119] 参考第一行,该第一行对应于针对从九十度到一百四十九度(90°-149°)的定子电流角 $\Theta_{\alpha\beta}$ 的扇区0。扇区0是偶数数目,并且这样参考表E和E'被利用以重构相电流。如果对于扇区0相电流感测信号IPHU是可用的,参考表E'被利用以确定用于v分量 i_v 的缩放因子,并且v分量 i_v 基本上是来自参考表E'的缩放因子与相电流感测信号IPHU的乘积。如果对于扇区0相电流感测信号IPHW是可用的,参考表E被利用以确定用于v分量 i_v 的缩放因子,并且v分量 i_v 基本上是来自参考表E的缩放因子和相电流感测信号IPHW的乘积。

[0120] 图7A例示了参考表E、E'和参考表D、D'的选择。参考表E和D也可以被称为第一参考表(E)和第二参考表(D)。参考表E'和D'分别基本上与参考表E和D对应,然而,从参考表E和D反向地被索引。参考表E'和D'也可以被称为反向第一参考表(E')和反向第二参考表(D')。如上文所提及的,用于参考表的索引 Θ_{index} 基本上是定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 与扇区角度 Θ_{sector} 之差,或在数学上是: $\Theta_{\text{index}} = \Theta_{\alpha\beta} - \Theta_{\text{sector}}$ 。这样,在一个实施例中,索引 Θ_{index} 具有六十个值并且从0度到五十九度(0°-59°)变化。

[0121] 例如,表示缩放因子的预存储的值被存储在参考表E中、在对应于在零度(0°)处的索引 Θ_{index} 的位置处。相同的预存储的值被反向地存储在参考表E'中。例如,预存储的值被存储在参考表E'中、在对应于在五十九度(59°)处的索引 Θ_{index} 的位置处。预存储的值被存

储在参考表E中、在对应于在一度(1°)处的索引 Θ_{index} 的位置处。相同的预存储的值被存储在参考表E'中、在对应于在五十八度(58°)处的索引 Θ_{index} 的位置处,并且以此类推。对于参考表D与参考表D',此索引是类似的。

[0122] 参考表700的第二行,该行对应于针对从一百五十度到二百零九度(150° - 209°)的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 的扇区1。扇区1是奇数数目,并且这样参考表D和D'被利用以重构相电流。如果对于1扇区相电流感测信号IPHU是可用的,参考表D被利用以确定用于w分量 i_w 的缩放因子并且参考表D'被利用以确定用于v分量 i_v 的缩放因子。w分量 i_w 基本上是来自参考表D的缩放因子和相电流感测信号IPHU的乘积。v分量 i_v 基本上是来自参考表D'的缩放因子和相电流感测信号IPHU的乘积。

[0123] 参考表700的第三行,该行对应于针对从二百一十度到二百六十九度(210° - 269°)的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 的扇区2。扇区2是偶数数目,并且这样参考表E和E'被利用。如果对于2扇区相电流感测信号IPHU是可用的,参考表E被利用以确定用于w分量 i_w 的缩放因子。w分量 i_w 基本上是来自参考表E的缩放因子和相电流感测信号IPHU的乘积。如果对于扇区2相电流感测信号IPHV是可用的,参考表E'被利用以确定用于w分量 i_w 的缩放因子。w分量 i_w 基本上是来自参考表E'的缩放因子和相电流感测信号IPHV的乘积。

[0124] 参考表700的第四行,该行对应于针对从二百七十度到三百二十九度(270° - 329°)的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 的扇区3。扇区3是奇数数目,并且这样参考表D和D'被利用以重构相电流。如果对于3扇区相电流感测信号IPHV是可用的,参考表D被利用以确定u分量 i_u 的缩放因子并且参考表D'被利用以确定用于w分量 i_w 的缩放因子。u分量 i_u 基本上是来自参考表D的缩放因子和相电流感测信号IPHV的乘积。w分量 i_w 基本上是来自参考表D'的缩放因子和相电流感测信号IPHV的乘积。

[0125] 参考表700的第五行,该行对应于针对从三百三十度到三百五十九度以及从零度到二十九度(330° - 359° ; 0° - 29°)的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 的扇区4。扇区4是偶数数目,并且这样参考表E和E'被利用。如果对于扇区4相电流感测信号IPHW是可用的,参考表E'被利用以确定u分量 i_u 的缩放因子。u分量 i_u 基本上是来自参考表E'的缩放因子和相电流感测信号IPHW的乘积。如果对于扇区4相电流感测信号IPHV是可用的,参考表E被利用以确定u分量 i_u 的缩放因子。u分量 i_u 基本上是来自参考表E的缩放因子和相电流感测信号IPHV的乘积。

[0126] 参考表700的第六行,该行对应于针对从三十度到八十九度(30° - 89°)的定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$ 的扇区5。扇区5是奇数数目,并且这样参考表D和D'被利用以重构相电流。如果对于扇区5相电流感测信号IPHW是可用的,参考表D'被利用以确定u分量 i_u 的缩放因子并且参考表D被利用以确定用于v分量 i_v 的缩放因子。u分量 i_u 基本上是来自参考表D'的缩放因子和相电流感测信号IPHW的乘积。v分量 i_v 基本上是来自参考表D的缩放因子和相电流感测信号IPHW的乘积。

[0127] 这样,响应于定子电流角度 $\Theta_{\alpha\beta}$,扇区和扇区角度 Θ_{sector} 可以被确定,并且适当的参考表和缩放因子响应于相电流感测信号IPHU、IPHV、IPHW中的哪个是可用的而被选择以重构不可用的其他相电流大小。

[0128] 图7B例示了另一个表701,该表示出了用于重构相电流的参考表D和E的内容。如上文所提及的,参考表利用索引 Θ_{index} 来指示参考表中的预存储的的位置。此外,表示被利用以重构相电流大小的缩放因子的预存储的值也是基于索引 Θ_{index} 计算的。索引 Θ_{index} 基

本上是定子电流角度 $\Theta_{a\beta}$ 与扇区角度 Θ_{sector} 之差,或在数学上是: $\Theta_{index} = \Theta_{a\beta} - \Theta_{sector}$ 。这样,在一个实施例中,索引 Θ_{index} 具有六十个值并且从0度到五十九度(0° - 59°)变化。

[0129] 参考表E和E中的每个具有存储的六十个值,每个存储的值与索引 Θ_{index} 的六十个值中的一个对应。对于表E,表示缩放因子的每个存储的值基本上等于索引 Θ_{index} 与六十度之和的正弦除以六十度与索引 Θ_{index} 之差的正弦,或在数学上是: $\frac{\sin(\Theta_{index}+60)}{\sin(60-\Theta_{index})}$ 。

[0130] 对于参考表D,表示缩放因子的每个存储的值基本上等于索引 Θ_{index} 的正弦除以索引 Θ_{index} 与六十度之和的正弦,或在数学上是: $\frac{\sin(\Theta_{index})}{\sin(\Theta_{index}+60)}$ 。

[0131] 如先前所提及的,本公开内容的实施方案利用相电流感测信号IPHU、IPHV、IPHW,这与传统的相电流反馈相比便于部件计数、成本、功率损耗的总体减少。此外,利用参考表允许增加用于相电流重构的处理速度

[0132] 对本发明的所例示的实施例的以上描述,包括摘要中所描述的内容,并非意在是穷举的或是对所公开的确切形式的限制。虽然出于例示性目的在本文中描述了本发明的具体实施方案和实施例,但是在不脱离本发明的更广泛的精神和范围的情况下,各种等同改型是可能的。实际上,应理解,提供具体示例电压、电流、频率、功率范围值、时间等是用于解释的目的,并且根据本发明的教导在其他实施方案和实施例中,也可以采用其他值。

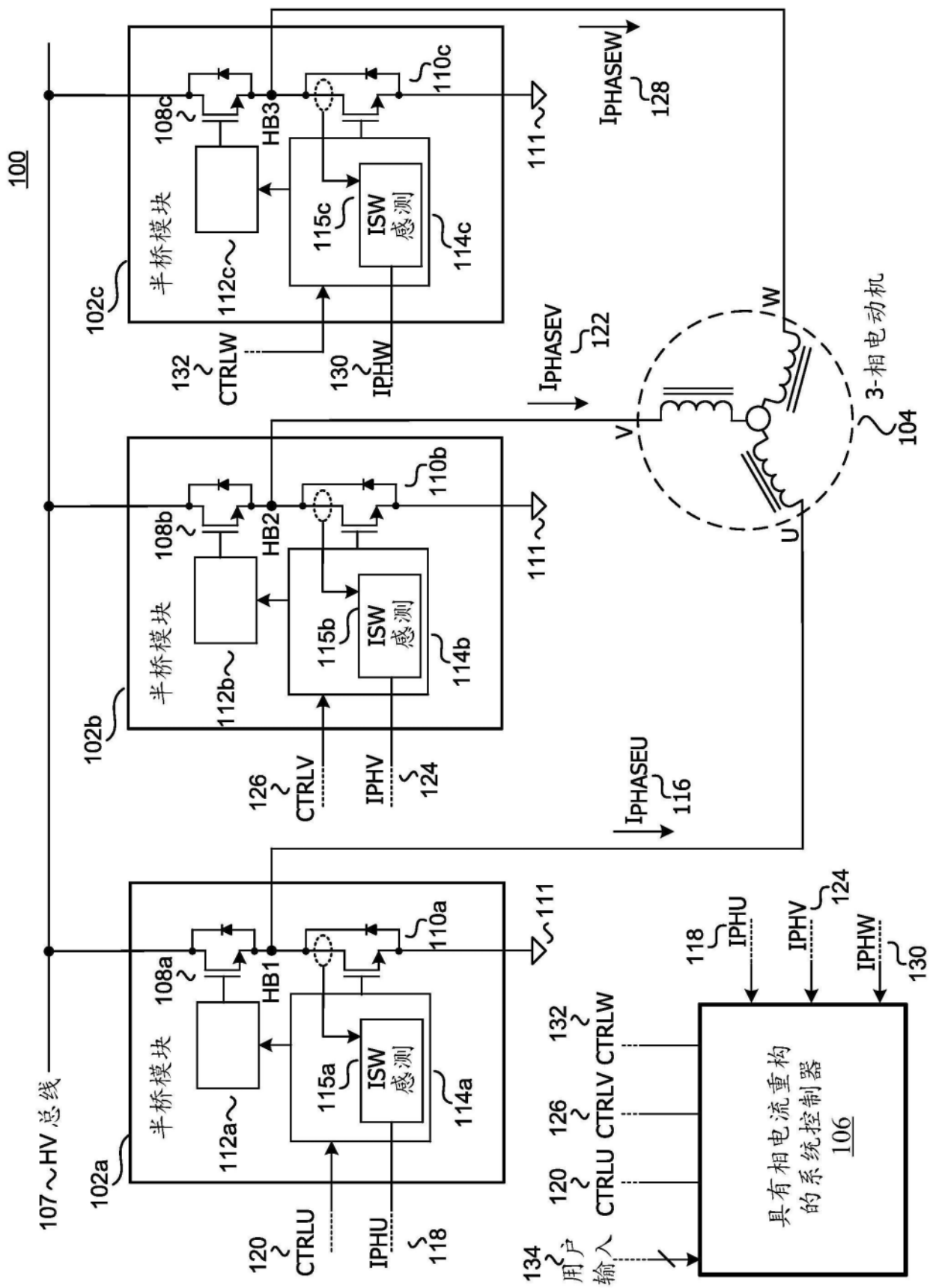


图1A

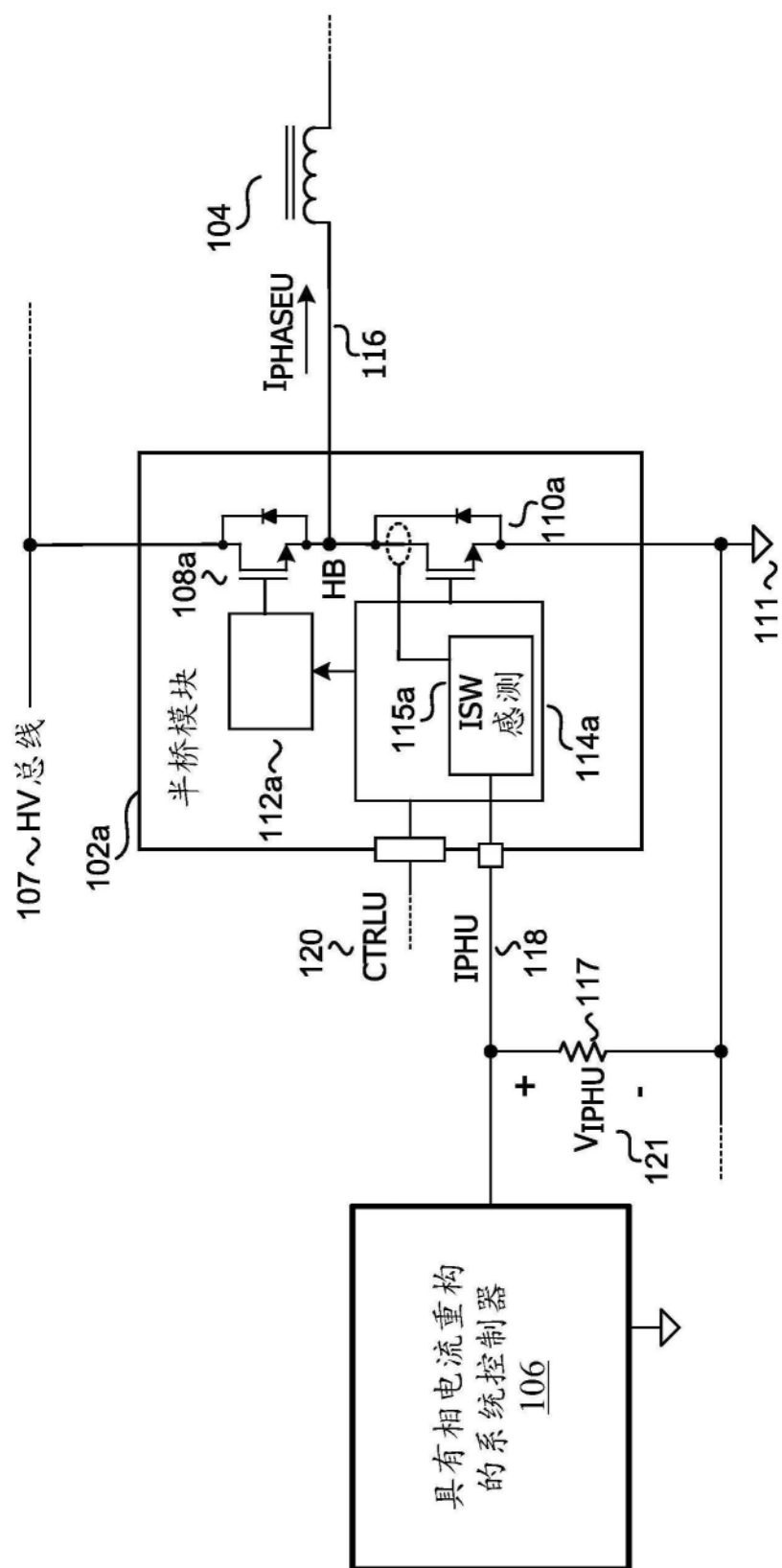


图1B

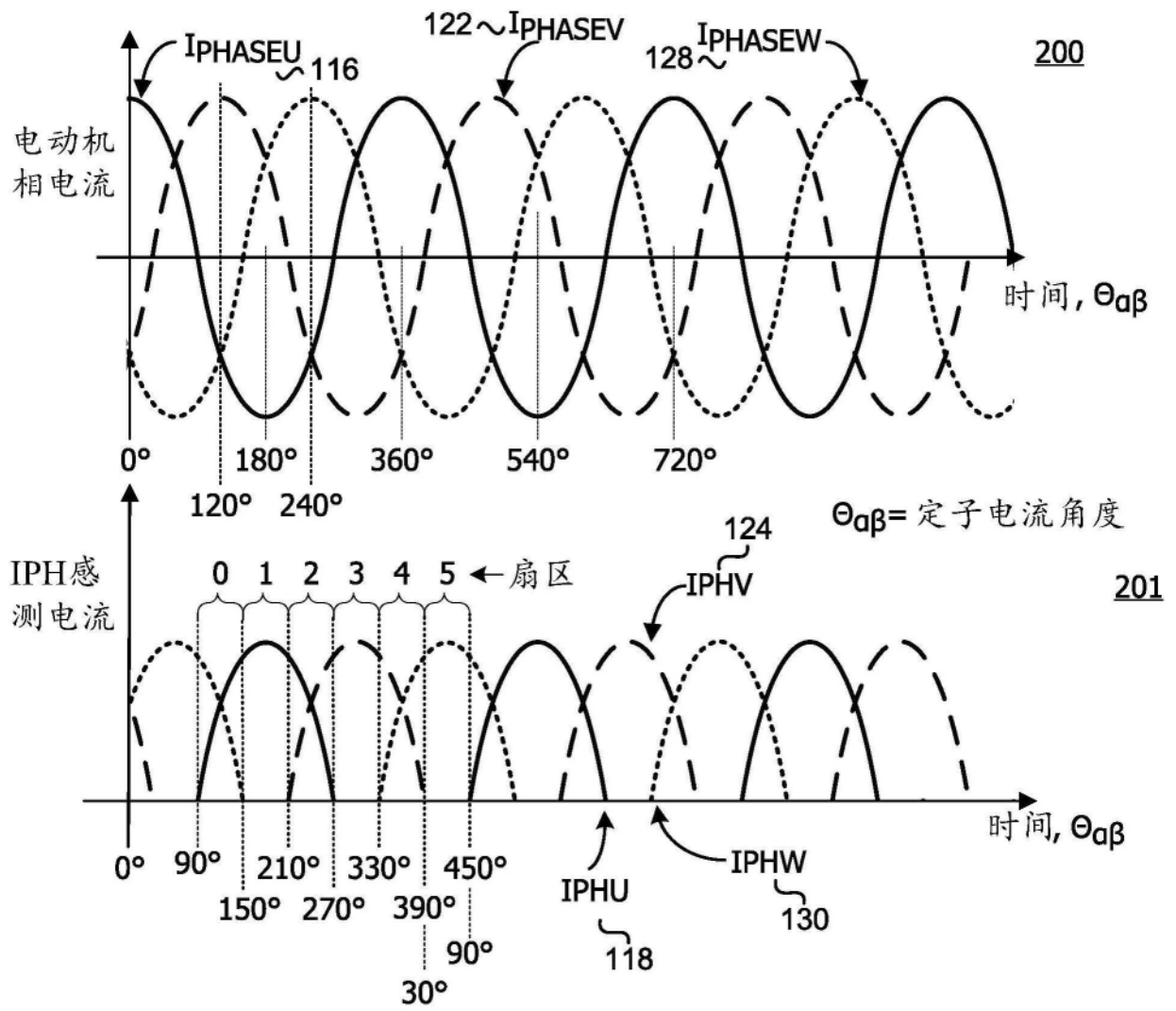


图2A

203

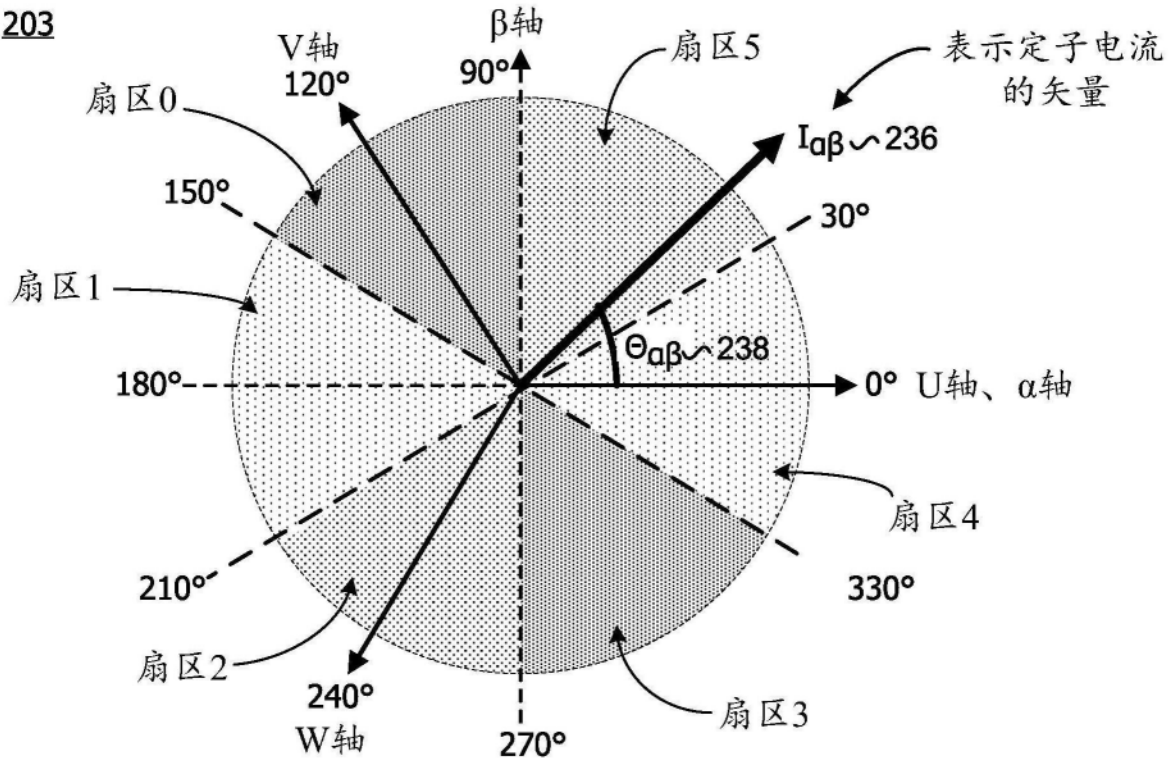


图2B

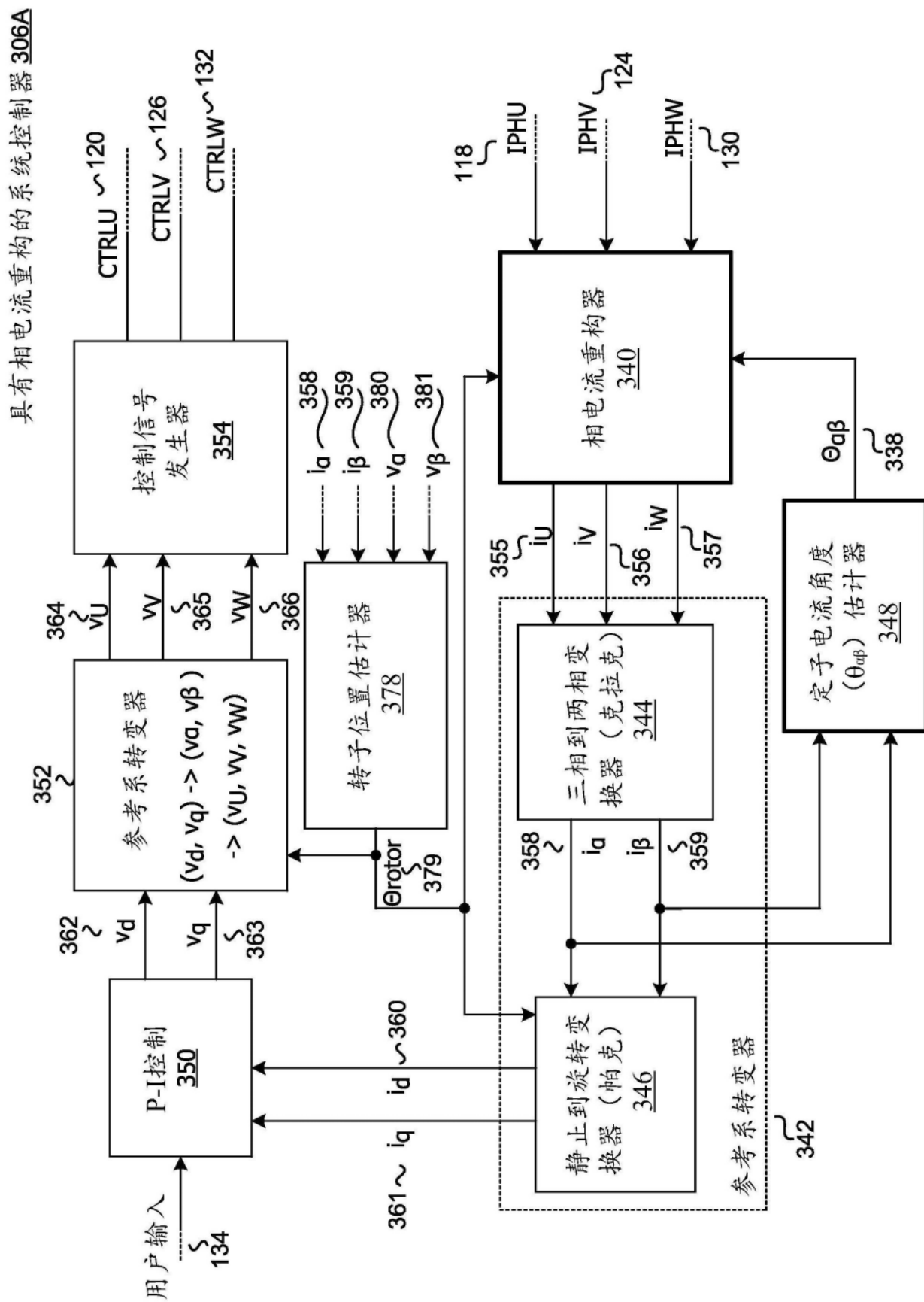


图3A

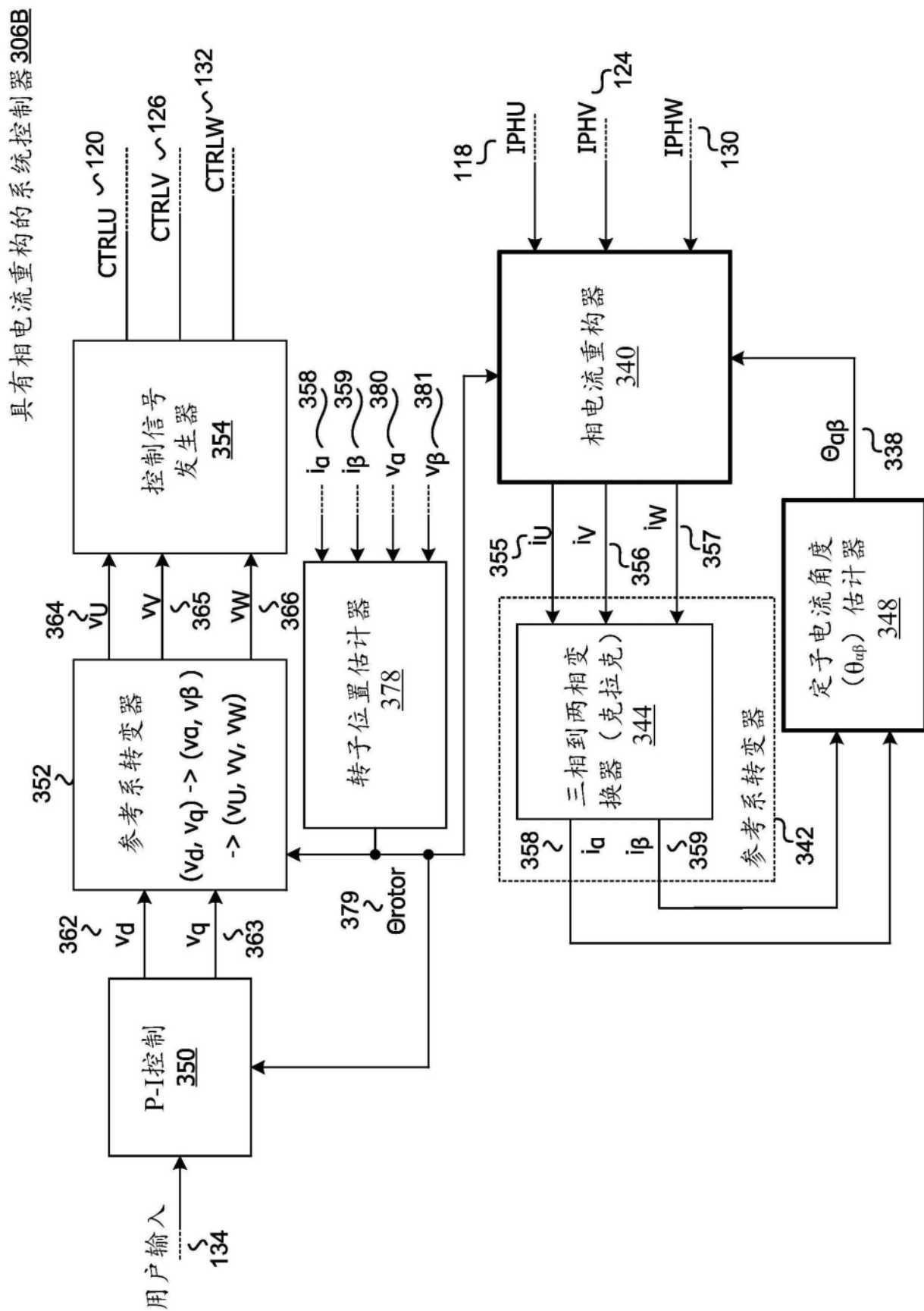


图3B

定子电流角度估计器 448

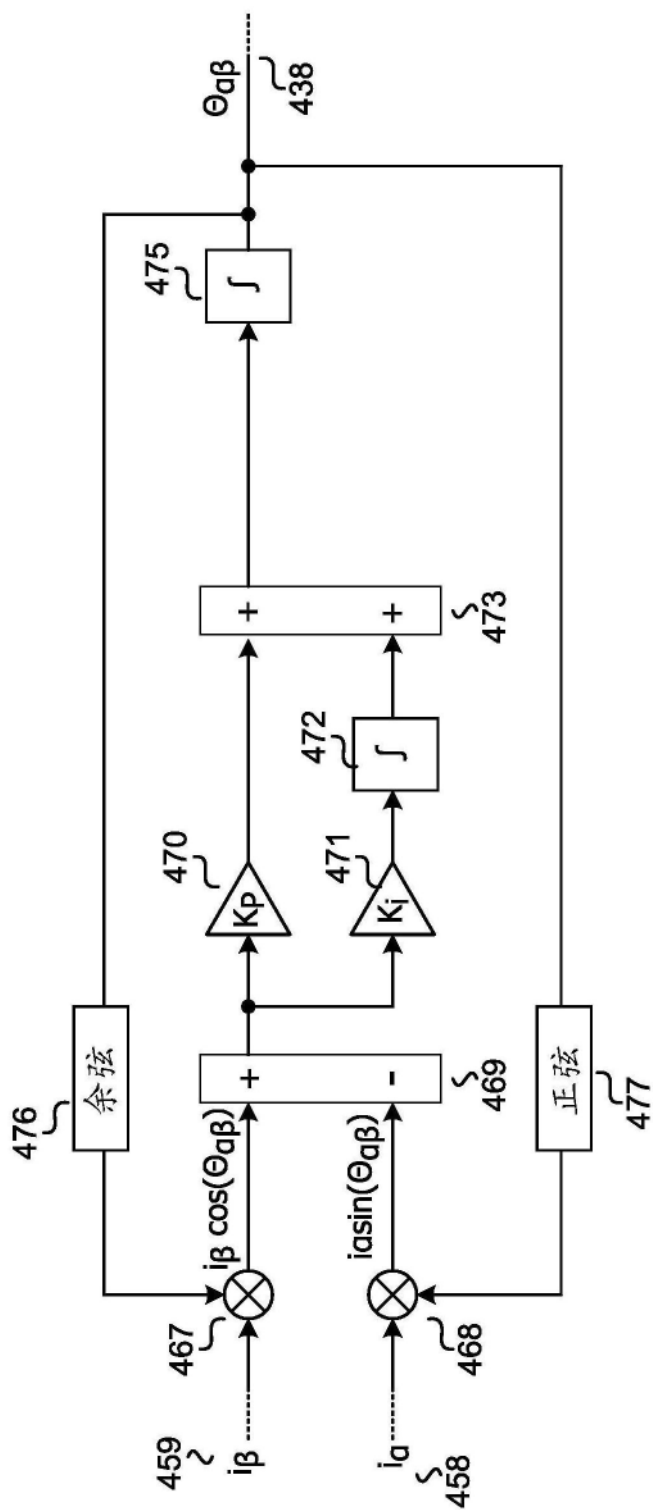


图4

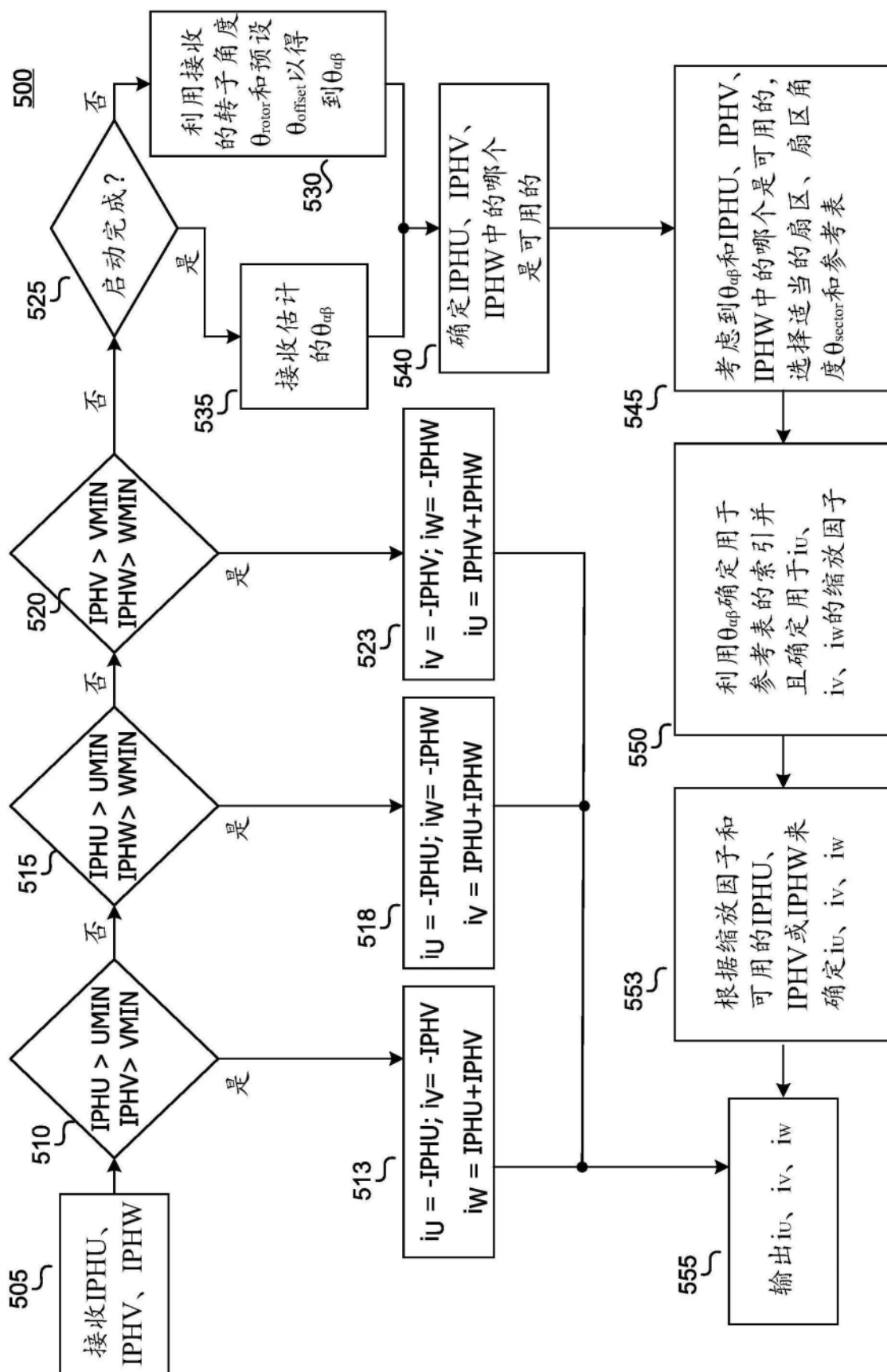


图5

600

角度 $\Theta_{q\beta}$	扇区	Θ_{sector}	iW 给定 IPHU	iV 给定 IPHU	iU 给定 IPHW	iV 给定 IPHW	iU 给定 IPHV	iW 给定 IPHV
90-149	0	90	A	B	A'	B'	C	C'
150-209	1	150	C	C'	B	A	B'	A'
210-269	2	210	B'	A'	C'	C	A	B
270-329	3	270	A	B	A'	B'	C	C'
330-359; 0-29	4	330	C	C'	B	A	B'	A'
30-89	5	30	B'	A'	C'	C	A	B

图6A

601

表	内容
A	$\text{SIN}(\Theta_{\text{index}} + 120)/\text{SIN}(\Theta_{\text{index}}); \Theta_{\text{index}}=0-59$
B	$\text{SIN}(\Theta_{\text{index}} - 120)/\text{SIN}(\Theta_{\text{index}}); \Theta_{\text{index}}=0-59$
C	$\text{SIN}(\Theta_{\text{index}})/\text{SIN}(\Theta_{\text{index}} - 120); \Theta_{\text{index}}= 0-59$

$$\Theta_{\text{index}}=\Theta_{\text{a}\beta} - \Theta_{\text{sector}}$$

图6B

700

角度 $\Theta_{q\beta}$	扇区	Θ_{sector}	iW 给定 IPHU	iV 给定 IPHU	iU 给定 IPHW	iV 给定 IPHW	iU 给定 IPHV	iW 给定 IPHV
90-149	0	90		E'		E		
150-209	1	150	D	D'				
210-269	2	210	E					E'
270-329	3	270					D	D'
330-359; 0-29	4	330			E'		E	
30-89	5	30			D'	D		

图7A

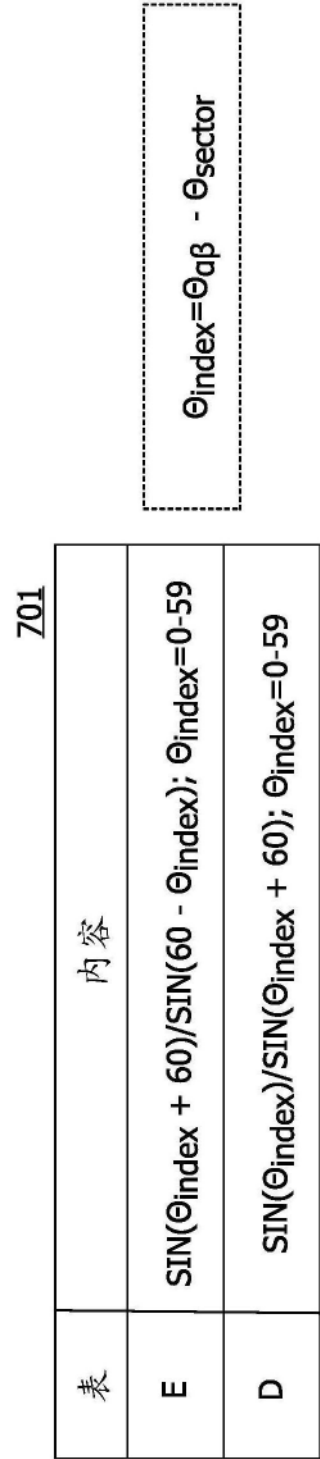


图7B