



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108112280 A

(43)申请公布日 2018.06.01

(21)申请号 201580083165.2

(74)专利代理机构 北京邦信阳专利商标代理有限公司 11012

(22)申请日 2015.12.17

代理人 刘金峰

(30)优先权数据

14/859,174 2015.09.18 US

(51)Int.Cl.

H02P 21/12(2016.01)

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2018.03.16

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/US2015/066415 2015.12.17

(87)PCT国际申请的公布数据

W02017/048310 EN 2017.03.23

(71)申请人 法拉第未来公司

地址 美国加利福尼亚州

(72)发明人 梦薇·李·坎贝尔 S·E·舒尔茨

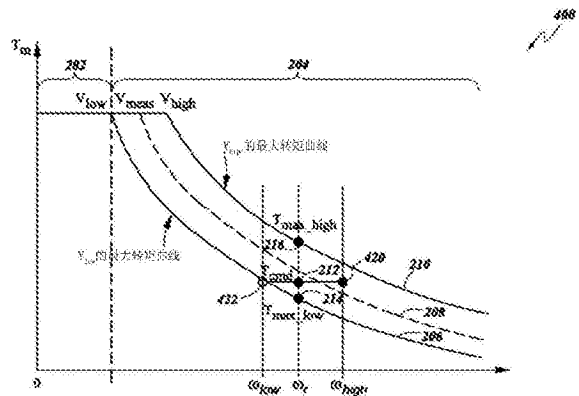
权利要求书3页 说明书15页 附图9页

(54)发明名称

用于产生内置式永磁体(IPM)电动机的当前指令的方法和装置

(57)摘要

一方面,一种装置包含电动机和逆变器,逆变器构成为向电动机提供输入电源。所述装置也可以包含数据存储,该数据存储包括包含第一转矩指令、第一电动机速度和第一DC电压值的至少一个条目,其中第一转矩指令和第一电动机速度以及第一DC电压值与第一电流输出和处理器相关联。处理器接收转矩输入、DC电压输入和电动机速度输入,并基于与电动机速度输入不同的另一电动机速度和与DC电压输入和电动机速度输入不同的另一DC电压来识别与转矩输入、DC电压输入和电动机速度输入相关联的电流输出,并输出确定的电流输出使逆变器向电动机提供输入功率。



1. 一种装置,包括:  
电动机;  
逆变器,其构成为向电动机提供输入电源;  
DC电源总线,其构成为向所述逆变器提供输入电源;  
包括定义逆变器电流的信息的数据存储器,用于在不同的电动机速度和不同的DC电源总线电压下产生不同的电动机转矩输出;以及  
处理器,构成为:  
接收转矩指令、DC电源总线电压测量值和电动机速度测量值;  
使用数据存储器至少部分地基于转矩指令、DC电源总线电压测量值和电动机速度测量值来确定逆变器电流指令,其中所述确定进一步至少部分地基于不同于所述电动机速度测量值的电动机速度值和不同于所述DC电源总线电压测量值的DC电源总线电压值;以及  
至少部分地基于确定的逆变器电流指令来控制所述逆变器。
2. 根据权利要求1所述的装置,其中,处理器还构成为使用所述转矩指令、所述DC电源总线电压值和所述电动机速度值来识别与所述数据存储器中相关联的所述数据存储器中的预先存储的逆变器电流指令。
3. 根据权利要求1所述的装置,其中,所述电动机速度值大于所述电动机速度测量值。
4. 根据权利要求1所述的装置,其中,所述电动机速度值小于所述电动机速度测量值。
5. 根据权利要求1所述的装置,其中,所述电动机速度值至少部分地通过按照DC电源总线电压值和DC电源总线电压测量值的比例来缩放电动机速度测量值来确定。
6. 根据权利要求1所述的装置,其中,在所述数据存储器中的信息在逻辑上被排列为一个或多个查找表中的多个条目,其中所述一个或多个查找表中的每个查找表包括由转矩指令和电动机速度索引的逆变器电流指令,并且其中,所述一个或多个查找表的每个查找表与所选DC电源总线电压相关联。
7. 根据权利要求6所述的装置,其中,所述一个或多个查找表包括对应于第一DC电源总线电压的第一查找表,并且其中所述DC电源总线电压测量值小于对应于所述第一查找表的所述第一DC电源总线电压。
8. 根据权利要求7所述的装置,其中,所述第一查找表是所述数据存储器中唯一的查找表。
9. 根据权利要求6所述的装置,其中,所述一个或多个查找表包括对应于第一DC电源总线电压的第一查找表,并且其中所述DC电源总线电压测量值高于对应于所述第一查找表的所述第一DC电源总线电压。
10. 根据权利要求9所述的装置,其中,所述电动机速度值小于所述电动机速度测量值,其中所述DC电源总线电压值等于对应于所述第一查找表的所述第一DC电源总线电压,并且其中,所述逆变器电流指令是所述第一查找表中的条目。
11. 根据权利要求10所述的装置,其中,所述第一查找表是所述数据存储器中唯一的查找表。
12. 根据权利要求1所述的装置,其中,所述逆变器电流指令包括第一分量和第二分量。
13. 根据权利要求1所述的装置,其中,所述接收的转矩指令、DC电源总线电压测量值和电动机速度测量值对应于所述电动机的弱磁区。

14. 根据权利要求1所述的装置,其中,所述接收的转矩指令、DC电源总线电压测量值和电动机速度测量值对应于所述电动机的恒定转矩区域。

15. 根据权利要求1所述的装置,其中,所述逆变器电流指令被修改以计算参考电压。

16. 一种根据转矩指令控制电动机转矩输出的方法,所述方法包括:

存储定义逆变器电流的信息,该信息用于在数据存储器中以不同的电动机速度和DC电源总线电压产生不同的电动机转矩输出;

接收转矩指令、DC电源总线电压测量值和电动机速度测量值;

使用存储的信息至少部分地基于转矩指令、DC电源总线电压测量值和电动机速度测量值来确定逆变器电流指令,其中所述确定还至少部分地基于不同于所述电动机速度测量值的电动机速度值和不同于所述DC电源总线电压测量值的DC电源总线电压值,

至少部分地基于确定的逆变器电流指令来控制逆变器。

17. 根据权利要求16所述的方法,还包括:通过所述转矩指令、所述DC电源总线电压值和所述电动机速度值识别所述数据存储器中与数据存储器相关联的预存储的逆变器电流指令。

18. 根据权利要求16所述的方法,其中,所述电动机速度值大于所述电动机速度测量值。

19. 根据权利要求16所述的方法,其中,所述电动机速度值小于所述电动机速度测量值。

20. 根据权利要求16所述的方法,其中,所述电动机速度值至少部分地通过利用所述DC电源总线电压值与所述DC电源总线电压测量值的比率缩放所述电动机速度测量值来确定。

21. 根据权利要求16所述的方法,其中,在所述数据存储器中的信息在逻辑上被排列为一个或多个查找表中的多个条目,其中所述一个或多个查找表中的每个查找表包括由转矩指令和电动机速度索引的逆变器电流指令,并且其中,所述一个或多个查找表中的每个查找表与所选择的DC电源总线电压相关联。

22. 根据权利要求21所述的方法,其中,所述一个或多个查找表包括对应于第一DC电源总线电压的第一查找表,并且其中,所述DC电源总线电压测量值小于对应于所述第一查找表的所述第一DC电源总线电压。

23. 根据权利要求22所述的方法,其中,所述第一查找表是所述数据存储器中唯一的查找表。

24. 根据权利要求21所述的方法,其中,所述一个或多个查找表包括对应于第一DC电源总线电压的第一查找表,并且其中,所述DC电源总线电压测量值高于对应于所述第一查找表的所述第一DC电源总线电压。

25. 根据权利要求24所述的方法,其中,所述电动机速度值低于所述电动机速度测量值,其中,所述DC电源总线电压值等于对应于所述第一查找表的所述第一DC电源总线电压,并且其中所述逆变器电流指令是所述第一查找表中的条目。

26. 根据权利要求25所述的方法,其中,所述第一查找表是所述数据存储器中唯一的查找表。

27. 根据权利要求16所述的方法,其中,所述逆变器电流指令包括第一分量和第二分量。

28. 根据权利要求16所述的方法,其中,所述接收的转矩指令、DC电源总线电压测量值和电动机速度测量值对应于电动机的弱磁区域。

29. 根据权利要求16所述的方法,其中,所述接收的转矩指令、DC电源总线电压测量值和电动机速度测量值对应于所述电动机的恒定转矩区域。

30. 根据权利要求16所述的方法,其中,所述逆变器电流指令被修改以产生参考电压。

31. 一种用于根据转矩指令来控制电动机的转矩输出的装置,所述装置包括:

用于驱动的设备;

用于向所述驱动设备提供电源的设备;

用于向电源提供设备提供输入电源的设备;

用于存储限定逆变器电流的信息的设备,用于在不同的电动机速度和DC电源总线电压下产生不同的电动机转矩输出;

用于接收转矩指令、DC电源总线电压测量值和电动机速度测量值的设备;

用于使用所存储的信息至少部分地基于所述转矩指令、所述DC电源总线电压测量值和所述电动机速度测量值来确定逆变器电流指令的设备,其中所述确定还至少部分地基于不同于所述电动机速度测量值的电动机速度值和不同于所述DC电源总线电压测量值的DC电源总线电压值;以及

用于至少部分地基于所确定的逆变器电流指令来控制所述存储设备的设备。

## 用于产生内置式永磁体 (IPM) 电动机的当前指令的方法和装置

### 技术领域

[0001] 本公开涉及驱动电动机的方法、系统和装置,并且更具体地涉及用于基于减少的查找表数量在电动机的磁场弱化区域中操作时精确地产生电流输出指令的方法。

### 背景技术

[0002] 电动机控制系统通常涉及用于给定输入信号以及基于输入信号来选择相应的输出指令或值的多个数据点的生成和存储。在一些实施例中,数据点能够被存储在数据存储器中,其能够在概念上形成为一个或多个查找表,每个查找表对应于输入(诸如从电池)至逆变器的特定的DC输入电压,所述逆变器产生输入至电动机的三相AC电压。在一些实施方式中,查找表能够针对DC逆变器输入电压在电动机使用期间可能遇到的DC逆变器输入的电压范围的给定增量而存在。每个查找表能够用控制逆变器的输出电流指令的二维阵列填充。沿着每个查找表的一个轴是转矩指令值(例如由电动机的用户指定的期望转矩),而沿着每个查找表的另一个轴是电动机速度输入(例如在接收转矩指令时存在的电动机的转速)。因此,输出电流指令能够对应于必要的指令电流,以便在给定特定的现有电动机速度输入和DC逆变器输入电压的情况下产生转矩指令。

[0003] 填充每个查找表的输出电流指令能够对应于电压输入、电动机速度输入和转矩指令输入的特定值。例如,在50V,5000RPM的电动机速度输入和100Nm的转矩指令输入能够产生电流P1,而如果逆变器输入是100V,则相同的电动机速度和转矩指令输入能够产生电流P2,其中电流P1和P2是不同的。存在的查找表越多(例如具有相关联的查找表的电压越多),输出电流指令能够更精确或更精细。如果DC逆变器输入电压是介于查找表可用的两个电压之间的电压,则能够使用线性插值过程来产生电流指令输出,该电流指令输出也适当地在与实际DC逆变器输入电压相邻的较高和较低DC输入电压表中的两个查找表项之间。

[0004] 然而,这种线性插值过程可能无法在高电动机速度和/或高转矩指令输入的情况下精确地执行给定的存储器中的查找表。此外,创建这些查找表需要大量时间和精力,因为它们是基于电动机测试期间进行的实验测量值。

### 发明内容

[0005] 本公开的系统、方法和装置各自具有若干创新性方面,其中没有一个单独负责本文所公开的期望属性。

[0006] 本公开中描述的主题的一个创新方面可以在装置中实现。该装置包括电动机,逆变器,其构成为向所述电动机提供输入电源;以及DC电源总线,其构成为向所述逆变器提供输入功率。所述装置还包括数据存储器,其包括定义逆变器电流的信息,用于在不同的电动机速度和不同的DC电源总线电压下产生不同的电动机转矩输出。所述装置还包括处理器。处理器构成为接收转矩指令、DC电源总线电压测量值和电动机速度测量值。处理器还构成为使用数据存储器至少部分地基于转矩指令、DC电源总线电压测量值和电动机速度测量值

来确定逆变器电流指令,其中所述确定进一步至少部分地基于不同于所述电动机速度测量值的电动机速度值和不同于所述DC电源总线电压测量值的DC电源总线电压值。处理器还进一步构成为至少部分地基于确定的逆变器电流指令来控制所述逆变器。

[0007] 本公开中描述的主题内容的另一创新方面也可以在根据转矩指令控制电动机输出的转矩的方法中实现。所述方法包括存储定义逆变器电流的信息,该信息用于在数据存储设备中以不同的电动机速度和DC电源总线电压产生不同的电动机转矩输出。所述方法还包括接收转矩指令、DC电源总线电压测量值和电动机速度测量值。所述方法还包括使用存储的信息至少部分地基于转矩指令、DC电源总线电压测量值和电动机速度测量值来确定逆变器电流指令,其中所述确定步骤还至少部分地基于不同于所述电动机速度测量值的电动机速度值和不同于所述DC电源总线电压测量值的DC电源总线电压值。所述方法还进一步包括至少部分地基于确定的逆变器电流指令来控制逆变器。

[0008] 在本公开中描述的主题的另一创新方面也可以在一种装置中实现。一种用于根据转矩指令来控制电动机的转矩输出的装置。所述装置包括用于驱动的设备,用于向所述驱动设备提供电源的设备,以及用于向电源提供设备提供输入电源的设备。所述装置还包括用于存储限定逆变器电流的信息的设备,用于在不同的电动机速度和DC电源总线电压下产生不同的电动机转矩输出;用于接收转矩指令、DC电源总线电压测量值和电动机速度测量值的设备。所述装置还包括用于使用所存储的信息至少部分地基于所述转矩指令、所述DC电源总线电压测量值和所述电动机速度测量值来确定逆变器电流指令的设备,其中所述确定还至少部分地基于不同于所述电动机速度测量值的电动机速度值和不同于所述DC电源总线电压测量值的DC电源总线电压值。所述装置还进一步包括用于至少部分地基于所确定的逆变器电流指令来控制所述存储设备的设备。

[0009] 一些方面还包括用于通过转矩指令、DC电源总线电压值和电动机速度值识别存储设备中与存储设备相关联的预存储的逆变器电流指令的设备。在一些方面,所述电动机速度值大于所述电动机速度测量值。在一些方面,所述电动机速度值小于所述电动机速度测量值。

[0010] 在一些方面,所述电动机速度值至少部分地通过将所述电动机速度测量值缩放所述DC电源总线电压值与所述DC电源总线电压测量值的比率来确定。在一些方面,在存储设备中的信息在逻辑上被排列为一个或多个查找表中的多个条目,其中所述一个或多个查找表的每个查找表包括由转矩指令和电动机速度索引的逆变器电流指令,并且其中,所述一个或多个查找表中的每个查找表与所选择的DC电源总线电压相关联。

[0011] 在一些方面,所述一个或多个查找表包括对应于第一DC电源总线电压的第一查找表,并且其中,所述DC电源总线电压测量值小于对应于所述第一查找表的所述第一DC电源总线电压。在一些方面,所述第一查找表是所述存储设备中的第一查找表。

[0012] 在一些方面,所述一个或多个查找表包括对应于第一DC电源总线电压的第一查找表,并且其中,所述DC电源总线电压测量值高于对应于所述第一查找表的所述第一DC电源总线电压。

[0013] 在一些方面,所述电动机速度值低于所述电动机速度测量值,其中,所述DC电源总线电压值等于对应于所述第一查找表的所述第一DC电源总线电压,并且其中所述逆变器电流指令是所述第一查找表中的条目。在一些方面,所述第一查找表是所述存储设备中唯一

的查找表。在一些方面,所述逆变器电流指令包括第一分量和第二分量。

[0014] 在一些方面,所述接收的转矩指令、DC电源总线电压测量值和电动机速度测量值对应于所述驱动设备的弱磁区域。在一些方面,所述接收的转矩指令、DC电源总线电压测量值和电动机速度测量值对应于所述电动机的恒定转矩区域。在一些方面,所述逆变器电流指令被修改以产生参考电压。

### 附图说明

[0015] 现在将参照附图结合各种实现来描述本技术的上述方面以及其他特征,方面和优点。然而,所示出的实验方法仅仅是示例,并非旨在限制。在整个附图中,除非上下文另有规定,否则相似的附图标记通常标识相似的分量。请注意,下图的相对尺寸可能不是按比例绘制的。

[0016] 图1示出了例如用于内置式永磁体(IPM)电动机驱动系统中的示例性电动机驱动控制系统的框图。

[0017] 图2a示出了包括IPM电动机驱动系统在包括恒定转矩和弱磁区域的多个电压下的电动机转矩曲线的图表。

[0018] 图2b示出了大致对应于图2a的 $V_{low}$ 电动机转矩曲线的输出电流指令值的第一查找表( $V_{low}$ )。

[0019] 图2c示出了大致对应于图2a的 $V_{high}$ 电动机转矩曲线的输出电流指令值的第二查找表( $V_{high}$ )。

[0020] 图3示出了包括恒定转矩曲线、IPM电动机驱动系统的电流约束以及IPM电动机驱动系统的电压约束的图表。

[0021] 图4a示出了包括IPM电动机驱动系统在多个电压下的电动机转矩曲线,该电压指示使用推算的电动机速度的电流查找表。

[0022] 图4b示出了与图4a的 $V_{high}$ 电动机转矩曲线大致对应的输出电流指令值的第一查找表( $V_{high}$ ),并且示出了对应于 $V_{meas}$ 和 $\omega_r$ 的 $V_{high}$ 的推算的电动机速度。

[0023] 图4c示出了与图4a的 $V_{high}$ 电动机转矩曲线大致对应的输出电流指令值的第二查找表( $V_{low}$ ),并且示出了对应于 $V_{meas}$ 和 $\omega_r$ 的 $V_{low}$ 的推算的电动机速度。

[0024] 图5示出了包括IPM电动机驱动系统的电流约束圆和IPM电动机驱动系统的电压限制约束的图。

[0025] 图6示出了类似于图1的示例性电动机驱动控制系统的框图,例如用于内置式永磁体(IPM)电动机驱动系统中的电动机驱动控制系统,其包括弱磁校正系统。

[0026] 图7描绘了包括恒定转矩曲线、两个电压约束椭圆和沿着单个恒定转矩曲线对应于三个电流输出指令的三个点的图。

### 具体实施方式

[0027] 以下描述针对用于描述本公开的创新方面的目的的某些实现。然而,本领域普通技术人员将容易认识到,本文的教导能够以多种不同的方式应用。所描述的实施方式能够在能够被配置成驱动IPM或类似的电动机(无论是在运行中还是在静止中)的任何装置、设备或系统中实现。更具体地,能够设想,所描述的实施方式能够被包括在各种IPM或类似的

电动机应用(例如但不限于电动泵、电动车辆、电器以及各种电动机驱动的装置)中或与其相关联。因此,该教导并非意在被限制于仅在附图中描绘的实施方式,而是具有更广泛的适用性,这对于本领域普通技术人员而言将显而易见。

[0028] 各种行业和应用通常使用闭环电流控制来调节高性能电动机驱动器中的电动机转矩。闭环电流控制系统能够响应于系统操作环境中不断变化的条件。例如,当驱动电动机时,闭环电流控制系统能够通过反馈和各种状况监视来提供对电动机操作的持续监视和控制。闭环电流控制系统能够自动调节系统的输入和方面以保持期望的状态。

[0029] 存储器中的多个查找表可存储基于IPM电动机驱动系统的最大每转转矩(MTPA)的当前指令。在一些实施例中,存储器能够包括数据存储装置,在其中,各种数据条目能够在查找表中被格式化或结构化。初始测试过程可能会生成查找表。至查找表的输入能够是转矩指令、测量的DC电压和测量的电动机速度。查找表的输出能够是用于驱动IPM电动机驱动系统的当前指令(例如, $i_d, i_q$  电流值)。电流指令能够对应于输入到用于驱动电动机的逆变器的电压。每个查找表能够对应于不同的电压,其中电压对应于驱动电动机的逆变器处的DC电压总线测量值。初始测试过程能够通过在每个电压的查找表的每个转矩指令输入和电动机速度输入处操作IPM电动机驱动系统来生成查找表,在IPM电动机驱动系统的可用电压范围内改变电压以生成多个对于可用电压范围内的每个变化电压的查找表。

[0030] 在IPM电动机驱动系统的操作中,当接收到转矩指令(例如,基于期望的加速度等),以及测量的DC电压和电动机速度时,基于测量的DC电压从多个查找表中选择适当的查找表(例如,当测量的DC电压是100V时选择100V查找表)。系统然后使用所选择的查找表内的转矩指令和测量的电动机速度来识别(例如,查找)电流指令以输出到IPM电动机驱动系统。两个查找表的示例在下面的表1和2中示出。当测量的DC电压为100V,转矩指令为75,并且电动机速度为125时,表1查找表将被选择并将输出( $i_{d5}, i_{q5}$ )。如果测量的DC电压为150V,转矩指令为100,并且电动机速度为130,表2查找表将被选择并将输出( $i_{d19}, i_{q19}$ )。当前指令具有两个分量, $i_d$ 分量和 $i_q$ 分量。

[0031]

T/ $\omega$	100	125	130
50	$i_{d1}, i_{q1}$	$i_{d2}, i_{q2}$	$i_{d3}, i_{q3}$
75	$i_{d4}, i_{q4}$	$i_{d5}, i_{q5}$	$i_{d6}, i_{q6}$
100	$i_{d7}, i_{q7}$	$i_{d8}, i_{q8}$	$i_{d9}, i_{q9}$

[0032] 表1:查找表V=100V

[0033]

T/ $\omega$	100	125	130
50	$i_{d11}, i_{q11}$	$i_{d12}, i_{q12}$	$i_{d13}, i_{q13}$
75	$i_{d14}, i_{q14}$	$i_{d15}, i_{q15}$	$i_{d16}, i_{q16}$
100	$i_{d17}, i_{q17}$	$i_{d18}, i_{q18}$	$i_{d19}, i_{q19}$

[0034] 表2:查找表V=150V

[0035] 图1示出了例如用于内置式永磁体(IPM)电动机驱动系统中的示例性电动机驱动控制系统的框图。IPM电动机驱动系统100可包含诸如MTPA查找表(查找表)102、电流调节器104、二至三相转换器106、脉宽调制(PWM)逆变器108、IPM电动机110、位置传感器112、速度



检测器114、三至二相转换器116、电压计118、转矩指令输入120、位置反馈122、电动机速度反馈124、三相电流反馈126、由三相测量电流值计算的二相电流反馈128、DC电压测量值130和输出电流指令132。在一些实施例中,DC电压测量值130对应于逆变器108处的DC电压总线测量值。图1中示出了具有两个值( $i_{ds}^*$ ,  $i_{qs}^*$ )的输出电流指令132;然而,为了简单起见,输出电流指令132的两个值在这里将被称为单个输出电流指令132。查找表102能够对应于上面关于表1和2描述的查找表,并且能够具有转矩指令输入120,电动机速度反馈124和DC电压测量值130作为输入。因此,能够基于DC电压测量值130从多个查找表102中选择适当的查找表102,并且能够使用适当的查找表102来基于转矩指令输入120和电动机速度反馈124识别输出电流指令132。输出电流指令132可馈送到电流调节器104,电流调节器104可基于DC电压测量值130和二相电流反馈128将相应的电压馈送到二至三相转换器106。

[0036] 二至三相转换器106能够将由电流调节器104输出的二相电压信号转换为三相电压信号,以馈送至PWM逆变器108,PWM逆变器108其能够将产生的三相AC电压输出至IPM电动机110。在一些实施例中,PWM逆变器108能够连接至DC电压总线,其能够向PWM逆变器108提供输入电源。位置传感器112能够生成位置反馈122,速度检测器114能够使用该位置反馈122来生成电动机速度反馈124。当将三相电流反馈126转换成二相电流反馈128时,三至二相相位转换器能够使用位置反馈122,并且当将来自电流调节器104的二相输出电压转换成输入到PWM逆变器108的三相电压时,二至三相相位转换器能够使用位置反馈122。电压计118能够在PWM逆变器108处生成DC电压测量值130。PWM逆变器108能够将将从二到三相转换器接收的三相DC电压转换为驱动IPM电动机110的三相AC电压。查找表102和电流调节器104均能够分别使用DC电压测量值来识别输出电流指令132和将输出电流指令到输出电压的转换。IPM电动机驱动系统100的功能模块的详细操作在本领域中是已知的,并且不需要详细描述。

[0037] 如上所述,处理器(未在图1中示出)能够使用查找表102来识别给定转矩指令输入120、DC电压测量值130和电动机速度反馈124的输出电流指令132。当利用指令转矩输入120和电动机速度反馈124接收DC电压测量值时,处理器能够选择对应于DC电压测量值130的查找表102。然而,可能存在不存在准确对应于DC电压测量值130的查找表102的情况。例如,DC电压测量值130可能是353V,并且可能只有350V和355V的查找表102。因此,处理器能够基于现有的350V和355V查找表102中的对应值,通过内插计算DC电压测量值130的输出电流指令132。

[0038] 当基于与界定DC电压测量值130 ( $V_{meas}$ ) 的电压相对应的查找表102来内插输出电流指令132时,处理器能够先选择需要的查找表。处理器能够从多个查找表102中选择第一查找表和第二查找表,该第一查找表在低端界定 $V_{meas}$  (例如,查找表中对于低于具有查找表的 $V_{meas}$ 的第一电压),第二查找表在高端界定 $V_{meas}$  (例如,查找表中比具有查找表的 $V_{meas}$ 更高的第一电压)。因此,对于上面描述的例子,处理器能够选择用于 $V_{low}$ 的第一查找表,其中 $V_{low} = 350V$ ,和用于 $V_{high}$ 的第二查找表,其中 $V_{high} = 355V$ 。因此, $V_{low} < V_{meas} < V_{high}$ 。插值能够由处理器首先基于转矩指令输入120 ( $T_{cmd}$ ) 和电动机速度反馈124 ( $\omega_r$ ) 识别第一查找表 ( $V_{low}$ ) 中的 $I_{d_{low}}$ ,然后基于转矩指令输入120  $T_{cmd}$  和电动机速度反馈124  $\omega_r$  在第二查找表 ( $V_{high}$ ) 中识别 $I_{d_{high}}$ 来进行。处理器然后使用如下公式1内插对应于DC电压测量值130 ( $V_{meas}$ ) 的输出电流指令132  $I_{d_{meas}}$ :

[0039]  $I_{d_{meas}} = I_{d_{low}} + (I_{d_{high}} - I_{d_{low}}) * (V_{meas} - V_{low}) / (V_{high} - V_{low})$

[0040] (公式1)

[0041] 上述线性插值适用于与DV电压测量值130相关的转矩指令输入120 ( $T_{cmd}$ ) 均存在于较低和较高的(分别为 $V_{low}$ 和 $V_{high}$ ) 查找表中的任何情况。例如,所描述的线性插值将提供IPM电动机的恒定转矩区域内的DC电压测量值130的精确的电流输出。然而,在某些情况下,对于给定的转矩指令输入120的输出电流指令132可能仅存在于单个查找表(例如,用于 $V_{high}$ 的第二查找表)中,因为转矩指令输入120可能大于电动机速度反馈124处的 $V_{low}$ 查找表的最大转矩。因此,插值变得不太可行并且更容易出错,因为只有一个查找表能够用来为公式1提供需要的值。

[0042] 图2a示出了用于在多个电压(包括恒定转矩和弱磁区域)的IPM电动机驱动系统的电动机转矩曲线的图。图200描绘了在DC电压 $V_{low}$  ( $T_{max\_low}$  206)、 $V_{meas}$  ( $T_{max\_meas}$  208)和 $V_{high}$  ( $T_{max\_high}$  210)处的IPM电动机110(图1)的电动机转矩曲线。图200的x轴描绘IPM电动机110的电动机速度( $\omega_r$ ),其对应于图1的电动机速度反馈124,而图200的y轴描绘IPM电动机110的转矩指令( $T_m$ ) 120,其对应于图1的转矩指令120。图200也示出恒定转矩区域202,其中 $V_{low}$ 、 $V_{meas}$ 和 $V_{high}$ 电压能够在相同的电动机速度下生成相同的最大转矩指令值。图200还示出了弱磁区204,其中 $V_{low}$ 、 $V_{meas}$ 和 $V_{high}$ 电压能够在相同的电动机速度下生成不同的最大转矩指令值。

[0043] 图2b示出了大致对应于图2a的 $V_{low}$ 电动机转矩曲线的输出电流指令值的第一查找表( $V_{low}$ )。查找表250示出具有沿着一个轴转矩指令( $T_m$ )值并且沿着另一个轴电动机速度( $\omega_r$ )输入的输出电流指令的二维阵列(对应于图1的输出电流指令132)。转矩指令轴范围从0到 $\tau_{max}$ ,而电动机速度轴范围从0到 $\omega_{max}$ 。空位置252对应于对应的电压 $V_{low}$ 不能生成必须的输出电流指令的转矩指令和电动机速度组合(例如,转矩指令120不能在电压 $V_{low}$ 和电动机速度反馈124处生成)。填充位置254对应于转矩指令和电动机速度反馈组合,在该处,相应的 $V_{low}$ 能够生成必要的输出电流指令(例如,能够在电压 $V_{low}$ 和电动机速度反馈124处生成转矩指令120)。如所示,查找表250描绘了比图2a的 $V_{low}$ DC电压更精细的电动机转矩曲线。

[0044] 图2c示出了大致对应于图2a的 $V_{high}$ 电动机转矩曲线的输出电流指令值的第二查找表( $V_{high}$ )。查找表280的特征类似于关于图2b的查找表250所描述的特征,并且将不再描述。如所示,查找表280描绘了比图2a的图200的 $V_{high}$ DC电压更精细的电动机转矩曲线,其中图2b的 $V_{low}$ 查找表250的电流指令值每个被 $V_{high}$ 查找表280覆盖。

[0045] 当转矩指令输入120小于测量的电压下的 $T_{low\_max}$ (相应地小于 $T_{high\_max}$ ),上面关于公式1描述的插值方法能够在不存在 $V_{meas}$ 的查找表时起作用,只要 $V_{low}$ 和 $V_{high}$ 的查找表250和280分别包括用于转矩指令输入120和电动机速度 $\omega_r$ 的组合的值254。例如,在分别对应于 $T_{cmd1}$ 和 $T_{cmd2}$ 以及 $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 的点218(图2a)处,转矩指令输入120分别存在于 $V_{low}$ 和 $V_{high}$ 查找表中,并且因此处理器能够使用 $V_{low}$ 和 $V_{high}$ 查找表来内插针对 $V_{meas}$ 的输出电流指令132,其中 $V_{low} < V_{meas} < V_{high}$ 。图2a中的点218对应于图2b和图2c中的位置256。由于位置256被填充进查找表250和表280中,所以处理器能够使用插值来确定在针对转矩指令 $T_{cmd}$ 、DC电压测量值 $V_{meas}$ 和电动机速度 $\omega_r$ (由于输出电流指令存在于这些位置处,用于查找表250和表280)的输出指令电流。

[0046] 然而,在弱磁区域204中,例如对于指令转矩值 $T_{cmd}$ 处的点212(图2a),转矩指令在

速度  $\omega_r$  的  $V_{low}$  查找表中不存在。类似的,图2b中的位置258在查找表250中(对应于  $V_{low}$ ) 为空,并填充在图2c的查找表280中(对应于  $V_{high}$ )。因此,由于点212(图2b和图2c的位置258)在  $V_{low}$  的电动机转矩曲线之外(例如,  $T_{cmd}$  超过  $V_{low}$  DC电压处的最大转矩 ( $T_{max\_low}$  214) 并且位置258是空的),所以处理器不能使用线性插值来识别转矩指令  $T_{cmd}$  的输出电流指令、DC电压测量值  $V_{meas}$  和电动机转速  $\omega_r$ 。因此,必须使用确定点212(位置258)的输出电流指令132的替代方法。

[0047] 图3示出了包括恒定转矩曲线、IPM电动机驱动系统的电流约束和IPM电动机驱动系统的电压约束的图表。图300示出了d-q坐标空间中的电流和电压极坐标图。图300在x轴方向上示出  $i_{ds}$  轴,在y轴方向上显示  $i_{qs}$  轴。图300还示出了表示IPM电动机驱动系统的电流约束的圆形极坐标图(圆形图)302。图300示出了表示IPM电动机驱动系统的电压约束的椭圆极坐标图(椭圆图)304、306和308。转矩线310表示对应于将生成相应转矩值的不同的  $i_{ds}$  和  $i_{qs}$  值的单独转矩指令。沿着这些转矩线310的每一个的转矩是恒定的。椭圆图304、306和308与转矩线310的交点和重叠点指示对应于椭圆图304、306和308的能够产生用于重叠的转矩线310的转矩指令的输出电流指令的电压和速度。转矩线310对应于转矩指令120(图1的  $T_{cmd}$ ),椭圆图304、306和308的电压对应于查找表和DC电压测量值130的电压(图2的  $V_{low}$ 、 $V_{high}$ 、 $V_{meas}$ ),并且速度对应于电机速度反馈124(图1)。

[0048] 在标准(d,q)状态空间数学模型参考系中的IPM同步电动机的电压确定方程在以下公式2中示出。下面的公式3计算相同参考系的转矩:

$$[0049] \quad V_{ds} = R_s i_{ds} + L_{ds} \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_e L_{qs} i_{qs}$$

$$[0050] \quad V_{qs} = R_s i_{qs} + L_{qs} \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_e L_{ds} i_{ds} + \omega_e \lambda_f$$

[0051] (公式2)

$$[0052] \quad T = \frac{3}{2} n_p (\lambda_f i_{qs} + (L_{ds} - L_{qs}) i_{qs} i_{ds})$$

[0053] (公式3)

[0054] 对于这些公式,  $R_s$  对应于定子电阻,  $\omega_e$  是电动机的转速,  $n_p$  是极对数,  $V_{ds}$  和  $V_{qs}$  分别是d轴和q轴定子电压,  $i_{ds}$  和  $i_{qs}$  分别是d轴和q轴定子电流,并且  $L_{ds}$  和  $L_{qs}$  分别是d轴和q轴转子参考系中的定子电感。  $\lambda_f$  对应于永磁体磁链(例如,转矩常数),并且  $T$  对应于电动机转矩。

[0055] 参考的d-q轴组是(d,q)坐标系中的轴。d轴(直轴)通常对应于转子磁极的轴。q轴(交轴)通常包含与d轴成90度角的轴线。当转子静止时,(d,q)坐标系是静止的参考坐标系。当转子开始旋转时,系统是转子参考系,其中(d,q)坐标系以转子速度旋转。

[0056] 在稳定状态下,公式2的导数为零,并且公式2简化为如下形式的公式4:

$$[0057] \quad V_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_e L_{qs} i_{qs}$$

$$[0058] \quad V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_e L_{ds} i_{ds} + \omega_e \lambda_f$$

[0059] (公式4)

[0060] IPM电动机和PWM逆变器的电压和电流额定值能够限制由PWM逆变器控制的IPM电动机的转矩和速度。最大相电压  $V_{s\_max}$  能够基于DC链电压来确定并且能够根据下面的公式5来计算:

$$[0061] \quad V_{ds}^2 + V_{qs}^2 \leq V_{s\_max}^2$$

[0062] (公式5)

[0063] 因此,最大相电压 $V_{s\_max}$ 能够对应于来自 $V_d$ 和 $V_q$ 电压的合并的总电压。

[0064] 最大电流 $I_{s\_max}$ 可用于IPM电动机和PWM逆变器限制逆变器和电动机的电流,如公式6所示。

$$[0065] \quad i_{ds}^2 + i_{qs}^2 \leq I_{s\_max}^2$$

[0066] (公式6)

[0067] 因此,最大相电流 $i_{s\_max}$ 能够对应于来自 $i_d$ 和 $i_q$ 电流的合并的总电流。

[0068] 公式4能够插入到公式6中,并且在转速较高的场弱化区域和计算中通常能够忽略定子电阻。因此,会产生电压限制的公式7降低如下:

$$[0069] \quad L_{ds}^2 \left( i_{ds} + \frac{\lambda_f}{L_{ds}} \right)^2 + L_{qs}^2 i_{qs}^2 \leq \left( \frac{V_{s\_max}}{n_p \omega_r} \right)^2$$

[0070] (公式7)

[0071] 公式5的 $V_{ds}^2$ 项被替换为公式4的 $V_{ds}$ 公式,而公式5的 $V_{qs}^2$ 项替换为公式4的 $V_{qs}$ 公式。公式7右侧的 $V_{s\_max}^2$ 项现在描述了最大相电压和速度的比例。最大相电压和速度的最终比例能够用其他电压和速度的合并代替。从如上描述的图3能够看出,点 $T_{m2}$ 对应于在电动机速度 $\omega_r$ 处的DC电压测量值 $130V_{meas}$ 处产生转矩线310a所需的电流( $i_d, i_q$ )。如所示,椭圆308(对应于 $V_{high}, \omega_r$ )大于椭圆306(对应于 $V_{meas}, \omega_r$ ),其大于椭圆304(对应于 $V_{low}, \omega_r$ )。通过降低电压 $V_{high}$ 并保持速度 $\omega_r$ 或保持电压 $V_{high}$ 并基于电压椭圆方程式增加速度 $\omega_r$ ,能够调整椭圆308以匹配椭圆306。因此, $\omega_{high}$ 能够基于已知的 $V_{meas}, V_{high}$ 和 $\omega_r$ 通过如下公式8(来源于电压椭圆公式)计算:

$$[0072] \quad \omega_{high} = \frac{V_{high}}{V_{meas}} \omega_r$$

[0073] (公式8)

[0074] 因此,由于 $V_{meas}$ 和 $\omega_r$ 的电压约束椭圆与 $V_{high}$ 和 $\omega_{high}$ 的电压椭圆大小相同,所以下面的公式9能够从公式7和8中生成:

$$[0075] \quad L_{ds}^2 \left( i_{ds} + \frac{\lambda_f}{L_{ds}} \right)^2 + L_{qs}^2 i_{qs}^2 \leq \left( \frac{V_{meas}}{n_p \omega_r} \right)^2 = \left( \frac{V_{high}}{n_p \omega_{high}} \right)^2$$

[0076] (公式9)

[0077] 因此,针对相同的转矩指令的,在 $V_{meas}$ 上的输出电流指令能够基于针对比 $\omega_r$ 更高的速度 $\omega_{high}$ 的 $V_{high}$ 时的输出电流指令确定。

[0078] 类似的,由于椭圆304能够通过增加电压 $V_{low}$ 并保持速度 $\omega_{low}$ 或保持电压 $V_{low}$ 并基于电压椭圆公式降低速度 $\omega_{low}$ 来调整以匹配椭圆306,对于相同的转矩指令,在 $V_{meas}$ 的输出电流指令能够基于针对比 $\omega_r$ 更低的速度 $\omega_{low}$ 的 $V_{low}$ 的输出电流指令确定。因此, $\omega_{low}$ 能够通过如下公式10(其也来自电压椭圆公式)基于已知的 $V_{meas}, V_{low}$ 和 $\omega_r$ 计算:

$$[0079] \quad \omega_{low} = \frac{V_{low}}{V_{meas}} \omega_r$$

[0080] (公式10)

[0081] 因此,由于 $V_{\text{meas}}$ 和 $\omega_r$ 的电压约束椭圆尺寸与 $V_{\text{low}}$ 和 $\omega_{\text{low}}$ 的电压椭圆尺寸相同,所以如下的公式11能够从公式7和10中生成:

$$[0082] \quad L_{\text{ds}}^2 \left( i_{\text{ds}} + \frac{\lambda_r}{L_{\text{ds}}} \right)^2 + L_{\text{qs}}^2 i_{\text{qs}}^2 \leq \left( \frac{V_{\text{meas}}}{n_p \omega_r} \right)^2 = \left( \frac{V_{\text{low}}}{n_p \omega_{\text{low}}} \right)^2$$

[0083] (公式11)

[0084] 图4a示出了包括IPM电动机驱动系统在多个指示使用推算的电动机速度的电流查找的电压的电动机转矩曲线的图表。图400包括许多与图2的图200相同的特征,这里将不再描述。图400包括在 $T_{\text{cmd}}$ 和 $\omega_r$ 处的点212。基于如上讨论,由于点212在 $V_{\text{low}}$ 查找表的 $T_{\text{max\_low}}$ 转矩曲线214上方,插值将不会产生对于给定的DC电压测量值和电动机速度反馈的精确的输出电流指令。然而,使用如上讨论的公式7和8, $V_{\text{high}}$ 查找表能够被用于确定在 $V_{\text{high}}$ 电压、 $\omega_{\text{high}}$ 电动机速度和转矩指令 $T_{\text{cmd}}$ 处的输出电流指令。点420描绘了具有速度 $\omega_{\text{high}}$ 和相同转矩指令 $T_{\text{cmd}}$ 的 $V_{\text{high}}$ 处的点。因此, $V_{\text{high}}$ 查找表能够使用速度 $\omega_{\text{high}}$ 和转矩指令 $T_{\text{cmd}}$ 以识别输出电流指令,其如通过如上公式9所示,等同于在速度 $\omega_r$ 处的 $V_{\text{meas}}$ 的输出电流指令。类似的,使用如上讨论的公式10和11, $V_{\text{low}}$ 查找表能够被用于确定在 $V_{\text{low}}$ 电压、 $\omega_{\text{low}}$ 电动机速度和转矩指令 $T_{\text{cmd}}$ 处的输出电流指令。点422描绘了具有速度 $\omega_{\text{low}}$ 和相同转矩指令 $T_{\text{cmd}}$ 的在 $V_{\text{low}}$ 的点。因此, $V_{\text{low}}$ 查找表能够使用速度 $\omega_{\text{low}}$ 和转矩指令 $T_{\text{cmd}}$ 以识别输出电流指令,其如通过如上公式11所示,等同于在速度 $\omega_r$ 处的 $V_{\text{meas}}$ 的输出电流指令。

[0085] 图4b示出了大致对应于图4a的 $V_{\text{high}}$ 电动机转矩曲线的输出电流指令值的第一查找表( $V_{\text{high}}$ ),并且示出了对应于 $V_{\text{meas}}$ 和 $\omega_r$ 的 $V_{\text{high}}$ 的推算的电动机速度。查找表480可以包括许多与图2的查找表280相同的特征,这里将不再描述。图4b示出如何使用 $V_{\text{high}}$ 查找表来确定 $V_{\text{meas}}$ 、 $\omega_r$ 和 $T_{\text{cmd}}$ 输入的输出电流指令,其中插值不是选项,如上所述与公式7-9相关。如上所述,给定的公式8、 $V_{\text{meas}}$ 、 $\omega_r$ 和 $V_{\text{high}}$ 能够被用于识别速度 $\omega_{\text{high}}$ 。由于电压约束椭圆由 $V_{\text{high}}$ 形成,所以 $\omega_{\text{high}}$ 将直接与由 $V_{\text{meas}}$ 、 $\omega_r$ 形成的电压约束椭圆重叠,在 $V_{\text{high}}$ 、 $\omega_{\text{high}}$ 处的输出电流指令等于在 $V_{\text{meas}}$ 、 $\omega_r$ 的输出电流指令。因此, $V_{\text{high}}$ 查找表的位置460的输出电流指令( $V_{\text{high}}$ ,  $\omega_{\text{high}}$ )等于转矩指令 $T_{\text{cmd}}$ 的输出电流指令( $V_{\text{meas}}$ ,  $\omega_r$ )。

[0086] 图4c示出了大致对应于图4a的 $V_{\text{high}}$ 电动机转矩曲线的输出电流指令值的第二查找表( $V_{\text{low}}$ ),并且显示了对应于 $V_{\text{meas}}$ 和 $\omega_r$ 的 $V_{\text{low}}$ 的推算的电动机速度。查找表450可以包含许多与图2的查找表250相同的特征,这里将不再描述。图4c示出 $V_{\text{low}}$ 查找表如何能够被用于确定 $V_{\text{meas}}$ 、 $\omega_r$ 和 $T_{\text{cmd}}$ 输入的输出电流指令,其中插值不是选项,如上关于公式10~11所述。如上所述,给定的公式10、 $V_{\text{meas}}$ 、 $\omega_r$ 和 $V_{\text{low}}$ 可用于识别速度 $\omega_{\text{low}}$ 。由于由 $V_{\text{low}}$ 、 $\omega_{\text{low}}$ 形成的电压约束椭圆将与由 $V_{\text{meas}}$ 、 $\omega_r$ 形成的电压约束椭圆直接重叠,所以在 $V_{\text{low}}$ 、 $\omega_{\text{low}}$ 的输出电流指令等于在 $V_{\text{meas}}$ 、 $\omega_r$ 的输出电流指令。因此, $V_{\text{low}}$ 查找表( $V_{\text{low}}$ ,  $\omega_{\text{low}}$ )的位置440的输出电流指令等于转矩指令 $T_{\text{cmd}}$ 的( $V_{\text{meas}}$ ,  $\omega_r$ )的输出电流指令。

[0087] 虽然上面描述的用于产生内置式永磁体(IPM)电动机的电流指令的方法和装置是关于和适用于IPM电动机的弱磁区域来讨论的,但是这些相同的方法和装置与在IPM电动机的恒定转矩区域中的功能类似。因此,替代地,可以使用上述的当前指令生成等式来执行在当前正在使用查找表执行的所描述的IPM的恒转矩区域内的电流指令标识。代替如上面的公式1所描述的通过插入电流指令,可以通过使用公式9和11来识别电流指令。

[0088] 使用公式9和11生成电流指令可以减少所需的查找表的数量。减少查找表的数量

会减少专用于查找表的内存量,执行用于生成查找表的初始测试过程所需的时间以及使用查找表来识别当前所需的时间,因为更少的时间用于识别适当的查找表等。在一些实施例中,存储在存储器中的查找表可以用两个查找表替换,一个用于系统的最低可能最小电压,另一个用于控制系统的最高可能最大电压。基于这两个查找表,控制系统可以使用公式9和11为最小和最大电压之间的任何电压产生电流指令。这里讨论的方法可以用于整个转矩速度范围。在一些实施例中,存储在存储器中的查找表可以被替换为单个查找表,例如在控制系统的最大或最小电压下。从单个查找表,公式7-9或10-11可用于识别任何DC电压测量值的电流指令。如上所述,输出电流指令( $i_{ds}, i_{qs}$ )是理想的,在初始测试过程中确定的估计值。因此,这些预先校准和/或存储的输出电流指令可能不考虑现实世界的限制。在某些情况下,输出电流指令( $i_{ds}, i_{qs}$ )可能需要更正以避免当超过IPM的电压约束的电流指令被应用于IPM时可能出现的问题。

[0089] 图5示出了包含IPM电动机驱动系统的电流约束圆和IPM电动机驱动系统的电压限制约束的图。图500包含电流约束圆502(类似于图3的圆形图302)和电压椭圆约束504(类似于椭圆图304、306和308)。根据曲线图500中所示的约束操作的IPM电动机操作的操作点应位于电流圆502和电压椭圆504重叠的区域中。理想地,从上面讨论的查找表输出的( $i_{ds}, i_{qs}$ )电流指令应当符合所描述的电流和电压约束(例如,与( $i_{ds}, i_{qs}$ )电流指令输出对应的点应该位于重叠区域内)以在所有速度下保持电动机的完全控制。

[0090] 图500也包含输出电流指令( $i_{d\_cmd}, i_{q\_cmd}$ ),其被显示为在电流圆502的周界上但不在电压椭圆504上或电压椭圆204内。因此,图500描绘输出电流指令( $i_{d\_cmd}, i_{q\_cmd}$ ) (例如,点506)不符合电压约束的情况。导致输出电流指令位于电流和电压约束之外的错误可能包含上述插值和计算中的错误、在初始测试和控制表表征过程期间可能发生的电压测量值错误(例如,计算的和真实世界系统之间的电压差异、热效应等)。因此,输出电流指令( $i_{d\_cmd}, i_{q\_cmd}$ )可以被修正以在电压约束内找到最佳工作点并且同时保持转矩线性度。

[0091] 图6示出了类似于图1的包括弱磁校正系统的示例性电动机驱动系统的框图,例如用于内置式永磁体(IPM)电动机驱动系统中的电动机驱动控制系统。IPM电动机驱动系统600可以包含许多与IPM电动机驱动系统100相同的分量和特征,这里将不再描述。系统600还可以包含弱磁校正电路602。如图所示,场弱化校正电路602可以包含各种组件604。然而,这些组件604中的一个或多个可以被移除或替换,或者可以使用另外的组件来影响如本文所述的相同效果。校正输出电流指令( $i_{d\_cmd}, i_{q\_cmd}$ )可以从识别与输出电流指令对应的输出电压指令( $V_{ds}, V_{qs}$ )开始。在系统600中,输出电压指令( $V_{ds}, V_{qs}$ )被示出为对应于电流调节器104的输出处的输出电流指令( $i_{d\_cmd}, i_{q\_cmd}$ )。然而,在一些实施例中,可以在系统600内的任何其他点处监视或获取电压指令。基于如上公式5,可以使用下面的公式12基于指令( $V_{ds}, V_{qs}$ )来计算相电压 $V_s$ 的幅度:

$$[0092] \quad v_s = \sqrt{v_{ds}^2 + v_{qs}^2}$$

[0093] (公式12)

[0094] 如弱磁电路602所示,一旦由公式12计算相电压的大小,可以减少参考电压 $V_{ref}$ ,该参考电压 $V_{ref}$ 对应于受到PWM逆变器108限制的电动机110处的实际电压。然后可以操纵相电压 $V_s$ 的大小和参考电压 $V_{ref}$ 之间所识别的差异以识别调整输出电流指令( $i_{d\_cmd}, i_{q\_cmd}$ )所需

的总相电流增量,以推动电压椭圆504内的相电压 $V_s$ 的幅度(图5),其对应于在电压约束内找到最佳工作点。相电流增量,  $\Delta I_s$ ,可能会受限于负校准值。如在系统600中所示,相电流增量,  $\Delta I_s$ ,通过将相电压 $V_s$ 的大小与参考电压 $V_{ref}$ 之间的差异归一化为电气速度 $\omega_e$ 并将比例积分(PI)调节器应用于归一化差值来识别。在一些实施例中,其他方法和分量可以用来从相电压 $V_s$ 和参考电压 $V_{ref}$ 的大小来识别相电流增量。一旦确定了相电流增量,  $\Delta I_s$ ,就可以从相电流增量识别  $\Delta I_d$ 和  $\Delta I_q$ 值。

[0095] 图7描绘了包括恒定转矩曲线、两个电压约束椭圆和沿着单个恒定转矩曲线对应于三个电流输出指令的三个点的图。图700描绘第一电压约束椭圆702和第二电压约束椭圆704。图700还描绘了对应于点706、708和710的三个电流输出指令。三个点706、708和710全部沿着恒定转矩曲线310a。第一椭圆702对应于DC电压测量值 $V_{ref}$ 的电压约束,其可以对应于当从查找表确定输出电流指令时IPM电动机110和PWM逆变器108的实际电压参考。第二椭圆704对应于 $V_{high}$ 电压的电压约束。点706对应于输出电流指令  $(i_{d\_HighV}, i_{q\_HighV})$  其中第二椭圆704的 $V_{high}$ 电压与转矩曲线310a相交。点708对应于输出电流指令  $(i_{d\_cmd}, i_{q\_cmd})$ ,其对应于在转矩曲线310a的转矩指令处的针对DC电压测量值 $V_{meas}$ 的预先计算的输出电流指令。点710对应于输出电流指令  $(i_{ds}^*, i_{qs}^*)$  其中第一椭圆702(对应于实际 $V_{meas}$ 电压约束)与转矩指令的转矩曲线310a相交。

[0096] 如上所述,点708的输出电流指令  $(i_{d\_cmd}, i_{q\_cmd})$  可以基于在查找表中基于转矩指令、DC电压测量值和电动机速度反馈输入来识别输出电流指令,从如上所述基于高于和低于DC电压测量值的查找表插入值,或者基于在较高电动机速度反馈处的电压或在较低电动机速度反馈处的较低电压来计算。由于点308的输出电流指令  $(i_{d\_cmd}, i_{q\_cmd})$  在第一椭圆702之外,所以输出电流指令  $(i_{d\_cmd}, i_{q\_cmd})$  可以被调整为在第一椭圆702内的电压约束内或上移动。如果输出电流指令  $(i_{d\_cmd}, i_{q\_cmd})$  在第一椭圆702的电压约束内或上,则输出电流指令  $(i_{d\_cmd}, i_{q\_cmd})$  不需要被调整,因为不存在在约束范围内的电压和电流下失去对IPM电动机110的控制的风险。

[0097] 因此,减小 $i_{qs}$ 分量并将输出电流指令中的沿恒定转矩线310a的 $i_{ds}$ 分量从点708增加到点710将使输出电流指令在第一椭圆702的电压约束内并且保持转矩产生。如上所述,例如在输出电流指令  $(i_{d\_HighV}, i_{q\_HighV})$  下,对于给定转矩指令的输出电流指令可以针对比参考电压 $V_{ref}$ 和DC测量的电压 $V_{meas}$ (例如 $V_b$ ,其中 $V_b > V_{ref}$ 和/或 $V_{meas}$ )更高的电压被确定。由于从点306(例如,  $(i_{d\_HighV}, i_{q\_HighV})$ )到点308(例如,  $(i_{d\_cmd}, i_{q\_cmd})$ )之间的电压阶跃小,所以两个点之间的恒定转矩曲线的曲率可以被忽略并被假定为与  $(i_{ds}, i_{qs})$  电流变化呈线性关系。因此,公式13如下提供了识别两个点306与308之间的线的斜率,这也可以归因于其长度短的两点308(例如  $(i_{d\_cmd}, i_{q\_cmd})$ )与310(例如,  $(i_{ds}^*, i_{qs}^*)$ )之间的线:

$$[0098] \quad k = \frac{i_{q\_HighV} - i_{q\_cmd}}{i_{d\_HighV} - i_{d\_cmd}} = \frac{i_{q\_cmd} - i_q^*}{i_{d\_cmd} - i_d^*}$$

[0099] (公式13)

[0100] 使 $\Delta I_q = i_{q\_cmd} - i_q^*$ ,  $\Delta I_d = i_{d\_cmd} - i_d^*$ ,因此  $\Delta I_q = k \Delta I_d$ 并且公式14始终保持:

$$[0101] \quad i_{d\_cmd}^2 + i_{q\_cmd}^2 = I_s^2$$

$$[0102] \quad (i_{d\_cmd} + \Delta I_d)^2 + (i_{q\_cmd} + \Delta I_q)^2 = (I_s + \Delta I_s)^2$$

[0103] (公式14)

[0104] 扩展公式14提供公式14-1:

$$[0105] \quad i_{d\_cmd}^2 + 2i_{d\_cmd}\Delta I_d + \Delta I_d^2 + i_{q\_cmd}^2 + 2i_{q\_cmd}\Delta I_q + \Delta I_q^2 = I_s^2 + 2I_s\Delta I_s + \Delta I_s^2$$

[0106] (公式14-1)

[0107] 由于  $\Delta I_d$ ,  $\Delta I_q$  和  $\Delta I_s$  相比于  $i_{d\_cmd}$ ,  $i_{q\_cmd}$  和  $i_s$  相当小, 因此  $i_s$ ,  $\Delta I_d^2$ ,  $\Delta I_q^2$ ,  $\Delta I_s^2$  可以忽略不计。另外,  $i_{q\_cmd} = I_s \cos \beta$ ,  $i_{d\_cmd} = I_s \sin \beta$ 。  $\beta$  在图7中示出为  $I_q$  轴与从 (d, q) 轴上的原点 (0, 0) 和电流指令点 ( $i_{d\_cmd}$ ,  $i_{q\_cmd}$ ) 通过的线之间的角度。  $I_s$  可能是从 (d, q) 轴上的原点 (0, 0) 到电流指令点 ( $i_{d\_cmd}$ ,  $i_{q\_cmd}$ ) 的线的长度。因此,  $I_s$  可以基于 ( $i_{d\_cmd}$ ,  $i_{q\_cmd}$ ) 和角度  $\beta$  来识别。角度  $\beta$  可以使用公式14-2从电流指令点 ( $i_{d\_cmd}$ ,  $i_{q\_cmd}$ ) 识别:

$$[0108] \quad \beta = \tan^{-1} \frac{i_{d\_cmd}}{i_{q\_cmd}}$$

[0109] (公式14-2)

[0110] 简化后,  $\Delta I_d$  和  $\Delta I_q$  可以如公式15所示进行计算:

$$[0111] \quad \Delta I_d = \frac{1}{\sin \beta + k \cos \beta} \Delta I_s$$

$$[0112] \quad \Delta I_q = \frac{k}{\sin \beta + k \cos \beta} \Delta I_s$$

[0113] (公式15)

[0114] 相电流增量,  $\Delta I_s$ , 从弱磁电路602输出为  $\Delta I_d$  和  $\Delta I_q$  并调整为输出电流指令 ( $i_{d\_cmd}$ ,  $i_{q\_cmd}$ )。如果计算吞吐量是一个重要问题, 也可以使用替代解决方案。在实际情况下, 使用公式 (16) 获得  $\Delta I_d$  和  $\Delta I_q$  将足以将操作点沿电压极限移动, 同时保持转矩的产生。

$$[0115] \quad \Delta I_d = \frac{1}{1+k} \Delta I_s$$

$$[0116] \quad \Delta I_q = \frac{k}{1+k} \Delta I_s$$

[0117] (公式16)

[0118] 因此, 可以通过公式17计算最终的输出电流指令, 补偿上述修正:

$$[0119] \quad i_{ds}^* = i_{d\_cmd} + \Delta I_d$$

$$[0120] \quad i_{qs}^* = i_{q\_cmd} + \Delta I_q$$

[0121] (公式17)

[0122] 在上面的分析中,  $i_{ds}$  电流增量可能是负值, 因为可以调整电流以增加  $i_{ds}$  电流, 这将需要额外的负值  $i_{ds}$  因为  $i_{ds}$  电流沿着负轴增加。或者,  $i_{qs}$  当前增量可能为负值或正值。当指令电流为正值时,  $i_{qs}$  电流增量可能为负值, 因此减小  $i_{qs}$  电流。当指令电流为负值时 (例如当制动电动机时),  $i_{qs}$  电流增量可能为正以减小负  $i_{qs}$  电流。

[0123] 以上描述详述了本文公开的系统、设备和方法的某些实现。然而, 应该理解的是, 无论文本中如何详细描述上述内容, 系统, 设备和方法都可以以许多方式实践。如上所述, 应当注意的是, 当描述展开的某些特征或方面时, 使用特定术语不应该被认为暗示该术语在本文中被重新定义为限于包括与该术语相关联的技术的特征或方面的任何特定特征。



[0124] 该技术可以与众多其他通用或专用计算系统环境或配置一起运行。可适用于开发的公知计算系统,环境和/或配置的示例包括但不限于个人计算机、服务器计算机、手持或膝上型设备、多处理器系统、基于微处理器的系统、可编程消费电子产品、网络PC、小型计算机、大型计算机,包括任何上述系统或设备的分布式计算环境等。

[0125] 如这里所使用的,指令是指用于处理系统中的信息的计算机实现的步骤。指令可以在软件,固件或硬件中实现,并且包括由系统组件执行的任何类型的编程步骤。

[0126] 微处理器可以是任何传统的通用单芯片或多芯片微处理器,例如Pentium®处理器、Pentium®Pro处理器、8051处理器、MIPS®处理器、PowerPC®处理器或Alpha®处理器。另外,微处理器可以是任何常规的专用微处理器,例如数字信号处理器或图形处理器。微处理器通常具有常规地址线、常规数据线和一个或多个常规控制线。

[0127] 系统可以用于各种操作系统,例如Linux®、UNIX®或Microsoft Windows®。

[0128] 系统控制可以用诸如C、C++、BASIC、Pascal或Java之类的任何常规编程语言来编写,并且在常规操作系统下运行。C、C++、BASIC、Pascal、Java和FORTRAN是业界标准的编程语言,许多商业编译器都可以用它来创建可执行代码。系统控制还可采用例如Perl、Python或Ruby解释语言进行编写。

[0129] 本领域技术人员将进一步认识到,结合本文公开的实施方式描述的各种说明性逻辑块、模块、电路和算法步骤可以实现为电子硬件,存储在计算机可读介质上并且可由处理器执行的软件,或两者的组合。为了清楚地说明硬件和软件的这种可互换性,上面已经根据其功能一般性地描述了各种说明性的组件、块、模块、电路和步骤。这样的功能是以硬件还是软件来实现取决于特定的应用和对整个系统施加的设计约束。本领域技术人员可以针对每个特定应用以不同的方式实现所描述的功能,但是这样的实施决定不应该被解释为导致脱离本发明的范围。

[0130] 结合本文公开的实施方式描述的各种说明性的逻辑块、模块和电路可以用通用处理器,数字信号处理器(DSP),专用集成电路(ASIC),现场可编程门阵列(FPGA)或其他可编程逻辑器件,分立门或晶体管逻辑,分立硬件组件,或其设计用于执行本文所述功能的任何组合实现。通用处理器可以是微处理器,但替代地,处理器可以是任何传统的处理器、控制器、微处理器或状态机。处理器也可以被实现为计算设备的组合,例如,DSP和微处理器、多个微处理器、一个或多个微处理器与DSP内核的结合,或者任何其他这样的配置。

[0131] 如果在软件中实施,则功能可作为一个或一个以上指令或代码存储在计算机可读媒体上或经由计算机可读媒体传输。本文公开的方法或算法的步骤可以在存储在计算机可读介质上的处理器可执行软件模块中实现。计算机可读介质包含计算机存储介质和通信介质两者,通信介质包含能够将计算机程序从一处传输到另一处的任何介质。存储介质可以是可由计算机访问的任何可用介质。作为示例而非限制,这样的计算机可读介质可以包含RAM、ROM、EEPROM、CD-ROM或其他光盘存储器、磁盘存储器或其他磁存储设备,或可用于存储的任何其他介质所需的程序代码以指令或数据结构的形式,并且可以由计算机访问。而且,任何连接都可以适当地称为计算机可读介质。这里使用的盘和盘包括光盘(CD),激光盘,光盘,数字多功能盘(DVD),软盘和蓝光盘,其中磁盘通常磁性地复制数据,而光盘则用激光光学地复制数据。上述的组合也应该包括在计算机可读介质的范围内。此外,方法或算法的操作可以作为在机器可读介质和计算机可读介质上的代码和指令中的一个或任何组合或集

合存储,其可以被并入计算机程序产品中。

[0132] 以上描述详述了本文公开的系统、设备和方法的某些实施例。然而,应当理解的是,无论文中如何详细描述上述内容,系统、设备和方法都可以以许多方式实践。如上所述,应当注意的是,在描述展开的某些特征或方面时使用特定术语不应被认为暗示该术语在本文中重新定义为限于包括与术语相关联的技术的特征或方面的任何特定特征。

[0133] 本领域技术人员应该理解,在不脱离所描述的技术的范围的情况下可以进行各种修改和改变。这样的修改和改变旨在落入实现的范围内。本领域技术人员还将认识到,包括在一个实施例中的分量可以与其他实施例互换;来自所描绘的实施例的一个或多个分量可以与任何组合中的其他所描绘的实施例一起被包括。例如,本文描述的和/或附图中描绘的各种组件中的任何组件可以与其他实施方式组合,互换或排除。

[0134] 关于本文中基本上任何复数和/或单数术语的使用,本领域技术人员可以根据上下文和/或应用适当地将复数转化为单数和/或将单数转化为复数。为了清楚起见,这里可以明确地阐述各种单数/复数置换。不定冠词“一”不排除多个。单个处理器或其他单元可以实现权利要求中记载的若干项目的功能。在相互不同的从属权利要求中记载了某些措施这一事实并不表示这些措施的组合不能被有利地使用。权利要求中的任何附图标记不应被解释为限制范围。

[0135] 本领域技术人员将会理解,一般而言,本文中使用的术语通常旨在作为“开放”术语(例如,术语“包含”应当被解释为“包括但不限于”,术语“具有”应该被解释为“至少具有”,术语“包括”应当被解释为“包括但不限于”等)。本领域技术人员将会进一步理解,如果打算引用权利要求陈述的具体数目,则这样的意图将在权利要求中明确地叙述,并且在没有这种陈述的情况下,不存在这样的意图。例如,作为对理解的帮助,以下所附权利要求可包含介绍性短语“至少一个”和“一个或多个”的使用以引入权利要求陈述。然而,这些短语的使用不应被解释为暗示由不定冠词“一”引入的权利要求表述将包含这种引入的权利要求表述的任何特定权利要求限制为仅包含一个这种表述的实施方式,即使当相同权利要求包括介绍性短语“一个或多个”或“至少一个”以及诸如“一”的不定冠词(例如,“一”应典型地解释为意指“至少一个”或“一个或多个”);对于使用用于引入权利要求陈述的定冠词也是如此。此外,即使明确列举了特定数量的引入的权利要求列举,本领域技术人员将认识到,这种列举通常应该被解释为意指至少所列举的数量(例如,“两个叙述”的纯粹叙述,没有其他修饰语,通常意味着至少两个叙述,或者两个或更多个叙述)。此外,在惯例类似于“A、B和C等中的至少一个”的那些情况下,一般而言,这样的构造意指本领域技术人员将理解该惯例的意义(例如,“具有A、B或C中的至少一个的系统”将包含但不限于以下系统,其具有:单独A、单独B、单独C、A和B一起、A和C一起、B和C一起、和/或A、B和C一起等)。在惯例类似于“A、B或C等中的至少一个”的那些情况下,一般来说,这种结构的意图是,本领域技术人员将理解该惯例(例如,“具有A、B或C中的至少一个的系统”将包含但不限于以下系统,其具有:单独A、单独B、单独C、A和B一起、A和C一起、B和C一起、和/或A、B和C一起等)。本领域技术人员将会进一步理解,无论是在说明书,权利要求书还是附图中,实际上任何呈现两个或更多个替代术语的分离性词语和/或短语应当被理解为预期包括术语中的一个,任何一个术语或两个术语的可能性。例如,短语“A或B”将被理解为包含“A”或“B”或“A和B”的可能性。

[0136] 在说明书和权利要求中使用的表示成分的量,反应条件等的所有数字应被理解为

在所有情况下被术语“约”修饰。因此,除非有相反指示,否则说明书和所附权利要求书中提出的数值参数是近似值,其可以根据本发明试图获得的期望性质而变化。至少,而不是试图限制权利要求范围的等同原则的应用,应根据有效数字的数量和普通舍入方法来解释每个数字参数。

[0137] 本文公开的方法包括用于实现所述方法的一个或多个步骤或动作。在不脱离权利要求的范围的情况下,方法步骤和/或动作可以彼此互换。换句话说,除非为了正在描述的方法的正确操作而需要特定的步骤或动作顺序,否则在不脱离权利要求的范围的情况下,可以修改具体步骤和/或动作的顺序和/或使用。

[0138] 应当注意,这里使用的术语“连接(couple)”、“连接(coupling)”、“连接(coupled)”或单词的其他变体可以指示间接连接或直接连接。例如,如果第一分量“连接(couple)”到第二分量,则第一分量可以间接或直接连接到第二分量。如本文使用的,属于“多个”表示两个或多个。例如,多个组件表示两个或多个组件。

[0139] 术语“确定”涵盖各种各样的动作,因此,“确定”可以包含演算、计算、处理、派生、调查、查找(例如,在表、数据库或其他数据结构中查找),查明等。而且,“确定”可以包含接收(例如,接收信息)、访问(例如,访问存储器中的数据)等。而且,“确定”可以包含解决、筛选、选择、建立等。

[0140] 除非另有明确规定,否则短语“基于”并不意味着“仅基于”。换句话说,短语“基于”描述“仅基于”和“至少基于”。

[0141] 在前面的描述中,给出了具体细节以提供对示例的全面理解。然而,本领域普通技术人员将会理解,可以在没有这些具体细节的情况下实践这些示例。例如,电子组件/设备可以以框图的方式示出以免不必要的细节混淆示例。在其他情况下,可以详细示出这些组件、其他结构和技术以进一步解释示例。

[0142] 还要注意的,这些示例可以被描述为过程,其被描绘为流程图、进程图、有限状态图、结构图或框图。尽管流程图可以将操作描述为顺序过程,但是许多操作可以并行或同时执行,并且可以重复该进程。另外,操作的顺序可以重新排列。进程在其操作完成时终止。进程可以对应于方法、函数、过程、子例程、子程序等。当进程对应于软件函数时,其终止对应于该函数返回到调用函数或主函数。

[0143] 提供所公开的实施方式的先前描述以使得本领域的任何技术人员能够制作或使用本发明。对于本领域技术人员来说,对这些实施方式的各种修改将是显而易见的,并且在不脱离本发明的精神或范围的情况下,可将本文中定义的一般原理应用于其他实施方式。因此,本发明并不旨在限于本文中所展示的实施方案,而是应被赋予与本文中所揭示的原理和新颖特征一致的最广泛范围。

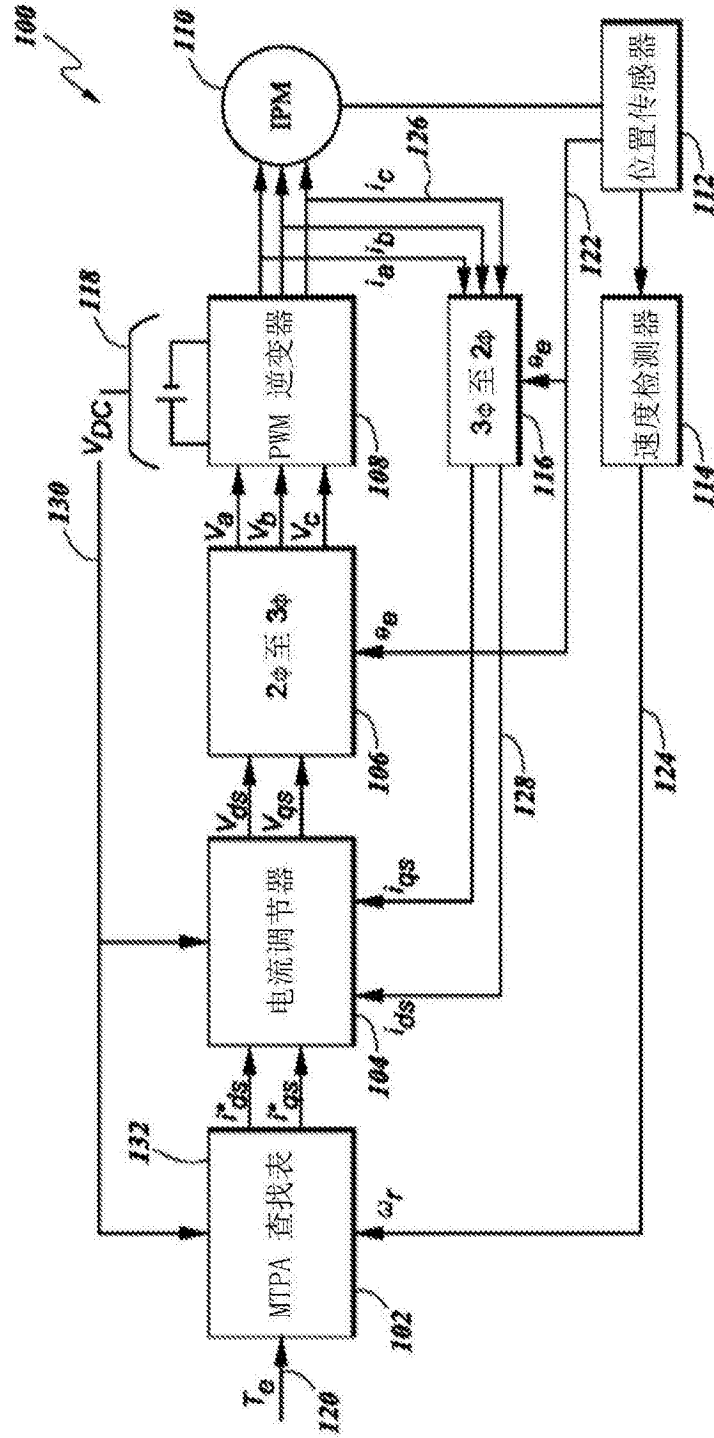


图1

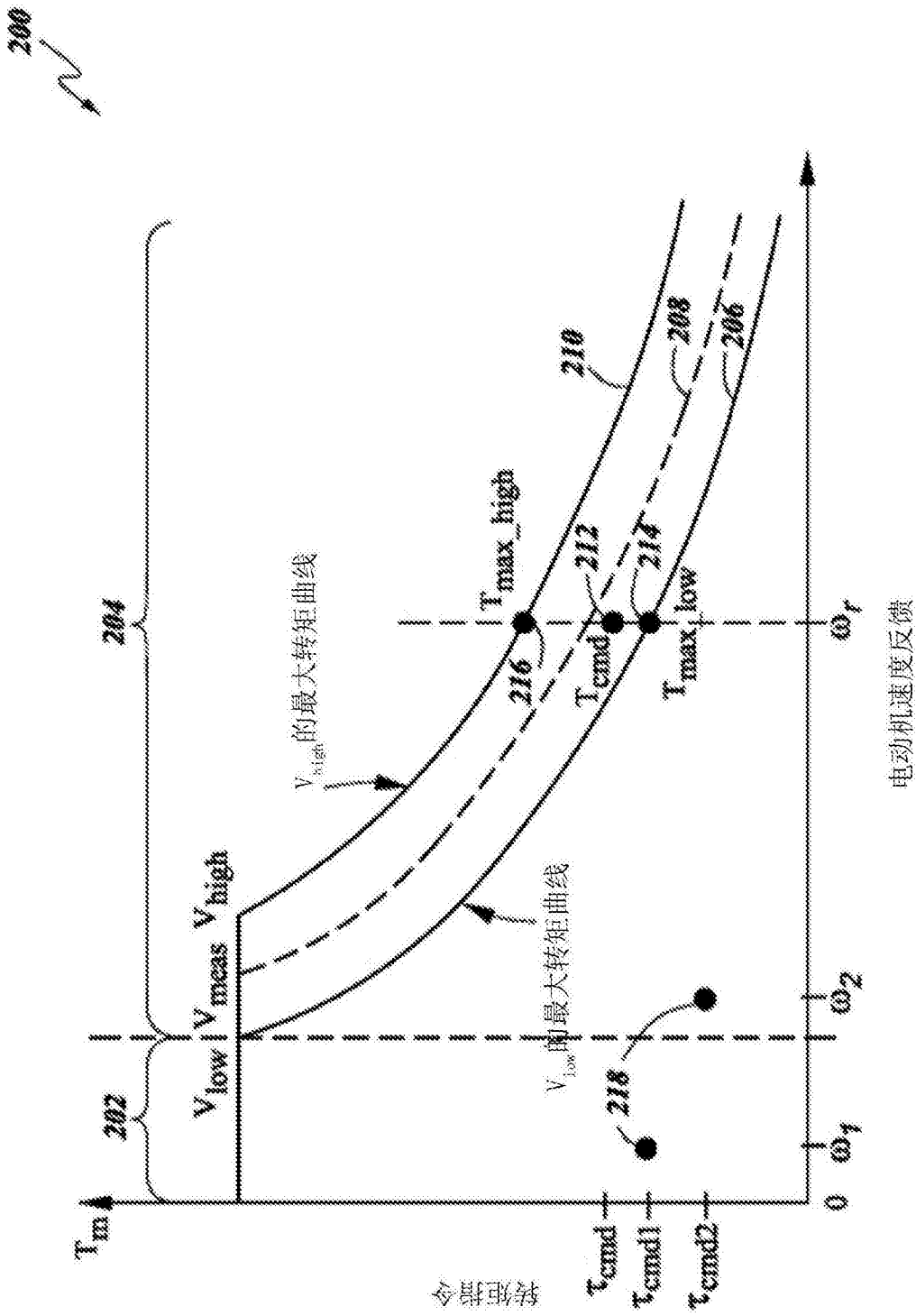


图2A

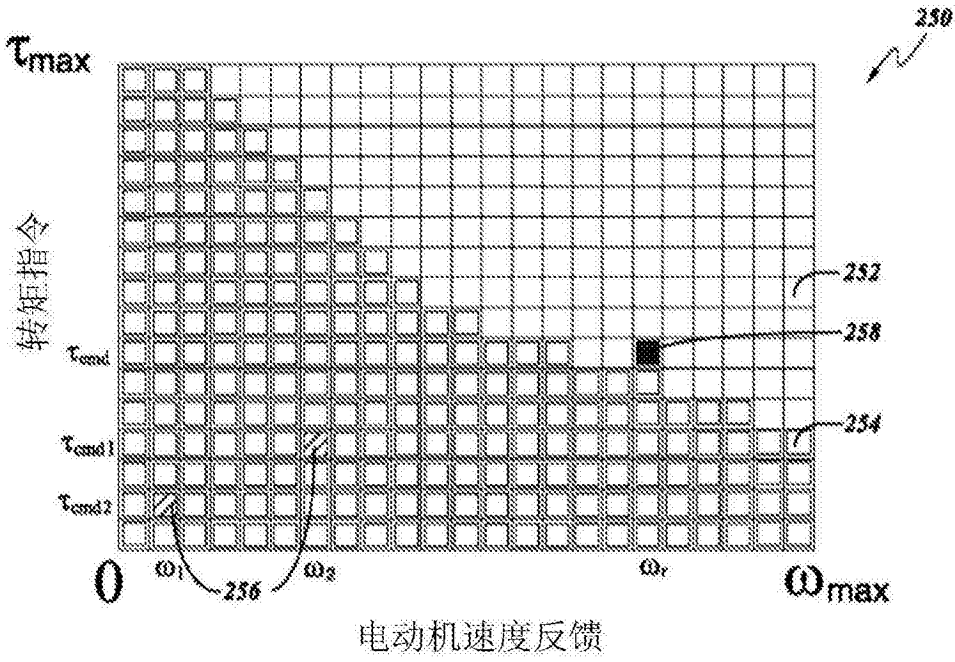


图2B

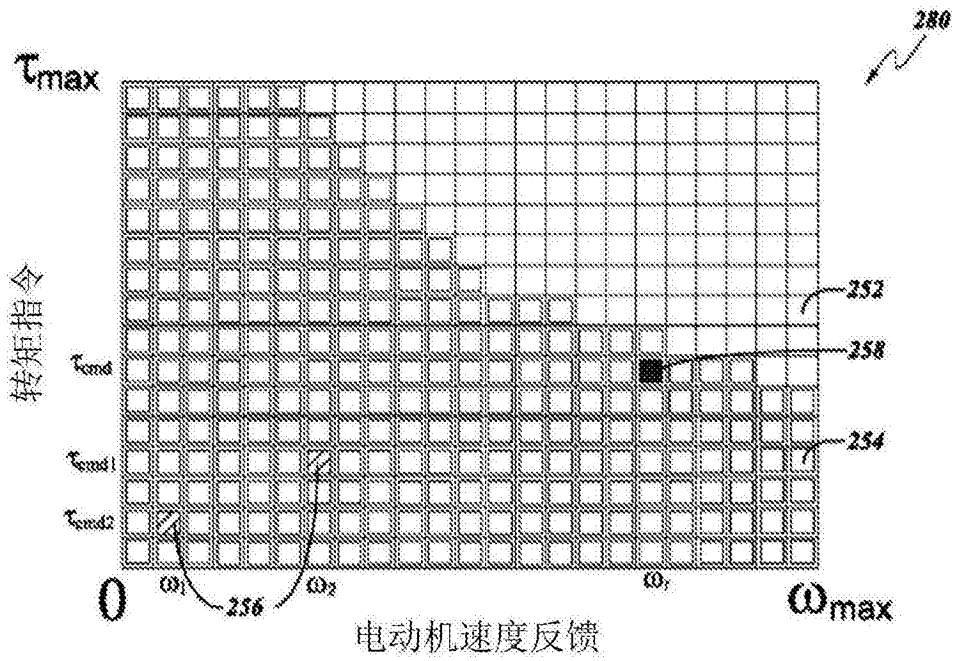


图2C



400

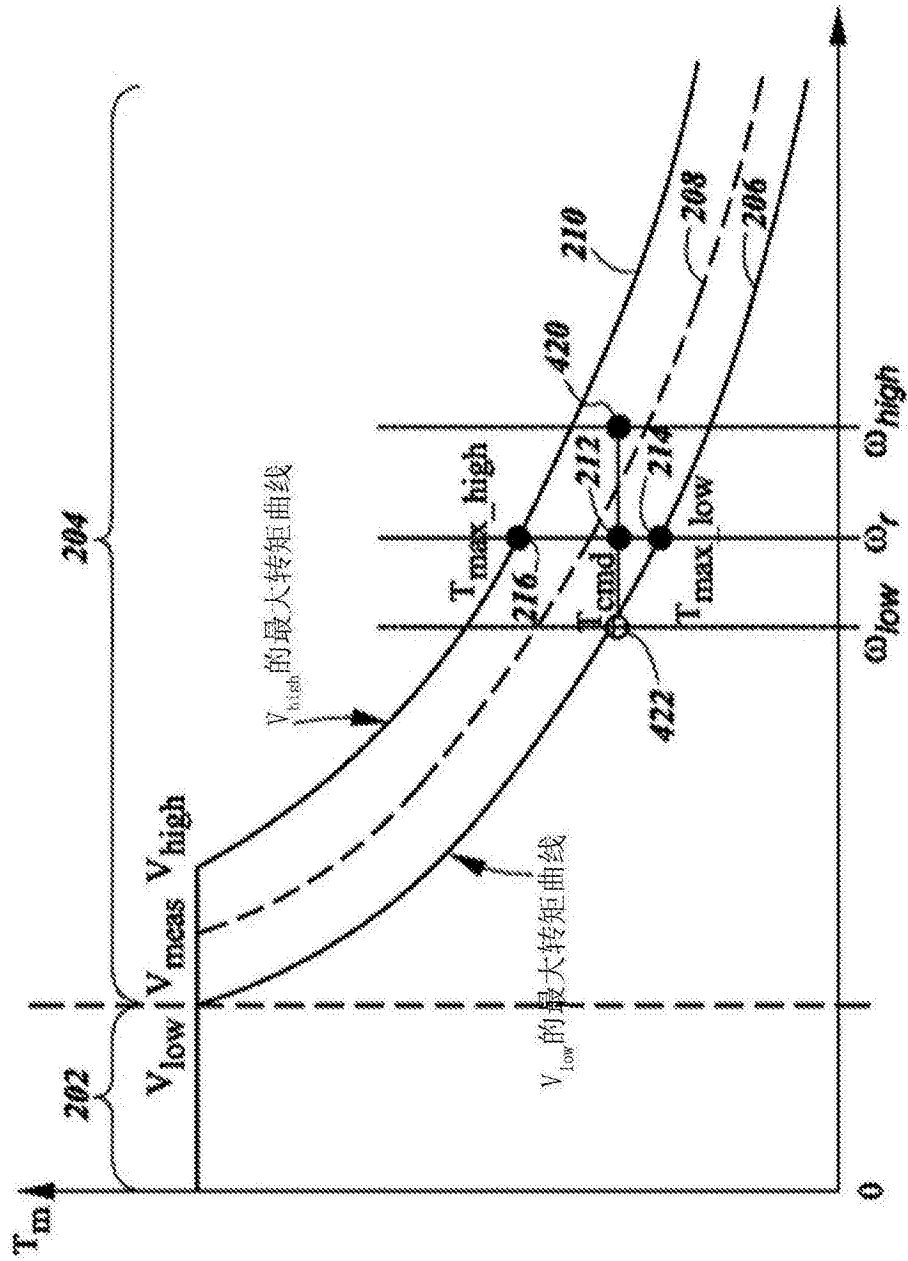


图4A



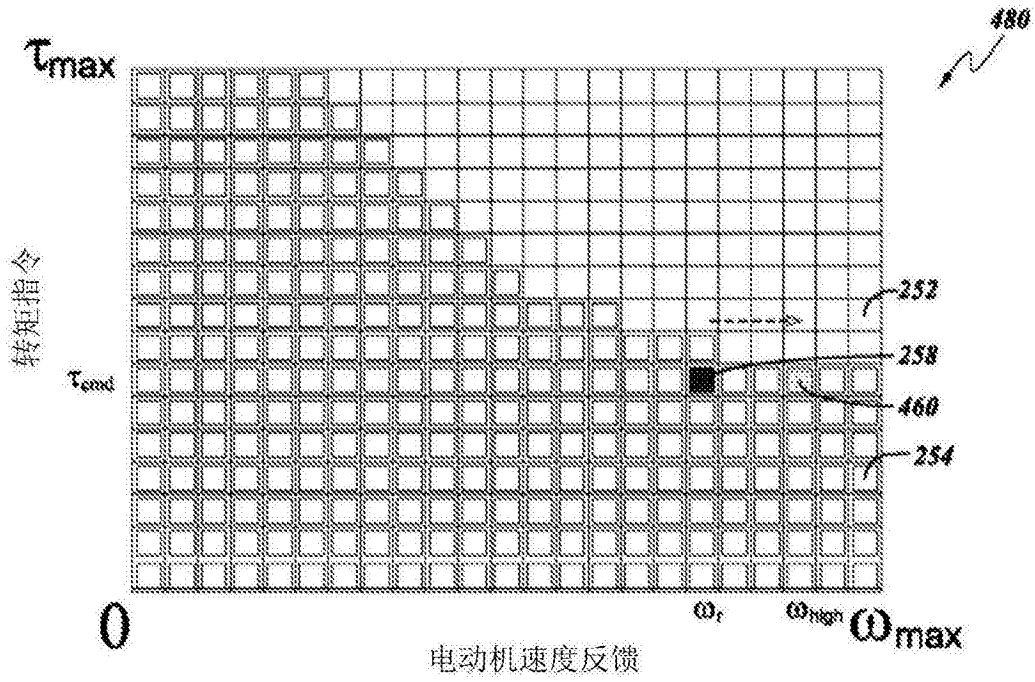


图4B

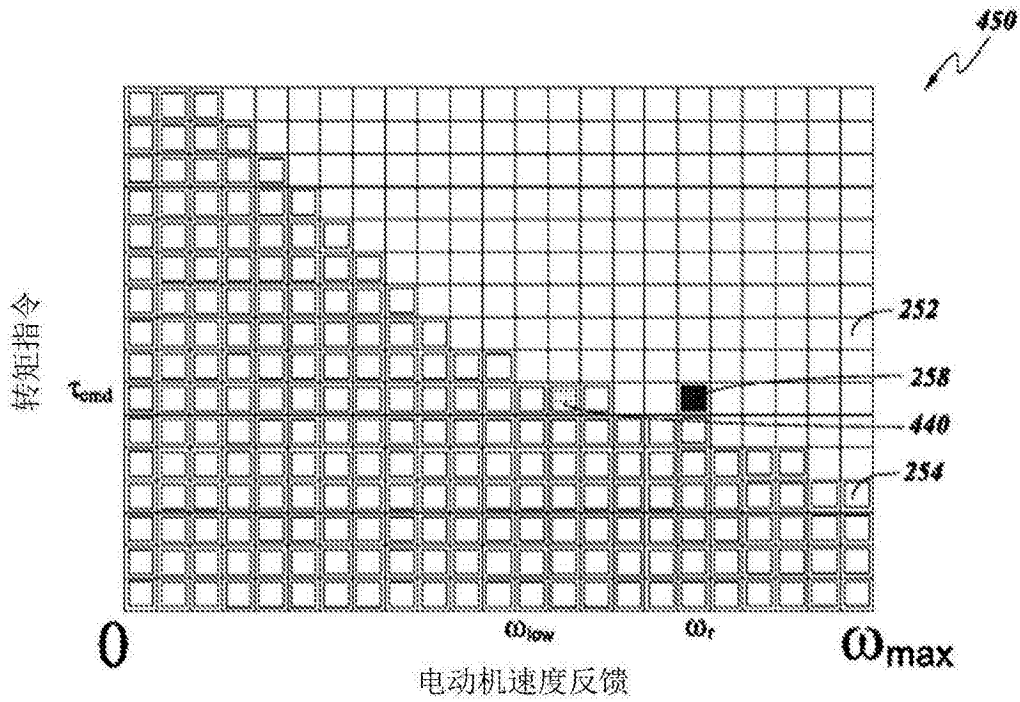


图4C

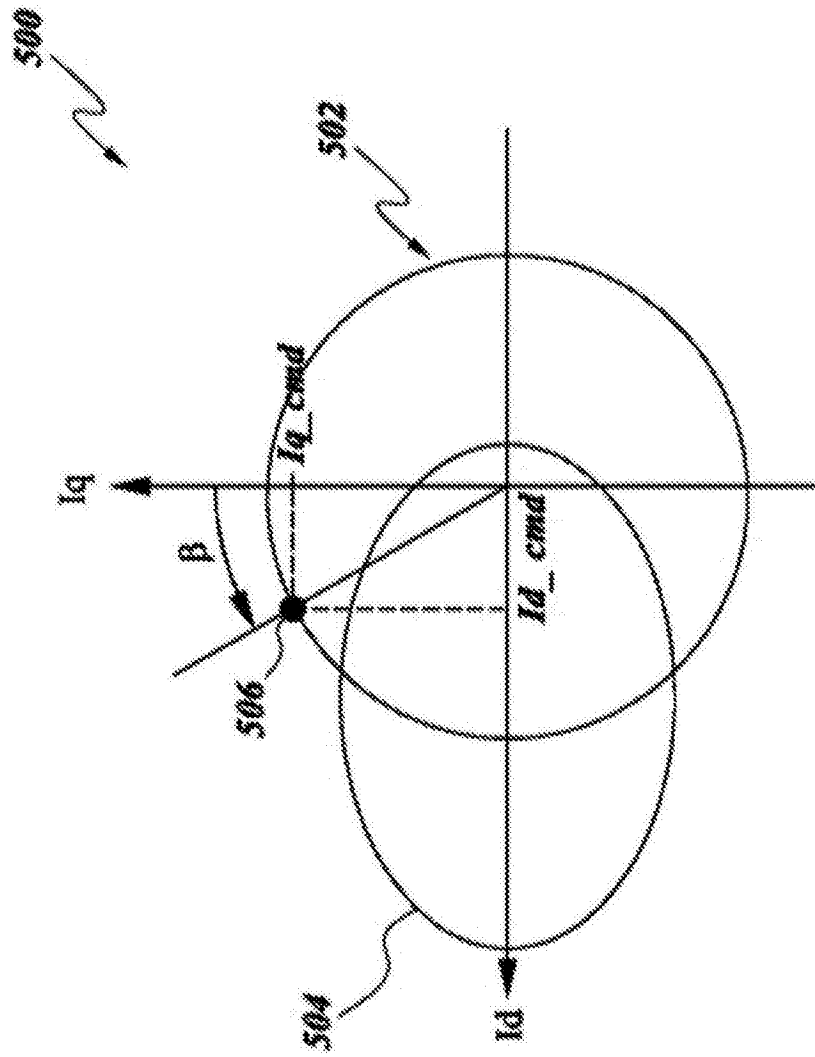


图5

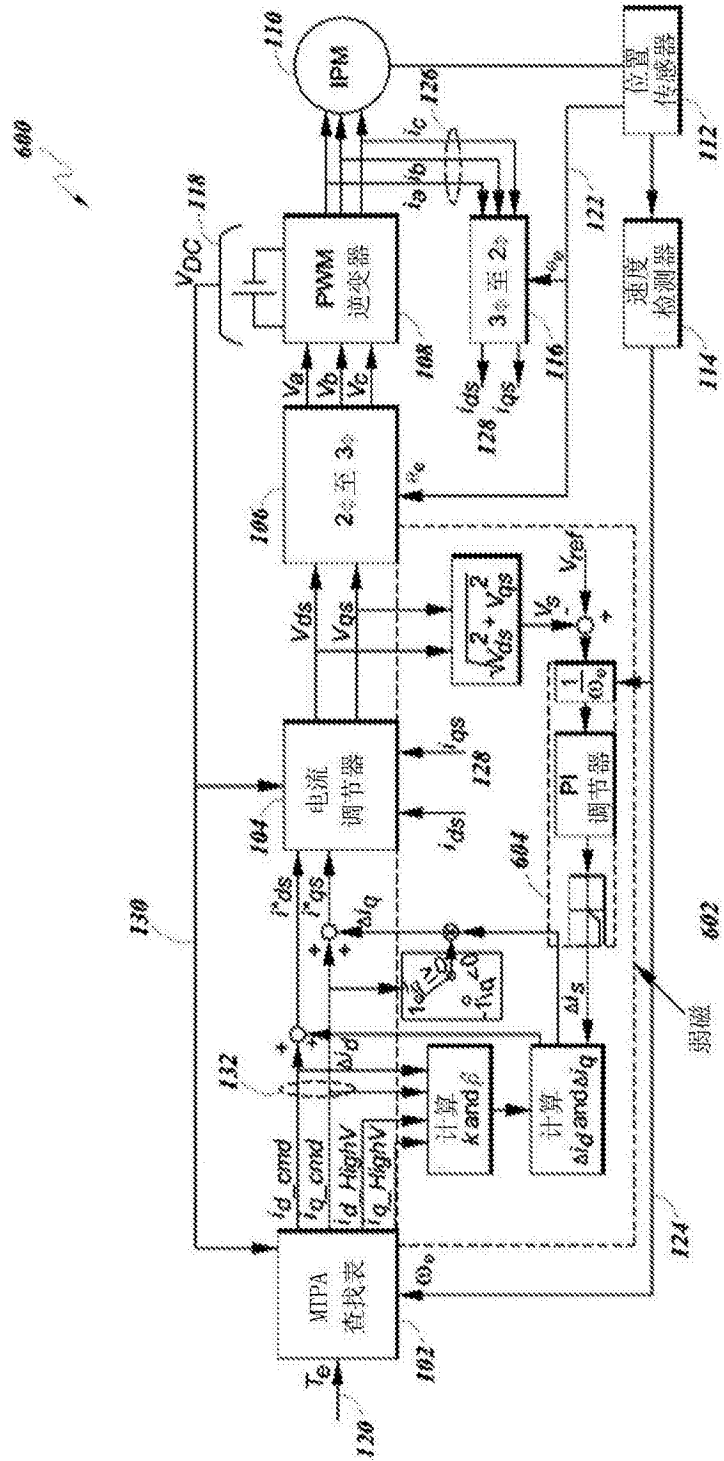


图6

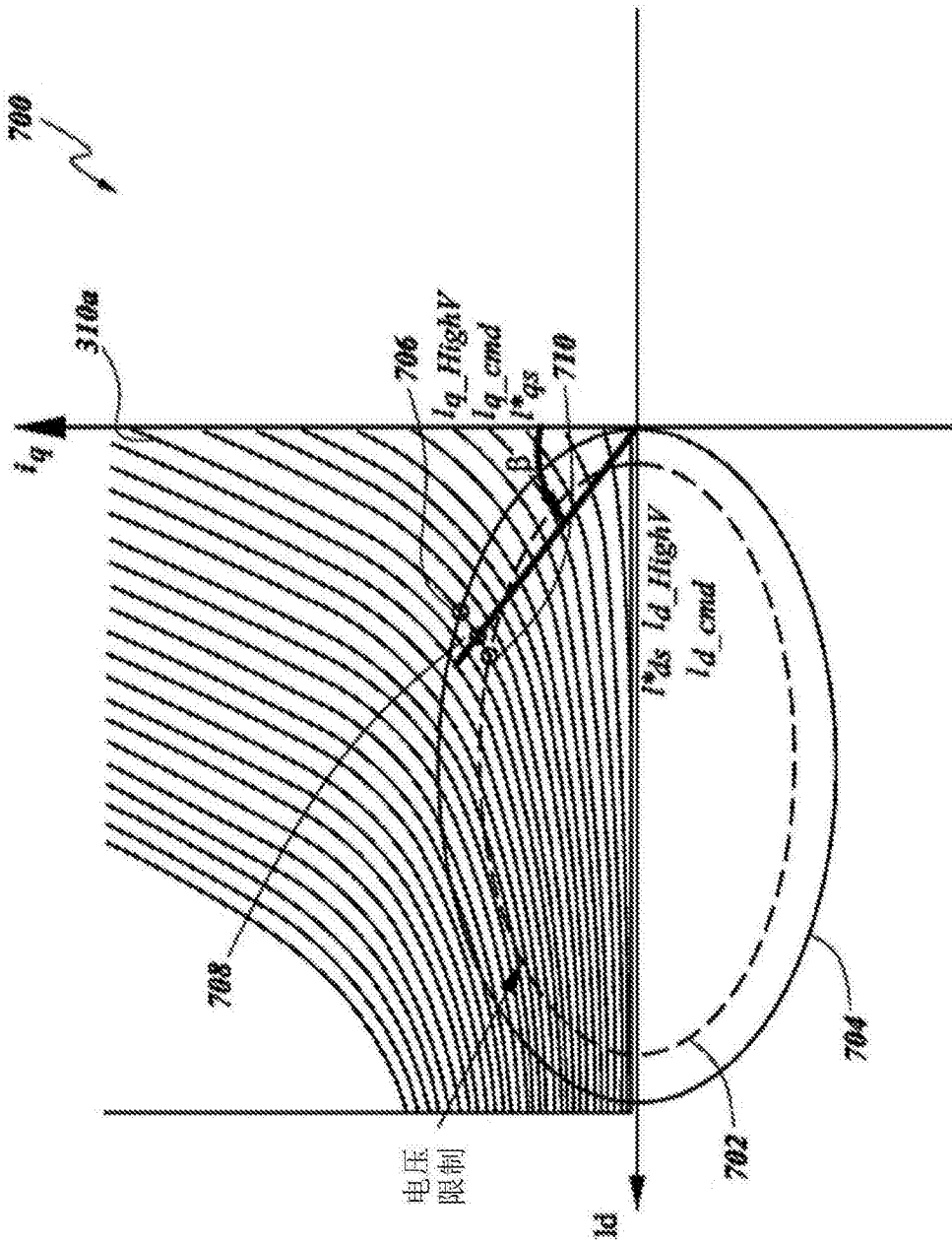


图7