



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 120019567 A

(43) 申请公布日 2025. 05. 16

(21) 申请号 202480004283.9

(22) 申请日 2024.05.10

(30) 优先权数据

2023-087133 2023.05.26 JP

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2025.04.03

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/JP2024/017489 2024.05.10

(87) PCT国际申请的公布数据

W02024/247667 JA 2024.12.05

(71) 申请人 恩斯克转向及控制公司

地址 日本东京都

(72) 发明人 吉田圭太 泽田英树

(74) 专利代理机构 北京三友知识产权代理有限公司 11127

专利代理师 曹磊 欧阳柳青

(51) Int.Cl.

H02P 27/08 (2006.01)

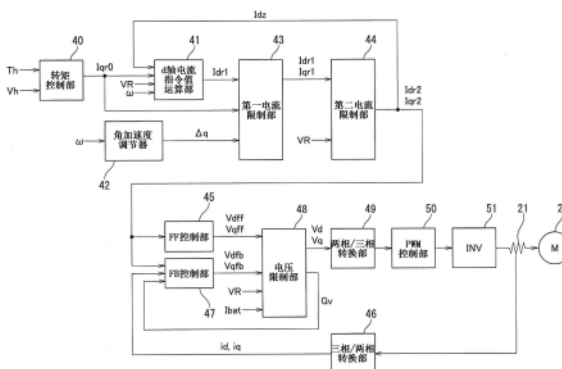
权利要求书3页 说明书16页 附图9页

(54) 发明名称

马达控制装置以及电动助力转向装置

(57) 摘要

抑制高负载状态下的占空比的饱和、高转速区域中的占空比的减少。马达控制装置具备:d轴电流指令值运算部(41),其设定磁场削弱用的第一d轴电流指令值;第一电流限制部(43),其设置于d轴电流指令值运算部(41)的后级,以满足马达额定电流的条件的方式限制基本q轴电流指令值,运算出第一q轴电流指令值;第二电流限制部(44),其设置于第一电流限制部(43)的后级,以满足不超过电池允许上限电流的方式限制第一d轴电流指令值和第一q轴电流指令值,运算出第二d轴电流指令值和第二q轴电流指令值;电压指令值运算部(45、47),其基于第二d轴电流指令值和第二q轴电流指令值运算出电压指令值;以及电压限制部(48),其限制电压指令值来抑制占空比的饱和。



1. 一种马达控制装置,其特征在于,  
所述马达控制装置具备:  
转矩控制部,其设定用于控制马达的产生转矩的基本q轴电流指令值;  
d轴电流指令值运算部,其基于所述基本q轴电流指令值和所述马达的转速,设定磁场削弱用的第一d轴电流指令值;  
第一电流限制部,其设置于所述d轴电流指令值运算部的后级,通过以使所述马达的驱动电流不超过所述马达的额定电流的方式根据所述第一d轴电流指令值来限制所述基本q轴电流指令值,由此运算出第一q轴电流指令值;  
第二电流限制部,其设置于所述第一电流限制部的后级,通过以使电池的输出电流不超过规定的允许上限的方式分别限制所述第一d轴电流指令值和所述第一q轴电流指令值,由此运算出第二d轴电流指令值和第二q轴电流指令值;  
电压指令值运算部,其基于所述第二d轴电流指令值和所述第二q轴电流指令值,运算出第一d轴电压指令值和第一q轴电压指令值;  
电压限制部,其通过以抑制基于所述第一d轴电压指令值和所述第一q轴电压指令值的PWM控制的占空比饱和的方式分别限制所述第一d轴电压指令值和所述第一q轴电压指令值,由此运算出第二d轴电压指令值和第二q轴电压指令值;以及  
驱动电路,其基于所述第二d轴电压指令值和所述第二q轴电压指令值,对所述马达进行驱动。
2. 根据权利要求1所述的马达控制装置,其特征在于,  
所述d轴电流指令值运算部根据如下的q轴电流指令值运算出所述第一d轴电流指令值:该q轴电流指令值是基于所述第二d轴电流指令值的过去值以使所述马达的驱动电流不超过所述马达的额定电流的方式限制所述基本q轴电流指令值而得到的。
3. 根据权利要求1所述的马达控制装置,其特征在于,  
所述d轴电流指令值运算部根据如下的q轴电流指令值运算出所述第一d轴电流指令值:该q轴电流指令值是基于所述第二d轴电流指令值的过去值以使所述电池的输出电流不超过所述允许上限的方式限制所述基本q轴电流指令值而得到的。
4. 根据权利要求1所述的马达控制装置,其特征在于,  
所述d轴电流指令值运算部基于所述马达的转速来限制所述第一d轴电流指令值的上限。
5. 根据权利要求1所述的马达控制装置,其特征在于,  
所述电压限制部具备:  
电压上限值设定部,其设定作为所述马达的施加电压的上限值的电压上限值;以及  
电压限制增益设定部,其设定与所述电压上限值对应的电压限制增益,  
所述电压限制部通过根据所述电压限制增益分别限制所述第一d轴电压指令值和所述第一q轴电压指令值,由此运算出第二d轴电压指令值和第二q轴电压指令值。
6. 根据权利要求5所述的马达控制装置,其特征在于,  
所述电压上限值设定部基于向作为多相马达的所述马达的多相电压指令值叠加三次谐波而产生的电压利用效率提高量、由死区时间引起的电压下降、由死区时间补偿引起的马达端子电压相对于占空比的比率的下降量中的至少一个,设定电压上限值。

7. 根据权利要求5所述的马达控制装置,其特征在于,

所述电压限制部具备干扰电压抑制部,该干扰电压抑制部输出对所述第一d轴电压指令值与第一延迟元件的输出的和乘以所述电压限制增益而得到的第一相乘结果、以及对所述第一q轴电压指令值与第二延迟元件的输出的和乘以所述电压限制增益而得到的第二相乘结果,并且将所述第一相乘结果和所述第二相乘结果分别输入所述第一延迟元件以及所述第二延迟元件,所述电压限制部输出包含所述第一相乘结果的所述第二d轴电压指令值和包含所述第二相乘结果的所述第二q轴电压指令值。

8. 根据权利要求7所述的马达控制装置,其特征在于,

所述电压限制增益设定部基于所述电压上限值、所述第一d轴电压指令值与所述第一延迟元件的输出的所述和、以及所述第一q轴电压指令值与所述第二延迟元件的输出的所述和,设定所述电压限制增益。

9. 根据权利要求7或8所述的马达控制装置,其特征在于,

所述电压指令值运算部输出包含d轴积分分量的所述第一d轴电压指令值和包含q轴积分分量的所述第一q轴电压指令值,基于所述电压限制增益来抑制所述d轴积分分量和所述q轴积分分量,其中,所述d轴积分分量是所述马达的驱动电流的d轴电流的检测值相对于所述第二d轴电流指令值的偏差的积分分量,所述q轴积分分量是所述马达的驱动电流的q轴电流的检测值相对于所述第二q轴电流指令值的偏差的积分分量。

10. 根据权利要求7或8所述的马达控制装置,其特征在于,

所述第一d轴电压指令值包含:前馈d轴电压指令值,其通过基于所述第二d轴电流指令值的前馈控制而运算出;以及反馈d轴电压指令值,其通过基于所述马达的驱动电流的d轴电流的检测值相对于所述第二d轴电流指令值的偏差的反馈控制而运算出,

所述第一q轴电压指令值包含:前馈q轴电压指令值,其通过基于所述第二q轴电流指令值的前馈控制而运算出;以及反馈q轴电压指令值,其通过基于所述马达的驱动电流的q轴电流的检测值相对于所述第二q轴电流指令值的偏差的反馈控制而运算出,

所述干扰电压抑制部输出对所述反馈d轴电压指令值与所述第一延迟元件的输出的和乘以所述电压限制增益而得到的所述第一相乘结果、以及对所述反馈q轴电压指令值与所述第二延迟元件的输出的和乘以所述电压限制增益而得到的所述第二相乘结果,并且将所述第一相乘结果和所述第二相乘结果分别输入所述第一延迟元件和所述第二延迟元件,

所述电压限制增益设定部基于所述电压上限值、“所述反馈d轴电压指令值及所述第一延迟元件的输出与所述前馈d轴电压指令值”的和、以及“所述反馈q轴电压指令值及所述第二延迟元件的输出与所述前馈q轴电压指令值”的和,设定所述电压限制增益,

所述电压限制部输出包含第三相乘结果和所述第一相乘结果的所述第二d轴电压指令值,并且输出包含第四相乘结果和所述第二相乘结果的所述第二q轴电压指令值,其中,该第三相乘结果是对所述前馈d轴电压指令值乘以所述电压限制增益而得到的,该第四相乘结果是对所述前馈q轴电压指令值乘以所述电压限制增益而得到的。

11. 一种电动助力转向装置,其特征在于,

所述电动助力转向装置具备:

权利要求1所述的马达控制装置;以及

由所述马达控制装置控制的马达,

所述电动助力转向装置通过所述马达对车辆的转向系统赋予转向辅助力。

## 马达控制装置以及电动助力转向装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及马达控制装置以及电动助力转向装置。

### 背景技术

[0002] 控制电动马达的马达控制装置有时需要对控制输出进行校正。例如,搭载于电动助力转向装置的马达控制装置根据系统要件、顾客要求对控制输出进行校正。在下述专利文献1中提出了一种马达控制装置,其避免马达的PWM控制的占空饱和(即电压指令值超过能够施加于驱动电路的最大电压的状态),并且将d轴电流限制为任意的值。

[0003] 现有技术文献

[0004] 专利文献

[0005] 专利文献1:国际公开第2020/095479号小册子

### 发明内容

[0006] 发明所要解决的课题

[0007] 在上述专利文献1的马达控制装置中产生在高负载状态下占空饱和而在高转速区域中占空比减少等课题。

[0008] 本发明是鉴于上述情况而完成的,其目的在于,抑制马达控制装置的与控制输出的校正相伴的高负载状态下的占空比的饱和以及高转速区域中的占空比的减少。

[0009] 用于解决课题的手段

[0010] 为了实现上述目的,本发明的一个方式的马达控制装置具备:转矩控制部,其设定用于控制马达的产生转矩的基本q轴电流指令值;以及d轴电流指令值运算部,其基于基本q轴电流指令值和马达的转速来设定磁场削弱用的第一d轴电流指令值;第一电流限制部,其设置于d轴电流指令值运算部的后级,通过以使马达的驱动电流不超过马达的额定电流的方式根据第一d轴电流指令值来限制基本q轴电流指令值,运算出第一q轴电流指令值;第二电流限制部,其设置于第一电流限制部的后级,通过以使电池的输出电流不超过规定的允许上限的方式分别限制第一d轴电流指令值和第一q轴电流指令值,运算出第二d轴电流指令值和第二q轴电流指令值;电压指令值运算部,其基于第二d轴电流指令值和第二q轴电流指令值,运算出第一d轴电压指令值和第一q轴电压指令值;电压限制部,其通过以抑制基于第一d轴电压指令值和第一q轴电压指令值的PWM控制的占空比饱和的方式分别限制第一d轴电压指令值和第一q轴电压指令值,运算出第二d轴电压指令值和第二q轴电压指令值;以及驱动电路,其基于第二d轴电压指令值和第二q轴电压指令值对马达进行驱动。

[0011] 本发明的另一方式的电动助力转向装置通过由上述的马达控制装置控制的马达,对车辆的转向系统赋予转向辅助力。

[0012] 发明效果

[0013] 根据本发明,能够抑制马达控制装置的与控制输出的校正相伴的高负载状态下的占空饱和以及高转速区域中的占空比的减少。

## 附图说明

- [0014] 图1是表示实施方式的电动助力转向装置的一例的概要的结构图。
- [0015] 图2是表示图1所记载的控制器功能结构的一例的框图。
- [0016] 图3是表示d轴电流指令值运算部的功能结构的一例的框图。
- [0017] 图4的(a)是表示由励磁电流限制部设定的d轴电流上限值的一例的设定例的图,(b)是d轴电流指令值的限制的一例的时序图。
- [0018] 图5是表示反馈(FB)控制部的功能结构的一例的框图。
- [0019] 图6是表示电压限制部的功能结构的一例的框图。
- [0020] 图7是表示电压上限值设定部的功能结构的一例的框图。
- [0021] 图8的(a)和(b)是第一判定增益的设定例的第一例以及第二例的示意图,(c)和(d)是第二判定增益的设定例的第一例以及第二例的示意图。
- [0022] 图9是实施方式的马达控制方法的一例的流程图。
- [0023] 图10是表示使用本发明的马达控制装置的直动工作台装置的一例的概要的结构图。

## 具体实施方式

[0024] 参照附图,对本发明的实施方式进行详细说明。另外,以下所示的本发明的实施方式例示了用于将本发明的技术思想具体化的装置、方法,但本发明的技术思想并不将构成部件的结构、配置等限定于下述内容。本发明的技术思想能够在权利要求书所记载的技术方案所规定的技术范围内施加各种变更。

[0025] (结构)

[0026] 图1是表示实施方式的电动助力转向装置的一例的概要的结构图。方向盘(转向手柄)1的转向轴(操舵轴、手柄轴)2经由构成减速机构的减速齿轮(蜗轮)3、万向接头4a、4b、小齿轮齿条机构5、横拉杆6a、6b,进而经由轮毂单元7a、7b与转向车轮8L、8R连结。

[0027] 小齿轮齿条机构5具有与从万向接头4b传递来转向力的小齿轮轴连结的小齿轮5a和与该小齿轮5a啮合的齿条5b,通过齿条5b将传递到小齿轮5a的旋转运动转换为车宽方向的直线运动。

[0028] 在转向轴2设置有检测转向转矩 $T_h$ 的转矩传感器10。另外,在转向轴2设置有检测方向盘1的转向角 $\theta_h$ 的转向角传感器14。

[0029] 另外,对方向盘1的转向力进行辅助的马达20经由减速齿轮3与转向轴2连结。从电池13向控制电动助力转向(EPS:Electric Power Steering)装置的控制器30供给电力,并且经由点火(IGN)键11输入点火键信号。

[0030] 马达20是多相交流马达,通过控制器30的矢量控制而被驱动。在本实施方式中例示出马达20是三相交流马达的情况。

[0031] 控制器30是基于转矩传感器10检测出的转向转矩 $T_h$ 、车速传感器12检测出的车速 $V_h$ 、以及转向角传感器14检测出的转向角 $\theta_h$ 来进行辅助控制指令的电流指令值的运算并通过对电流指令值实施了补偿等而得的电压指令值 $V_{ref}$ 来控制向马达20供给的电流的电子控制单元(ECU:Electronic Control Unit)。

[0032] 此外,转向角传感器14不是必须的,可以将检测马达20的旋转轴的旋转角度的

旋转角度传感器得到的旋转角度与转矩传感器10的扭杆的扭转角相加来计算出转向角 $\theta_h$ 。

[0033] 另外,也可以使用转向车轮8L、8R的转向角来代替转向角 $\theta_h$ 。例如可以通过检测齿条5b的位移量来检测转向角。

[0034] 控制器30例如可以具备包括处理器和存储装置等周边部件的计算机。处理器可以是例如CPU(Central Processing Unit:中央处理单元)或MPU(Micro-Processing Unit:微处理单元)。

[0035] 存储装置可以具备半导体存储装置、磁存储装置以及光学存储装置中的任意者。存储装置可以包括寄存器、高速缓冲存储器、用作主存储装置的ROM(Read Only Memory:只读存储器)以及RAM(Random Access Memory:随机存取存储器)等存储器。

[0036] 以下说明的控制器30的功能例如通过控制器30的处理器执行保存于存储装置的计算机程序来实现。

[0037] 此外,可以通过用于执行以下说明的各信息处理的专用的硬件来形成控制器30。

[0038] 例如,控制器30可以具备在通用的半导体集成电路中设定的功能性的逻辑电路。例如,控制器30可以具有现场可编程门阵列(FPGA:Field-Programmable Gate Array)等可编程逻辑器件(PLD:Programmable Logic Device)等。

[0039] 接下来,对控制器30执行的马达20的控制输出的限制功能的课题进行说明。马达20的控制输出的限制功能是以以下情况为目的而开发的:(1)计算出用于满足转向车轮的转向角相对于方向盘的转向的追随性能要求的弱励磁电流量;(2)满足系统电流上限、电池电流上限;以及(3)防止占空饱和。

[0040] 然而,在上述专利文献1的马达控制装置中存在下述的课题1以及课题2。

[0041] (课题1)在高负载状态下有时无法防止占空饱和。

[0042] (课题2)在高转速区域中有时会发生占空比的减少。

[0043] 因此,实施方式的马达控制装置的目的在于解决这些课题1和课题2。

[0044] 进而,在实施方式的马达控制装置中,除了课题1以及课题2以外,还以解决下述的课题3以及课题4为目的。

[0045] (课题3)如后所述,在实施方式的马达控制装置中,在马达电流的反馈控制中使用积分器,因此积分值有可能被过剩地累积。

[0046] (课题4)随着最近的高输出化要求,具有低电感、低惯性的马达的使用普及起来。因此,需要针对由于高速旋转时的反电动势引起的过电流的对策手段。

[0047] 在本发明中,针对上述课题1~课题4,基于以下的方针构成解决手段。

[0048] 认为高负载状态下的占空饱和(课题1)的主要原因在于,由马达电流的反馈控制的稳定偏差或过渡特性引起的误差、进行电流限制的位置不适当、在电流维度中要施加占空维度的限制等。因此,通过电压指令值的限制来实现占空饱和的防止。

[0049] 认为高转速区域中的占空比的减少(课题2)的主要原因在于,q轴电流指令值的过度限制。因此,修改q轴电流指令值的限制方法而优先限制q轴电流指令值。

[0050] 针对马达电流的反馈控制中的积分值的过剩的累积(课题3),新追加抗饱和功能。

[0051] 作为过电流对策(课题4),通过在高速旋转时流过尽可能大的d轴电流指令值,利用弱磁场来降低反电动势。为了尽可能地流过d轴电流指令值,优先限制q轴电流指令值。

[0052] 为了实现这些对应方针,本发明的发明人进行了控制器30的各功能结构的重构以

及配置变更。图2是表示控制器30的功能结构的一例的框图。控制器30具备转矩控制部40、d轴电流指令值运算部41、角加速度调节器42、第一电流限制部43、第二电流限制部44、前馈(FE)控制部45、三相/两相转换部46、反馈(FB)控制部47、电压限制部48、两相/三相转换部49、PWM(Pulse Width Modulation:脉宽调制)控制部50以及变换器(INV)51。

[0053] 转矩控制部40至少基于转向转矩 $T_h$ 和车速 $V_h$ ,运算出作为用于控制马达20的产生转矩的电流指令值的基本q轴电流指令值 $I_{qr0}$ 。

[0054] d轴电流指令值运算部41基于基本q轴电流指令值 $I_{qr0}$ 、马达20的转速 $\omega$ 、由电池13供给的电源电压 $V_R$ ,设定出磁场削弱用的第一d轴电流指令值 $I_{dr1}$ 。

[0055] 图3是表示d轴电流指令值运算部41的功能结构的一例的框图。d轴电流指令值运算部41具备电流指令值设定部41a、励磁电流指令值运算部41b以及励磁电流限制部41c。

[0056] 电流指令值设定部41a基于基本q轴电流指令值 $I_{qr0}$ 、转速 $\omega$ 、电源电压 $V_R$ 以及d轴电流指令值的过去值 $I_{dz}$ ,设定出用于在后级的励磁电流指令值运算部41b中计算基本d轴电流指令值 $I_{dr0}$ 的q轴电流指令值 $I_{qt}$ 。

[0057] 在此,设定出基本d轴电流指令值 $I_{dr0}$ 适于满足马达20的额定电流的条件和电池13的允许上限电流的条件的q轴电流指令值 $I_{qt}$ 。

[0058] 此外,作为d轴电流指令值的过去值 $I_{dz}$ ,如后所述,可以使用第二电流限制部44运算出的第二d轴电流指令值 $I_{dr2}$ 的过去值(例如在上次的控制周期中运算出的第二d轴电流指令值 $I_{dr2}$ )。

[0059] 在以下的说明中,有时将马达20的额定电流的条件表述为“系统电流限制”,将电池13的允许上限电流的条件表述为“电池电流限制”。

[0060] 关于系统电流限制,电流指令值设定部41a以使d轴电流指令值和q轴电流指令值成为系统最大电流 $I_{max}$ (例如马达的额定电流)以下的方式,按照下式(1)设定针对q轴电流指令值的限制增益 $G_{q1}$ 。

[0061] 另外,在式(1)的运算过程中进行“0”除数防止的处理。另外,以使运算结果不超过1的方式实施限幅处理(0~1)。

[0062] [数学式1]

$$[0063] \quad G_{q1} = \frac{\sqrt{(I_{max})^2 - (I_{dz})^2}}{I_{qr0}} \dots (1)$$

[0064] 关于电池电流限制,电流指令值设定部41a以使从电池13输出的电池电流 $I_{bat}$ 成为规定的允许上限 $I_{batmax}$ 以下的方式设定针对q轴电流指令值的限制增益 $G_{q2}$ 。电流指令值设定部41a以仅使d轴电流指令值不超过允许上限 $I_{batmax}$ 的方式,按照下式(2)设定针对d轴电流指令值的限制增益 $G_{d1}$ 。另外,在式(2)中也实施“0”除数防止处理以及限制处理。

[0065] [数学式2]

$$[0066] \quad G_{d1} = \frac{\sqrt{6R(V_R \cdot I_{batmax} - P_{loss})}}{3 \cdot R \cdot I_{dz}} \dots (2)$$

[0067] 此外,常数 $R$ 表示马达20的各相绕组的电阻值, $P_{loss}$ 表示由铁损、摩擦等引起的损耗。电流指令值设定部41a基于在上式(2)中设定的限制增益 $G_{d1}$ ,通过下式(3)设定针对q轴电流指令值的限制增益 $G_{q2}$ 。此外,常数 $K_t$ 表示马达20的转矩常数。另外,在式(3)中也实施“0”除数防止处理以及限幅处理。

[0068] [数学式3]

$$[0069] \quad Gq2 = \frac{-K_t \omega + \sqrt{(K_t \omega)^2 - (3 \cdot R \cdot Gd1 \cdot Idz)^2 + 6R(VR \cdot Ibatmax - Ploss)}}{3R \cdot Iqr0} \dots (3)$$

[0070] 电流指令值设定部41a将限制增益Gq1、Gq2中较小一方的增益与基本q轴电流指令值Iqr0相乘而运算出q轴电流指令值Iqt = min(Gq1, Gq2) × Iqr0。

[0071] 励磁电流指令值运算部41b基于电流指令值设定部41a所设定的q轴电流指令值Iqt、转速 $\omega$ 和电源电压VR,按照下式(4)计算出作为磁场削弱用的励磁电流指令值的基本d轴电流指令值Idr0。另外,常数L表示马达每1相的电感,常数 $\Psi$ 表示由马达确定的磁通交链数。

[0072] [数学式4]

$$[0073] \quad Idr0 = -\frac{\omega^2 \Psi L}{R^2 + \omega^2 L^2} + \sqrt{\frac{VR^2/3}{R^2 + \omega^2 L^2} - \left\{ Iqt + \frac{R\omega\Psi}{R^2 + \omega^2 L^2} \right\}^2} \dots (4)$$

[0074] 励磁电流限制部41c通过将基本d轴电流指令值Idr0限制为弱磁场电流的方向而运算出第一d轴电流指令值Idr1。

[0075] d轴电流指令值的限制值是考虑转向角相对于方向盘的转向的追随性能的要求与工作声的平衡而决定出的,但在本实施方式中,为了上述课题4(过电流对策)而需要流过尽可能大的d轴电流指令值。

[0076] 因此,励磁电流限制部41c通过将基本d轴电流指令值Idr0限制在d轴电流上限值IdUL以下而运算出第一d轴电流指令值Idr1,并根据转速 $\omega$ 来变更d轴电流上限值IdUL。

[0077] 图4的(a)是表示由励磁电流限制部41c设定的d轴电流上限值IdUL的一例的设定例的图。在转速 $\omega$ 小于阈值 $\omega_{th}$ 的范围内,d轴电流上限值IdUL被设定为比较小的第一限制值Id1,在转速 $\omega$ 为阈值 $\omega_{th}$ 以上的范围内,d轴电流上限值IdUL被设定为比第一限制值Id1大的第二限制值Id2。

[0078] 例如阈值 $\omega_{th}$ 可以将假设在紧急回避等时可能产生的最大转向角速度换算为马达20的转速而设定。由此,能够实现通常转向时的工作声的安静性与紧急回避等时的转向角相对于方向盘的转向的追随性能的平衡。

[0079] 励磁电流限制部41c可以具备限制第一d轴电流指令值Idr1的时间变化的变化率限制器。

[0080] 图4的(b)是第一d轴电流指令值Idr1的限制的一例的时序图。当在时刻t1输入基本d轴电流指令值Idr0时,第一d轴电流指令值Idr1的增加速度被变化率限制器限制而逐渐增加,在时刻t2达到第一限制值Id1。

[0081] 之后,当马达20的转速 $\omega$ 上升而在时刻t3超过阈值 $\omega_{th}$ 时,d轴电流上限值IdUL增加至第二限制值Id2。其结果,第一d轴电流指令值Idr1的增加速度被变化率限制器限制而逐渐增加,在时刻t4达到第二限制值Id2。

[0082] 参照图2。角加速度调节器42基于马达20的转速 $\omega$ 来设定用于抑制转矩变动的q轴电流指令值的补偿值 $\Delta q$ 。

[0083] 第一电流限制部43通过补偿值 $\Delta q$ 来补偿基本q轴电流指令值Iqr0,并以使马达20的驱动电流不超过系统电流限制的方式限制补偿后的基本q轴电流指令值(Iqr0 +  $\Delta q$ ),由

此运算出第一q轴电流指令值Iqr1。

[0084] 具体而言,根据下式(5)设定限制增益Gq3。另外,在式(5)中也实施“0”除数防止处理以及限幅处理。

[0085] [数学式5]

$$[0086] \quad Gq3 = \frac{\sqrt{(I_{max})^2 - (Idr1)^2}}{Iqr0 + \Delta q} \dots (5)$$

[0087] 第一电流限制部43通过对基本q轴电流指令值(Iqr0+Δq)乘以限制增益Gq3而运算出第一q轴电流指令值Iqr1=Gq3×(Iqr0+Δq)。

[0088] 第二电流限制部44以使电池电流Ibat不超过电池电流限制的方式,通过分别限制第一d轴电流指令值Idr1和第一q轴电流指令值Iqr1而运算出第二d轴电流指令值Idr2和第二q轴电流指令值Iqr2。

[0089] 具体而言,按照下式(6)以及(7)来设定针对d轴电流指令值的限制增益Gd2和针对q轴电流指令值的限制增益Gq4。另外,在式(6)以及(7)中也实施“0”除数防止处理以及限制处理。

[0090] [数学式6]

$$[0091] \quad Gd2 = \frac{\sqrt{6R(VR \cdot Ibatmax - Ploss)}}{3 \cdot R \cdot Idr1} \dots (6)$$

$$Gq4 = \frac{-K_t \omega + \sqrt{(K_t \omega)^2 - (3 \cdot R \cdot Gd2 \cdot Idr1)^2 + 6R(VR \cdot Ibatmax - Ploss)}}{3R \cdot Iqr1} \dots (7)$$

[0092] 第二电流限制部44通过对第一d轴电流指令值Idr1乘以限制增益Gd2而运算出第二d轴电流指令值Idr2=Gd2×Idr1,通过对第一q轴电流指令值Iqr1乘以限制增益Gq4而运算出第二q轴电流指令值Iqr2=Gq4×Iqr1。

[0093] FF控制部45通过分别基于第二d轴电流指令值Idr2和第二q轴电流指令值Iqr2的前馈控制而计算出作为针对马达20的电压指令值的FFd轴电压指令值Vdff和FFq轴电压指令值Vqff。

[0094] 例如,FF控制部45可以运算出使d轴与q轴之间相互干扰的干扰电压抵消的dq轴非干扰电压指令值作为FFd轴电压指令值Vdff和FFq轴电压指令值Vqff。

[0095] 另外,例如FF控制部45也可以运算出基于两个自由度控制结构的前馈输出作为FFd轴电压指令值Vdff和FFq轴电压指令值Vqffd轴。

[0096] FFd轴电压指令值Vdff和FFq轴电压指令值Vqff分别是技术方案中记载的“第一d轴电压指令值”和“第一q轴电压指令值”的一例。

[0097] 三相/两相转换部46将由马达电流检测器21检测出的马达20的三相电流的检测值转换为d轴电流id以及q轴电流iq。

[0098] FB控制部47通过基于马达20的驱动电流的d轴电流的检测值id相对于第二d轴电流指令值Idr2的电流偏差ΔId的反馈控制,运算出作为针对马达20的d轴电压指令值的FBd轴电压指令值Vdfb。

[0099] 此外,FB控制部47通过基于马达20的驱动电流的q轴电流的检测值iq相对于第二q轴电流指令值Iqr2的电流偏差ΔIq的反馈控制,运算出作为针对马达20的q轴电压指令值的FBq轴电压指令值Vqfb。

[0100] FBd轴电压指令值Vdfb以及FBq轴电压指令值Vqfb分别是技术方案所记载的“第一d轴电压指令值”以及“第一q轴电压指令值”的一例。

[0101] FB控制部47通过基于电流偏差 $\Delta I_d$ 、 $\Delta I_q$ 的比例控制(P控制)、积分控制(I控制)或者微分控制(D控制)中的至少一个或者它们的组合,运算出FBd轴电压指令值Vdfb和FBq轴电压指令值Vqfb。

[0102] 图5是表示通过比例积分微分(PID)控制而运算出FBd轴电压指令值Vdfb和FBq轴电压指令值Vqfb时的FB控制部47的功能结构的一例的框图。

[0103] FB控制部47具备减法器47a、增益乘法部47b、47d、47f、近似微分部47c、积分器47e以及加法器47g。

[0104] 减法器47a计算出d轴电流的检测值id相对于第二d轴电流指令值Idr2的电流偏差 $\Delta I_d = (Idr2 - id)$ 以及q轴电流的检测值iq相对于第二q轴电流指令值Iqr2的电流偏差 $\Delta I_q = (Iqr2 - iq)$ 。

[0105] 增益乘法部47b将电流偏差 $\Delta I_d$ 与比例增益Kp的相乘结果以及电流偏差 $\Delta I_q$ 与比例增益Kp的相乘结果输出到加法器47g。

[0106] 近似微分部47c运算出电流偏差 $\Delta I_d$ 、 $\Delta I_q$ 的微分值。例如近似微分部47c可以通过将组合了微分运算和低通滤波器而得的传递函数 $s/(Ts+1)$ 与电流偏差 $\Delta I_d$ 、 $\Delta I_q$ 相乘来运算出微分值。增益乘法部47d将电流偏差 $\Delta I_d$ 的微分值与微分增益Kd的相乘结果以及电流偏差 $\Delta I_q$ 的微分值与微分增益Kd的相乘结果输出到加法器47g。

[0107] 积分器47e运算出电流偏差 $\Delta I_d$ 、 $\Delta I_q$ 的积分值。增益乘法部47f将电流偏差 $\Delta I_d$ 的积分值与积分增益Ki的相乘结果以及电流偏差 $\Delta I_q$ 的积分值与积分增益Ki的相乘结果输出到加法器47g。

[0108] 加法器47g将电流偏差 $\Delta I_d$ 与比例增益Kp的相乘结果、电流偏差 $\Delta I_d$ 的微分值与微分增益Kd的相乘结果、电流偏差 $\Delta I_d$ 的积分值与积分增益Ki的相乘结果之和作为FBd轴电压指令值Vdfb输出。

[0109] 另外,加法器47g将电流偏差 $\Delta I_q$ 与比例增益Kp的相乘结果、电流偏差 $\Delta I_q$ 的微分值与微分增益Kd的相乘结果、电流偏差 $\Delta I_q$ 的积分值与积分增益Ki的相乘结果之和作为FBq轴电压指令值Vqfb输出。

[0110] 积分器47e具备延迟元件47e1、加法器47e2和增益乘法部47e3。

[0111] 延迟元件47e1使作为积分器47e的输出的电流偏差 $\Delta I_d$ 的积分分量和电流偏差 $\Delta I_q$ 的积分分量延迟后输入到加法器47e2。即,延迟元件47e1将积分器47e的输出的过去值(前次值)输入到加法器47e2。

[0112] 加法器47e2输出电流偏差 $\Delta I_d$ 与延迟元件47e1的输出的和、以及 $\Delta I_q$ 与延迟元件47e1的输出的和。具体而言,输出对电流偏差 $\Delta I_d$ 的积分分量的过去值追加电流偏差 $\Delta I_d$ 而得到的和。另外,输出对电流偏差 $\Delta I_q$ 的积分分量的过去值追加电流偏差 $\Delta I_q$ 而得到的和。

[0113] 增益乘法部47e3将电压限制部48设定的后述的电压限制增益Gv与加法器47e2的输出分别相乘而得到的相乘结果作为积分器47e的输出(即电流偏差 $\Delta I_d$ 、 $\Delta I_q$ 的积分成分)而计算出,并输出到增益乘法部47f并且向延迟元件47e1输入。

[0114] 通过将电压限制增益Gv与加法器47e2的输出相乘,能够减少积分器47e中的积分

值,因此能够实现积分值的抗饱和功能。

[0115] 例如,如后所述,通过将电压限制增益 $G_v$ 设定为小于值“1”的值,能够抑制积分器47e对积分值的累积。另外,例如通过将电压限制增益 $G_v$ 设定为值“0”,能够将积分器47e的积分值复位为“0”。

[0116] 参照图2。电压限制部48通过以抑制基于FFd轴电压指令值 $V_{dff}$ 、FBd轴电压指令值 $V_{dfb}$ 、FFq轴电压指令值 $V_{qff}$ 以及FBq轴电压指令值 $V_{qfb}$ 的PWM控制的占空比饱和的方式限制这些电压指令值 $V_{dff}$ 、 $V_{dfb}$ 、 $V_{qff}$ 以及 $V_{qfb}$ ,由此运算出第二d轴电压指令值 $V_d$ 和第二q轴电压指令值 $V_q$ 。

[0117] 图6是表示电压限制部48的功能结构的一例的框图。电压限制部48具备电压上限值设定部48a、干扰电压抑制部48b、电压限制增益设定部48c、限制器48d、乘法器48e以及加法器48f。

[0118] 电压上限值设定部48a设定作为不产生占空饱和的电压指令值的上限值的电压上限值 $V_{DutyMax}$ 。在马达20的动力运行时和再生时,变换器51的死区时间作用于上限值的方向不同,因此电压上限值设定部48a按照下式(8)设定动力运行时的电压上限值 $V_{DutyMax}$ ,按照下式(9)设定再生时的电压上限值 $V_{DutyMax}$ 。

[0119] [数学式7]

$$V_{DutyMax} = \frac{V_R}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\left( DutyMaxRate - \frac{2 \cdot DeadTime}{PWMTime} \right)}{VRDutyConvFactor} \dots (8)$$

[0120]

$$V_{DutyMax} = \frac{V_R}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\left( DutyMaxRate + \frac{2 \cdot DeadTime}{PWMTime} \right)}{VRDutyConvFactor} \dots (9)$$

[0121] 由于通过在马达20的三相电压指令值上叠加三次谐波来提高电压利用效率,因此能够将电压指令值的上限值增加到电源电压 $V_R$ 的 $(2/\sqrt{3})$ 倍。PWM控制的占空比的范围0~100[%]与从施加电压的负侧电压的下限值到正侧电压的上限值为止的范围对应。因此,在上式(8)和(9)中,对电源电压 $V_R$ 乘以与正和负各自的单侧的上限值相当的系数 $(1/\sqrt{3})$ 。

[0122] 另外,与马达20是动力运行状态还是再生状态相对应地减去或加上由变换器51的死区时间 $DeadTime$ 引起的减少量 $(2 \times DeadTime/PWMTime)$ 。此外, $PWMTime$ 表示PWM控制部50的PWM周期。死区时间 $DeadTime$ 大多在设计值与实际值之间存在偏离,因此可以与是动力运行状态还是再生状态相对应地减去或加上适当设定的死区时间补偿值。

[0123] 另外,由于死区时间补偿而导致马达20的端子电压的变化相对于占空比的变化比率(斜率)降低。为了对其进行补偿,将转换系数 $VRDutyConvFactor$ 的倒数与上式(8)及(9)的计算式相乘。转换系数 $VRDutyConvFactor$ 在向占空比转换时向使电压指令值变小的方向作用,因此通过使电压上限值 $V_{DutyMax}$ 增加来补偿其减少量。

[0124] 此外,常数 $DutyMaxRate$ 通过从值“1”中减去用于确保基于后级的计算的量化误差和电流检测精度的余量来设定(即, $DutyMaxRate = 100[\%] - \text{量化误差} - \text{余量}$ )。

[0125] 图7是表示电压上限值设定部48a的功能结构的一例的框图。电压上限值设定部48a具备第一增益设定部48a1、第二增益设定部48a2、选择器48a3、乘法器48a4、48a6、48a7

以及减法器48a5。

[0126] 第一增益设定部48a1基于电池电流 $I_{bat}$ 来判定马达20是动力运行状态还是再生状态,并输出表示判定结果的第一判定增益 $G_1$ 。在马达20为动力运行状态的情况下,第一判定增益 $G_1$ 具有值“1”,在马达20为再生状态的情况下,第一判定增益 $G_1$ 具有值“-1”。

[0127] 图8的(a)是第一判定增益 $G_1$ 的设定例的第一例的示意图。例如,第一判定增益 $G_1$ 可以在电池电流 $I_{bat}$ 为小于值“0”的值 $I_1$ 以下的情况下被设定为值“-1”,在电池电流 $I_{bat}$ 为值“0”以上的情况下被设定为值“1”,在电池电流 $I_{bat}$ 为从值 $I_1$ 到值“0”的范围内,随着电池电流 $I_{bat}$ 的增加而从值“-1”到值“1”线性地逐渐增加,也可以非线性地逐渐增加。

[0128] 也可以对第一判定增益 $G_1$ 被设定为值“1”的电池电流 $I_{bat}$ 设置余量而设定为比“0”小的值 $I_2$ 。图8的(b)是第一判定增益 $G_1$ 的设定例的第二例的示意图。这是因为若错误地设定第一判定增益 $G_1$ 的符号则导致占空饱和。

[0129] 例如,可以设定大于值 $I_1$ 且小于值“0”的值 $I_2$ ,在电池电流 $I_{bat}$ 为值 $I_2$ 以上的情况下将第一判定增益 $G_1$ 设定为值“1”,在电池电流 $I_{bat}$ 从值 $I_1$ 到值 $I_2$ 的范围内,随着电池电流 $I_{bat}$ 的增加,使第一判定增益 $G_1$ 从值“-1”线性或非线性地逐渐增加到值“1”。

[0130] 参照图7。第二增益设定部48a2基于后述的电压限制增益 $G_v$ 来判定占空比是否接近上限,并输出表示判定结果的第二判定增益 $G_2$ 。在占空比接近上限的情况下,第二判定增益 $G_2$ 具有值“1”,在占空比不接近上限的情况下,第二判定增益 $G_2$ 具有值“-1”。

[0131] 图8的(c)是第二判定增益 $G_2$ 的设定例的第一例的示意图。例如,第二判定增益 $G_2$ 在电压限制增益 $G_v$ 为小于值“1”的值 $G_{v1}$ 以下的情况下被设定为值“-1”,在电压限制增益 $G_v$ 为值“1”以上的情况下被设定为值“1”,在电压限制增益 $G_v$ 为从值 $G_{v1}$ 到值“1”的范围内,随着电压限制增益 $G_v$ 的增加而从值“-1”线性地逐渐增加到值“1”,也可以非线性地逐渐增加。

[0132] 也可以对第二判定增益 $G_2$ 被设定为值“1”的电压限制增益 $G_v$ 设置余量,设定为比“1”小的值 $G_{v2}$ 。图8的(d)是第二判定增益 $G_2$ 的设定例的第二例的示意图。这是因为若错误地设定第二判定增益 $G_2$ 的符号则导致占空饱和。

[0133] 例如可以设定大于值 $G_{v1}$ 且小于值“1”的值 $G_{v2}$ ,在电压限制增益 $G_v$ 为值 $G_{v2}$ 以上的情况下将第二判定增益 $G_2$ 设定为值“1”,在电压限制增益 $G_v$ 为从值 $G_{v1}$ 到值 $G_{v2}$ 的范围内,随着电压限制增益 $G_v$ 的增加,使第二判定增益 $G_2$ 从值“-1”线性或非线性地逐渐增加到值“1”。

[0134] 参照图7。选择器48a3将第一判定增益 $G_1$ 和第二判定增益 $G_2$ 中的较大一方的增益输出到乘法器48a4。乘法器48a4、48a6、48a7以及减法器48a5按照上式(8)和(9)的计算式计算出电压上限值 $V_{DutyMax}$ 。

[0135] 参照图6。干扰电压抑制部48b设置于FB控制部47的后级,作为抑制反电动势、其他干扰电压对FBd轴电压指令值 $V_{dfb}$ 、FBq轴电压指令值 $V_{qfb}$ 造成影响的电压干扰观测器发挥功能。

[0136] 干扰电压抑制部48b具备延迟元件48b1、加法器48b2、滤波器48b3以及乘法器48b4。延迟元件48b1是技术方案所记载的“第一延迟元件”和“第二延迟元件”的一例。

[0137] 延迟元件48b1使从干扰电压抑制部48b输出的d轴电压指令值( $G_v \times V_{dobs}$ )和q轴电压指令值( $G_v \times V_{qobs}$ )延迟后输入到加法器48b2。即,延迟元件48b1将d轴电压指令值( $G_v \times V_{dobs}$ )和q轴电压指令值( $G_v \times V_{qobs}$ )的过去值(上次值)输入到加法器48b2。

[0138] 加法器48b2输出d轴电压指令值( $G_v \times V_{dobs}$ )的过去值与FBd轴电压指令值 $V_{dfb}$ 相

加所得的和。另外,输出q轴电压指令值( $G_v \times V_{qobs}$ )的过去值与FBq轴电压指令值 $V_{qfb}$ 相加所得的和。

[0139] 滤波器48b3运算出对加法器48b2的输出实施用于降低噪声的滤波处理而得到的d轴电压指令值 $V_{dobs}$ 和q轴电压指令值 $V_{qobs}$ 作为电压干扰观测器的输出。

[0140] 具体而言,对d轴电压指令值( $G_v \times V_{dobs}$ )的过去值与FBd轴电压指令值 $V_{dfb}$ 之和实施滤波处理而运算出d轴电压指令值 $V_{dobs}$ 。另外,对q轴电压指令值( $G_v \times V_{qobs}$ )的过去值与FBq轴电压指令值 $V_{qfb}$ 之和实施滤波处理而运算出q轴电压指令值 $V_{qobs}$ 。例如,滤波器48b3可以是低通滤波器。

[0141] 电压限制增益设定部48c基于电压干扰观测器的输出 $V_{dobs}$ 和 $V_{qobs}$ 、FFd轴电压指令值 $V_{dff}$ 、FFq轴电压指令值 $V_{qff}$ 以及电压上限值 $VDutyMax$ ,设定出用于将电压指令值限制在电压上限值 $VDutyMax$ 以下的电压限制增益 $G_v$ 。

[0142] 具体而言,电压限制增益设定部48c通过d轴电压指令值和q轴电压指令值的合成矢量与电压上限值 $VDutyMax$ 之比,运算出电压限制增益 $G_v$ (下式(10))。限制器48d将电压限制增益 $G_v$ 的上限值限制为“1”,将下限值限制为“0”。

[0143] [数学式8]

$$[0144] \quad G_v = \frac{VDutyMax}{\sqrt{(V_{dobs} + V_{dff})^2 + (V_{qobs} + V_{qff})^2}} \quad \dots (10)$$

[0145] 干扰电压抑制部48b的乘法器48b4将电压干扰观测器的输出 $V_{dobs}$ 和 $V_{qobs}$ 分别与电压限制增益 $G_v$ 相乘,将相乘结果( $G_v \times V_{dobs}$ )和( $G_v \times V_{qobs}$ )输入到延迟元件48b1,并且输出到加法器48f。

[0146] 乘法器48e将FFd轴电压指令值 $V_{dff}$ 和FFq轴电压指令值 $V_{qff}$ 分别与电压限制增益 $G_v$ 相乘,并将相乘结果( $G_v \times V_{dff}$ )和( $G_v \times V_{qff}$ )输出到加法器48f。

[0147] 加法器48f计算出相乘结果( $G_v \times V_{dobs}$ )与( $G_v \times V_{dff}$ )之和作为第二d轴电压指令值 $V_d = G_v \times (V_{dobs} + V_{dff})$ ,计算出相乘结果( $G_v \times V_{qobs}$ )与( $G_v \times V_{qff}$ )之和作为第二q轴电压指令值 $V_q = G_v \times (V_{qobs} + V_{qff})$ 。

[0148] 这样,通过乘以电压限制增益 $G_v$ 来限制电压指令值,能够抑制在基于第二d轴电压指令值 $V_d$ 以及第二q轴电压指令值 $V_q$ 的PWM控制中占空比100%饱和。

[0149] 参照图2。两相/三相转换部49将第二d轴电压指令值 $V_d$ 以及第二q轴电压指令值 $V_q$ 转换为三相电压指令值。

[0150] 三相电压指令值被输入到PWM控制部50,进而经由变换器51对马达20进行PWM驱动。马达20的驱动电流由马达电流检测器21检测出,通过三相/两相转换部46转换为d轴电流 $i_d$ 以及q轴电流 $i_q$ ,反馈到FB控制部47的减法器47a。

[0151] (作用)

[0152] d轴电流指令值运算部41基于上式(4)运算出基本d轴电流指令值 $I_{dr0}$ 。由于对式中的常数 $R$ 、 $L$ 设定标称值,因此产生物理参数的偏差、由温度变化等引起的误差。另外,马达20的转速 $\omega$ 的检测值也由于延迟、噪声等产生误差。因此,难以通过限制d轴电流指令值来完全防止占空饱和。

[0153] 因此,在本实施方式中,占空饱和的抑制在后级的电压限制部48中进行,在d轴电流指令值运算部41中尝试最佳的d轴电流指令值的计算。

[0154] 这样,在本实施方式中,在d轴电流指令值运算部41中不考虑占空饱和,但若直接使用基于上式(4)的d轴电流指令值,则有可能过剩地计算出d轴电流指令值。因此,基于上式(4)来研究各输入参数如何影响d轴电流指令值。为了使d轴电流指令值向负方向增加(增强弱磁控制),根据上式(4)可知,只要马达的转速 $\omega$ 变高、电源电压 $V_R$ 下降、q轴电流指令值 $I_{qt}$ 变大即可。

[0155] 接着,研究在计算基本d轴电流指令值 $I_{dr0}$ 时使用的q轴电流指令值 $I_{qt}$ 与在电压指令值的计算中实际使用的第二q轴电流指令值 $I_{qr2}$ 偏离的情况下的影响。

[0156] 当第二q轴电流指令值 $I_{qr2}$ 向变大一侧偏离时,d轴电流指令值不足,因此产生占空饱和。作为引起该现象的主要原因,考虑角加速度调节器42的输出 $\Delta q$ 与基本q轴电流指令值 $I_{qr0}$ 相加的情况。但是,角加速度调节器的输出 $\Delta q$ 的变化急剧,与此相对地,d轴电流指令值被变化率限制器等限制,因此推测为无法追随急剧的变化。因此,第二q轴电流指令值 $I_{qr2}$ 向变大一侧偏离的时间短,其影响也有限。因此,不考虑第二q轴电流指令值 $I_{qr2}$ 向变大一侧偏离的情况。

[0157] 若第二q轴电流指令值 $I_{qr2}$ 向变小一侧偏离,则基本d轴电流指令值 $I_{dr0}$ 变得过剩,无法将占空比使用到上限。作为主要原因,考虑在后级限制q轴电流指令值的情况。后级的q轴电流指令值的限制是基于上式(5)的限制增益 $G_{q3}$ 的系统电流限制和基于上式(7)的限制增益 $G_{q4}$ 的电池电流限制。

[0158] 因此,在电流指令值设定部41a中通过上式(1)以及(3)计算出施加了这些限制的情况下的q轴电流指令值 $I_{qt}$ 而用于基本d轴电流指令值 $I_{dr0}$ 的计算,从而计算出最佳的q轴电流指令值。

[0159] 另外,在电压限制部48中计算用于施加电压限制的电压限制增益 $G_v$ ,并与电压指令值相乘。当在作为电压干扰观测器发挥功能的干扰电压抑制部48b中将该电压限制增益 $G_v$ 与电压指令值相乘时,能够限制构成电压干扰观测器的积分器的上限值,因此实质上作为抗饱和功能发挥作用。

[0160] 另外,在电压限制部48中,对d轴电压指令值和q轴电压指令值乘以相同值的增益(电压限制增益 $G_v$ )来进行限制。这是因为,由于电压干扰观测器由积分器构成,因此若优先限制q轴,则即使d轴电压指令值与q轴电压指令值的合成矢量被上限值限制,d轴电压指令值也会持续上升至上限值,与此相应地,q轴电压指令值被急剧限制,有可能导致输出的急剧变化。

[0161] 另外,关于电压上限值设定部48a对电压上限值 $V_{DutyMax}$ 的设定,死区时间以在动力运行时减小占空而在再生时增大占空的方式发挥作用。

[0162] 上式(8)是动力运行时的电压上限值 $V_{DutyMax}$ 的计算式,如果不考虑再生时的作用方向的切换,则占空比的上限有可能产生偏离。因此,在本实施方式中判定动力运行和再生,切换基于死区时间的减少量的符号。

[0163] 然而,若单纯地切换符号,则会产生占空比的急剧变化,因此有可能产生过电流、工作声。因此,使用电池电流 $I_{bat}$ 作为再生的条件判定,并且使用电压限制增益 $G_v$ 作为占空的条件判定,基于这些计算出判定增益 $G_1$ 、 $G_2$ 。但是,由于不知道满足这些条件判定中的哪个,因此通过基于判定增益 $G_1$ 、 $G_2$ 的最大值来切换符号,从而实现这两个判定增益 $G_1$ 、 $G_2$ 之间的渐变切换。

[0164] 另外,FB控制部47具备积分器47e中的积分值的抗饱和功能。一般而言,抗饱和功能的目的在于,在包含积分器的控制器的输出由于某些理由而被限制的情况下,防止积分值过剩地累计。

[0165] 在抗饱和功能的一般的结构中,对被限制前后的输出的差值施加某种处理而进行反馈,限制积分值的上限。

[0166] 在本实施方式中,FB控制部47的输出超过电压上限值的情况较少,在大部分情况下设于后级的干扰电压抑制部(电压干扰观测器)48b的输出超过电压上限值。因此,无法直接使用一般的抗饱和的结构。

[0167] 另外,优选为,即使在电压指令值被电压上限值限制的状态下,FB控制部47的输出与干扰电压抑制部48b的输出的比率也能够变化(例如,优选在马达20的转速 $\omega$ 下降而转矩上升的状况下,反电动势下降而q轴电流上升,因此FB控制部47的输出的比率变大,干扰电压抑制部48b的输出的比率变小)。

[0168] 因此,在本实施方式中,将FB控制部47的积分器47e的积分值与干扰电压抑制部48b的电压干扰观测器的输出 $V_{dobs}$ 、 $V_{qob}$ 乘以相同值的增益(电压限制增益 $G_v$ )来进行限制,在FB控制部47与干扰电压抑制部48b之间将负担等分。

[0169] (动作)

[0170] 图9是实施方式的马达控制方法的一例的流程图。

[0171] 在步骤S1中,转矩传感器10、车速传感器12以及马达电流检测器21分别检测转向转矩 $T_h$ 、车速 $V_h$ 以及马达20的驱动电流。另外,电压传感器和电流传感器检测由电池13供给的电源电压 $V_R$ 和电池电流 $I_{bat}$ 。

[0172] 在步骤S2中,转矩控制部40至少基于转向转矩 $T_h$ 和车速 $V_h$ 运算出基本q轴电流指令值 $I_{qr0}$ 。

[0173] 在步骤S3中,d轴电流指令值运算部41基于基本q轴电流指令值 $I_{qr0}$ 、电源电压 $V_R$ 以及马达20的转速 $\omega$ 设定出第一d轴电流指令值 $I_{dr1}$ 。

[0174] 在步骤S4中,第一电流限制部43通过基于马达20的额定电流来限制基本q轴电流指令值 $I_{qr0}$ ,由此运算出第一q轴电流指令值 $I_{qr1}$ 。

[0175] 在步骤S5中,第二电流限制部44通过基于电池上限电流 $I_{batmax}$ 分别限制第一d轴电流指令值 $I_{dr1}$ 和第一q轴电流指令值 $I_{qr1}$ ,由此运算出第二d轴电流指令值 $I_{dr2}$ 和第二q轴电流指令值 $I_{qr2}$ 。

[0176] 在步骤S6中,FF控制部45运算出FFd轴电压指令值 $V_{dff}$ 和FFq轴电压指令值 $V_{qff}$ 。FB控制部47运算出FBd轴电压指令值 $V_{dfb}$ 和FBq轴电压指令值 $V_{qfb}$ 。

[0177] 在步骤S7中,电压上限值设定部48a设定电压上限值 $V_{DutyMax}$ 。

[0178] 在步骤S8中,电压限制增益设定部48c基于电压上限值 $V_{DutyMax}$ 设定出电压限制增益 $G_v$ 。

[0179] 在步骤S9中,电压限制部48通过电压限制增益 $G_v$ 来限制FFd轴电压指令值 $V_{dff}$ 、FFq轴电压指令值 $V_{qff}$ 、FBd轴电压指令值 $V_{dfb}$ 和FBq轴电压指令值 $V_{qfb}$ ,由此运算出第二d轴电压指令值 $V_d$ 和第二q轴电压指令值 $V_q$ 。

[0180] 在步骤S10中,PWM控制部50和变换器51基于第二d轴电压指令值 $V_d$ 和第二q轴电压指令值 $V_q$ 来驱动马达20。之后,处理结束。

[0181] (变形例)

[0182] 本发明的马达控制装置并不限于上述实施方式,只要不脱离本发明的主旨就能够进行各种变形。

[0183] 例如,在上述实施方式中,作为本发明所涉及的马达控制装置的应用例,例示出具备该马达控制装置的电动助力转向装置进行了说明,但本发明所涉及的马达控制装置的应用范围并不限于此,能够应用于使用马达控制装置的各种机械装置。

[0184] 图10是表示使用本发明的马达控制装置的直动工作台装置的一例的概要的结构图。

[0185] 直动工作台装置具备进给丝杠装置、工作台71、两个线性引导件(直动引导装置)以及基台74。

[0186] 进给丝杠装置具有丝杠轴70、螺母76以及马达77,丝杠轴70插通于螺母76。进给丝杠装置的进给丝杠机构是丝杠轴70的螺旋槽与螺母76的螺旋槽经由滚珠(滚动体)进行点接触的滚珠丝杠。在丝杠轴70的轴向一端结合有马达77。

[0187] 两个线性引导件分别具有导轨72、两个滑块(移动体)73以及多个滚动体。在线性引导件中,导轨72以及滑块73在彼此对置的位置分别具有形成滚动体的滚动通路的轨道面。两轨道面在导轨72的长度方向上延伸,滑块73经由在负载状态下在滚动通路内滚动的滚动体而沿着导轨72直线移动。

[0188] 在基台74上的与工作台71的移动方向Y垂直的方向的两端分别配置有线性引导件,在两个线性引导件之间配置有进给丝杠装置。导轨72和丝杠轴70与工作台71的移动方向Y平行地配置。

[0189] 通过该配置,导轨72固定于基台74。丝杠轴70在各自的轴向两端部安装有滚动轴承,在滚动轴承的外圈固定有壳体75,各壳体75固定于基台74。由此,丝杠轴70被支承为相对于基台74旋转自如。

[0190] 工作台71配置在各线性引导件的两个滑块73和进给丝杠装置的螺母76的上方,相对于滑块73直接固定,相对于螺母76经由托架固定。即,各线性引导件的两个滑块73以及进给丝杠装置的螺母76固定于工作台71的一面。

[0191] 在该直动工作台,若驱动马达77而使进给丝杠装置运转,则丝杠轴70旋转,螺母76通过滚珠丝杠机构而直动。伴随于此,工作台71一边被线性引导件引导一边直动。

[0192] 控制器78设定对马达77进行驱动的电流量指令值,通过与上述的实施方式的控制器30同样的处理,根据电流量指令值运算出电压控制指令值 $V_{ref}$ ,控制向马达20供给的电流。

[0193] (实施方式的效果)

[0194] (1) 马达控制装置具备:转矩控制部,其设定用于控制马达的产生转矩的基本q轴电流指令值;以及d轴电流指令值运算部,其基于基本q轴电流指令值和马达的转速设定出磁场削弱用的第一d轴电流指令值;第一电流限制部,其设置于d轴电流指令值运算部的后级,以使马达的驱动电流不超过马达的额定电流的方式根据第一d轴电流指令值来限制基本q轴电流指令值,运算出第一q轴电流指令值;第二电流限制部,其置于第一电流限制部的后级,通过以使电池的输出电流不超过规定的允许上限的方式分别限制第一d轴电流指令值和第一q轴电流指令值,运算出第二d轴电流指令值和第二q轴电流指令值;电压指令值运算部,其基于第二d轴电流指令值和第二q轴电流指令值运算出第一d轴电压指令值和第一q

轴电压指令值;电压限制部,其通过以抑制基于第一d轴电压指令值和第一q轴电压指令值的PWM控制的占空比饱和的方式分别限制第一d轴电压指令值和第一q轴电压指令值,运算出第二d轴电压指令值和第二q轴电压指令值;驱动电路,其基于第二d轴电压指令值和第二q轴电压指令值对马达进行驱动。

[0195] 由此,实施方式的马达控制装置能够抑制高负载状态下的占空比的饱和以及高速区域中的占空比的减少。

[0196] (2) d轴电流指令值运算部可以根据如下的q轴电流指令值运算出第一d轴电流指令值:该q轴电流指令值是基于第二d轴电流指令值的过去值以使马达的驱动电流不超过马达的额定电流的方式限制基本q轴电流指令值而得到的。

[0197] 由此,即使基于马达的额定电流来限制用于运算电压指令值的q轴电流指令值,也能够降低用于运算第一d轴电流指令值的q轴电流指令值与用于运算电压指令值的q轴指令值的偏离。其结果,能够抑制运算过大的第一d轴电流指令值而将占空比限制得比上限低。

[0198] (3) d轴电流指令值运算部可以根据如下的q轴电流指令值运算出第一d轴电流指令值:该q轴电流指令值是基于第二d轴电流指令值的过去值以使电池的输出电流不超过允许上限的方式限制基本q轴电流指令值而得到的。

[0199] 由此,即使基于电池的上限电流来限制用于运算电压指令值的q轴电流指令值,也能够降低用于运算第一d轴电流指令值的q轴电流指令值与用于运算电压指令值的q轴指令值的偏离。其结果,能够抑制运算过大的第一d轴电流指令值而将占空比限制得比上限低。

[0200] (4) d轴电流指令值运算部可以基于马达的转速来限制第一d轴电流指令值的上限。

[0201] 由此,能够实现工作声与过电流对策的平衡。

[0202] (5) 电压限制部可以具备:电压上限值设定部,其设定作为马达的施加电压的上限值的电压上限值;以及电压限制增益设定部,其设定与电压上限值对应的电压限制增益,电压限制部通过根据电压限制增益分别限制第一d轴电压指令值和第一q轴电压指令值,运算出第二d轴电压指令值和第二q轴电压指令值。

[0203] 由此,能够抑制高负载状态下的占空比的饱和。

[0204] (6) 电压上限值设定部可以基于在作为多相马达的马达的多相电压指令值上叠加三次谐波而得到的电压利用效率提高量、由死区时间引起的电压下降、由死区时间补偿引起的马达端子电压相对于占空比的比率的下降量中的至少一个来设定电压上限值。

[0205] 由此,能够适当地设定用于限制电压指令值的电压上限值。

[0206] (7) 电压限制部可以具备干扰电压抑制部,该干扰电压抑制部输出对第一d轴电压指令值与第一延迟元件的输出的和乘以电压限制增益而得到的第一相乘结果、以及对第一q轴电压指令值与第二延迟元件的输出的和乘以电压限制增益而得到的第二相乘结果,并且将第一相乘结果和第二相乘结果分别输入第一延迟元件以及第二延迟元件,电压限制部输出包含第一相乘结果的第二d轴电压指令值和包含第二相乘结果的第二q轴电压指令值。

[0207] 由此,能够基于电压限制增益来限制电压指令值。另外,能够抑制干扰电压对第一d轴电压指令值和第一q轴电压指令值造成的影响。

[0208] (8) 电压限制增益设定部可以基于电压上限值、第一d轴电压指令值与第一延迟元件的输出的和、以及第一q轴电压指令值与第二延迟元件的输出的和,设定出电压限制增

益。

[0209] 由此,能够通过d轴电压指令值和q轴电压指令值的合成矢量与电压上限值之比来运算电压限制增益。

[0210] (9)电压指令值运算部可以输出包含d轴积分分量的第一d轴电压指令值和包含q轴积分分量的第一q轴电压指令值,基于电压限制增益来抑制d轴积分分量和q轴积分分量,其中,d轴积分分量是马达的驱动电流的d轴电流的检测值相对于第二d轴电流指令值的偏差的积分分量,q轴积分分量是马达的驱动电流的q轴电流的检测值相对于第二q轴电流指令值的偏差的积分分量。

[0211] 由此,在通过积分控制来运算电压指令值的电压指令值运算部中,能够实现积分值的抗饱和功能。

[0212] (10)第一d轴电压指令值可以包含前馈d轴电压指令值和反馈d轴电压指令值,该前馈d轴电压指令值通过基于第二d轴电流指令值的前馈控制而运算出,该反馈d轴电压指令值通过基于马达的驱动电流的d轴电流的检测值相对于第二d轴电流指令值的偏差的反馈控制而运算出。另外,第一q轴电压指令值可以包含前馈q轴电压指令值和反馈q轴电压指令值,该前馈q轴电压指令值通过基于第二q轴电流指令值的前馈控制而运算出,该反馈q轴电压指令值通过基于马达的驱动电流的q轴电流的检测值相对于第二q轴电流指令值的偏差的反馈控制而运算出。

[0213] 干扰电压抑制部可以输出对反馈d轴电压指令值与第一延迟元件的输出的和乘以电压限制增益而得到的第一相乘结果、以及对反馈q轴电压指令值与第二延迟元件的输出的和乘以电压限制增益而得到的第二相乘结果,并且将第一相乘结果和第二相乘结果分别输入第一延迟元件和第二延迟元件。

[0214] 电压限制增益设定部可以基于电压上限值、“反馈d轴电压指令值及第一延迟元件的输出与前馈d轴电压指令值”的和、以及“反馈q轴电压指令值及第二延迟元件的输出与前馈q轴电压指令值”的和,设定出电压限制增益。

[0215] 电压限制部可以输出包含对前馈d轴电压指令值乘以电压限制增益而得到的第三相乘结果和第一相乘结果的第二d轴电压指令值,并且输出包含对前馈q轴电压指令值乘以电压限制增益而得到的第四相乘结果和第二相乘结果的第二q轴电压指令值。

[0216] 由此,能够实现基于前馈控制的响应性的提高和基于反馈控制的干扰影响的抑制。另外,能够基于电压限制增益来限制电压指令值。另外,能够抑制干扰电压对反馈d轴电压指令值和反馈q轴电压指令值造成的影响。另外,能够根据d轴电压指令值和q轴电压指令值的合成矢量与电压上限值之比运算出电压限制增益。

[0217] 附图标记说明

[0218] 1…方向盘、2…转向轴、3…减速齿轮、4a、4b…万向接头、5…小齿轮齿条机构、5a…小齿轮、5b…齿条、6a、6b…横拉杆、7a、7b…轮毂单元、8L、8R…转向车轮、10…转矩传感器、11…点火键、12…车速传感器、13…电池、14…转向角传感器、20、77…马达、21…马达电流检测器、30…控制器、40…转矩控制部、41…d轴电流指令值运算部、41a…电流指令值设定部、41b…励磁电流指令值运算部、41c…励磁电流限制部、42…角加速度调节器、43…第一电流限制部、44…第二电流限制部、45…前馈控制部、46…三相/两相转换部、47…反馈控制部、47a、48a5…减法器、47b、47d、47e3、47f…增益乘法部、47c…近似微分部、47e…积

分器、47e1、48b1…延迟元件、47e2、47g、48b2、48f…加法器、48…电压限制部、48a…电压上限值设定部、48a1…第一增益设定部、48a2…第二增益设定部、48a3…选择器、48a4、48a6、48a7、48b4、48e…乘法器、48b…干扰电压抑制部、48b3…滤波器、48c…电压限制增益设定部、48d…限制器、49…两相/三相转换部、50…PWM控制部、51…变换器、70…丝杠轴、71…工作台、72…导轨、73…滑块、74…基台、75…壳体、76…螺母。

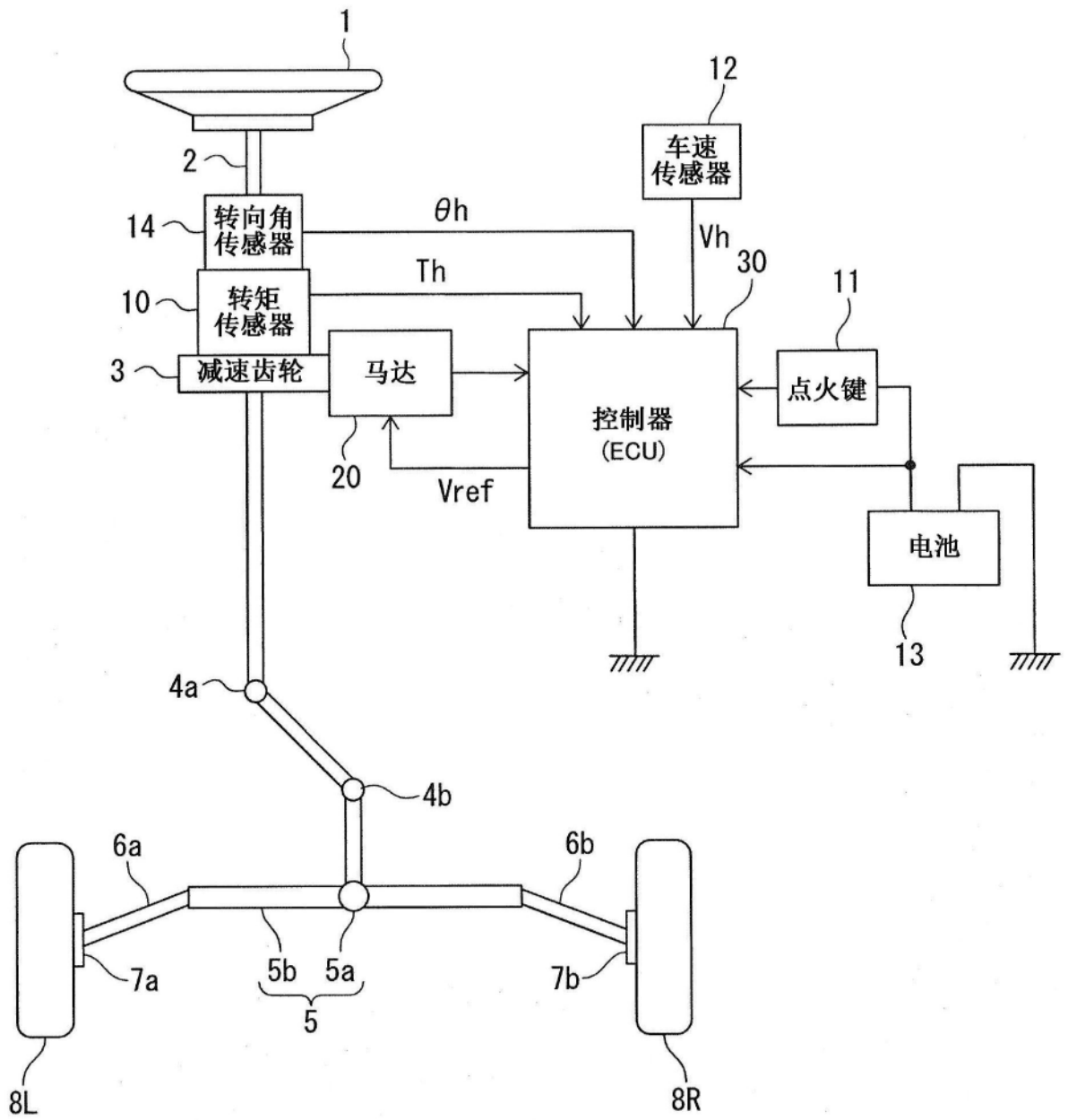


图1

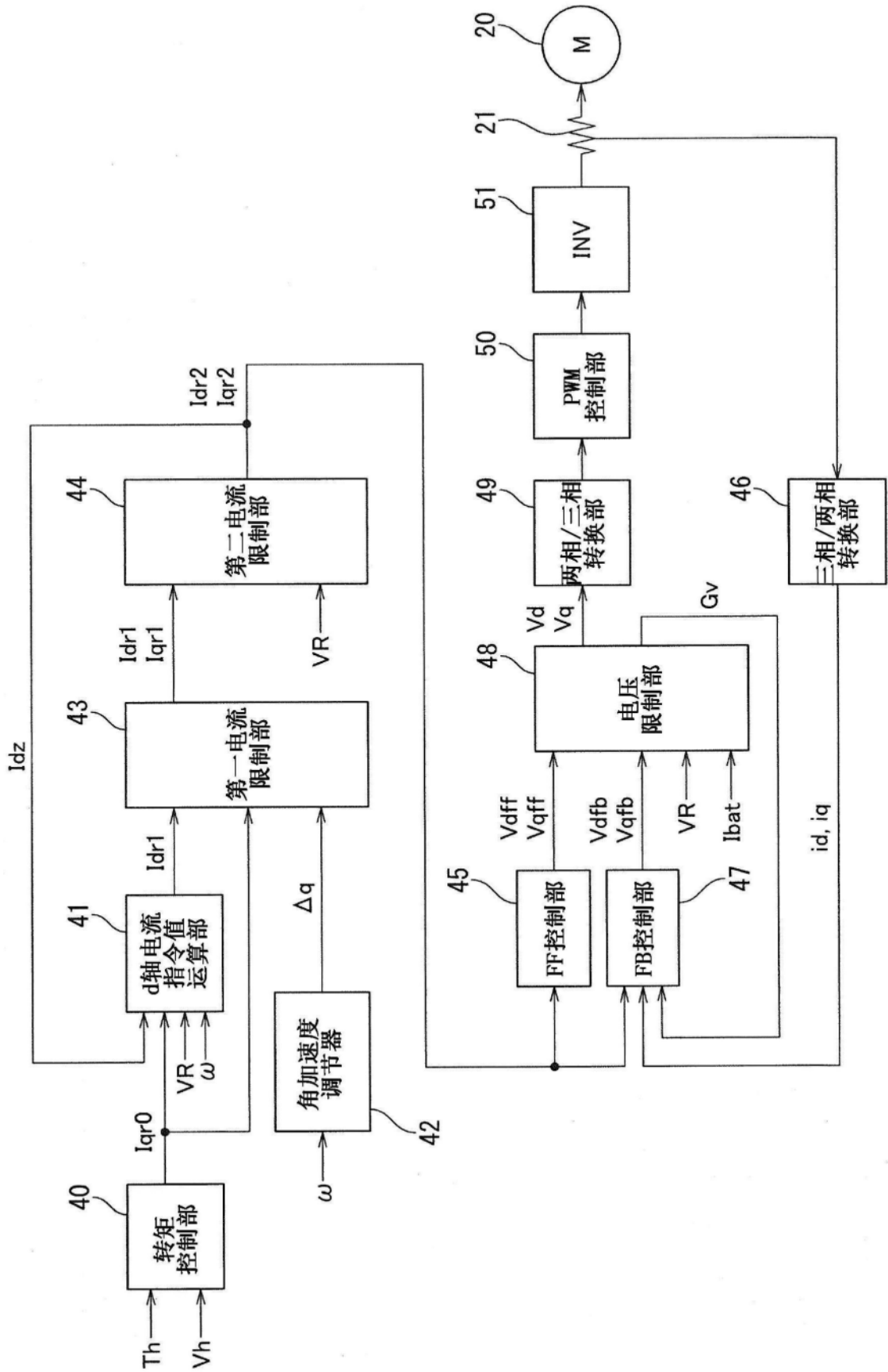


图2

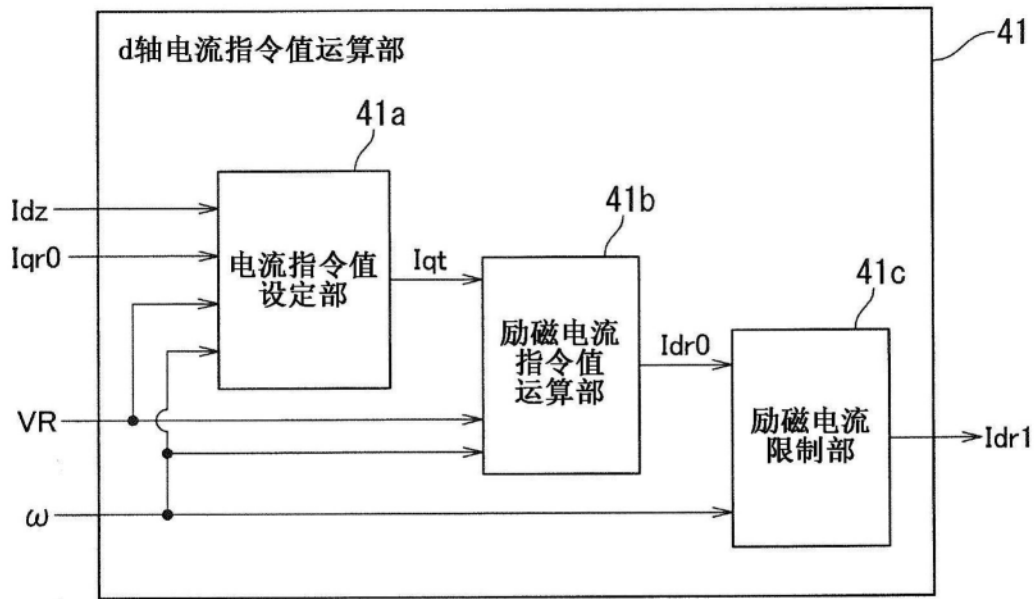


图3

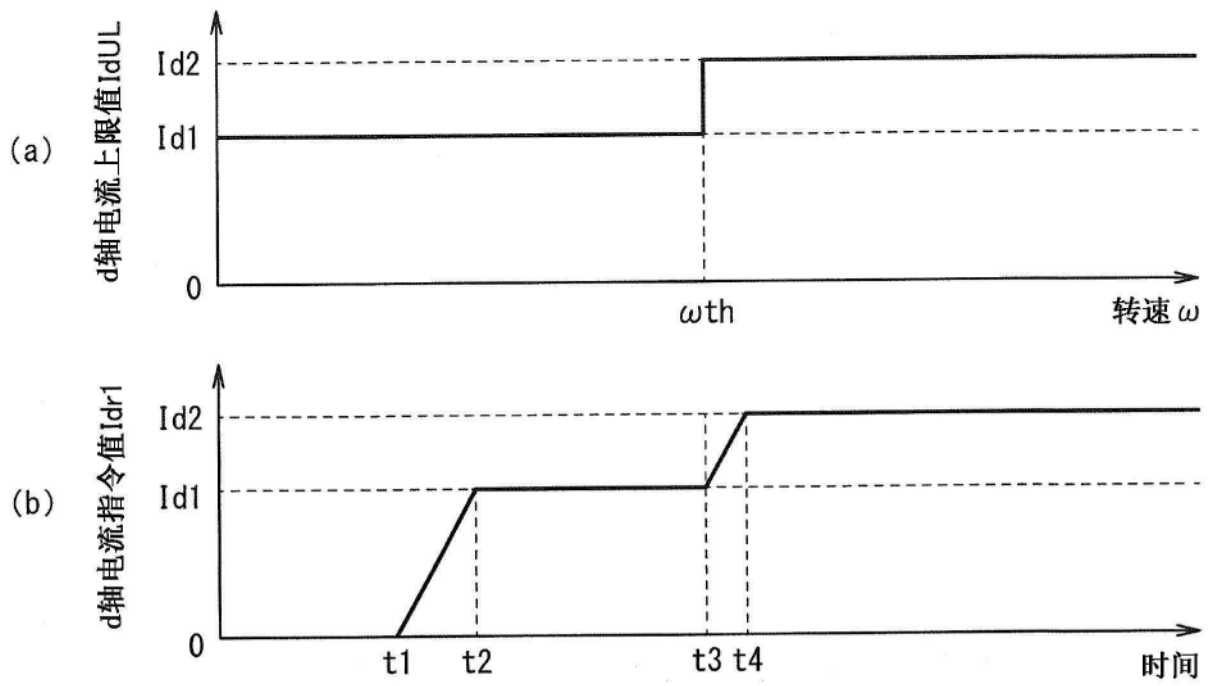


图4

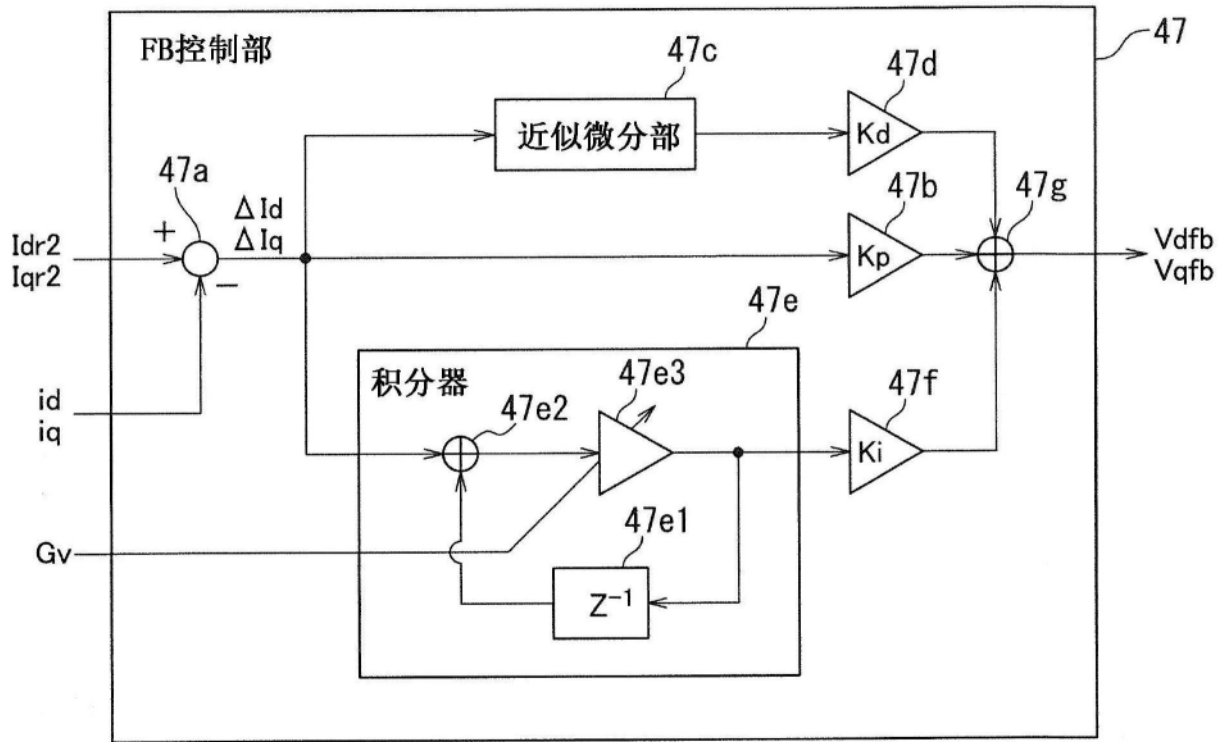


图5

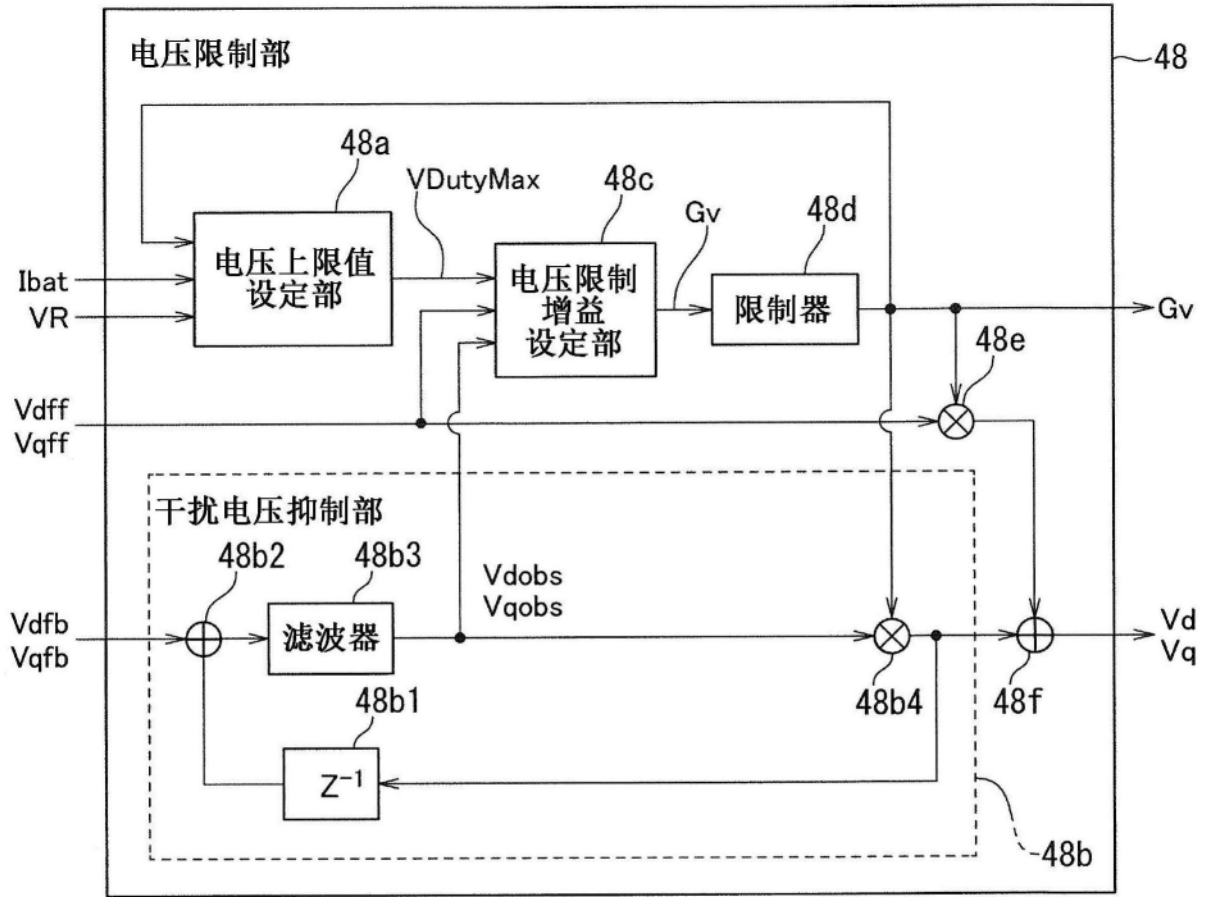


图6

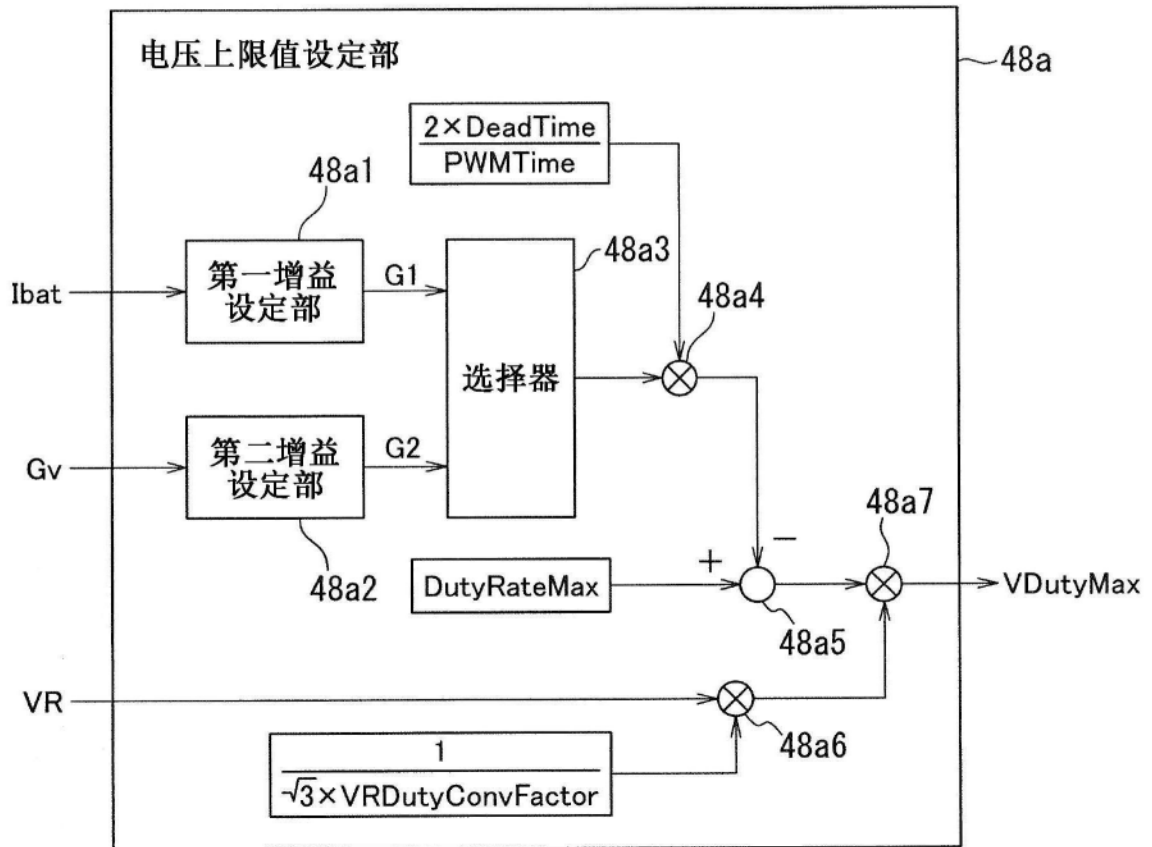


图7

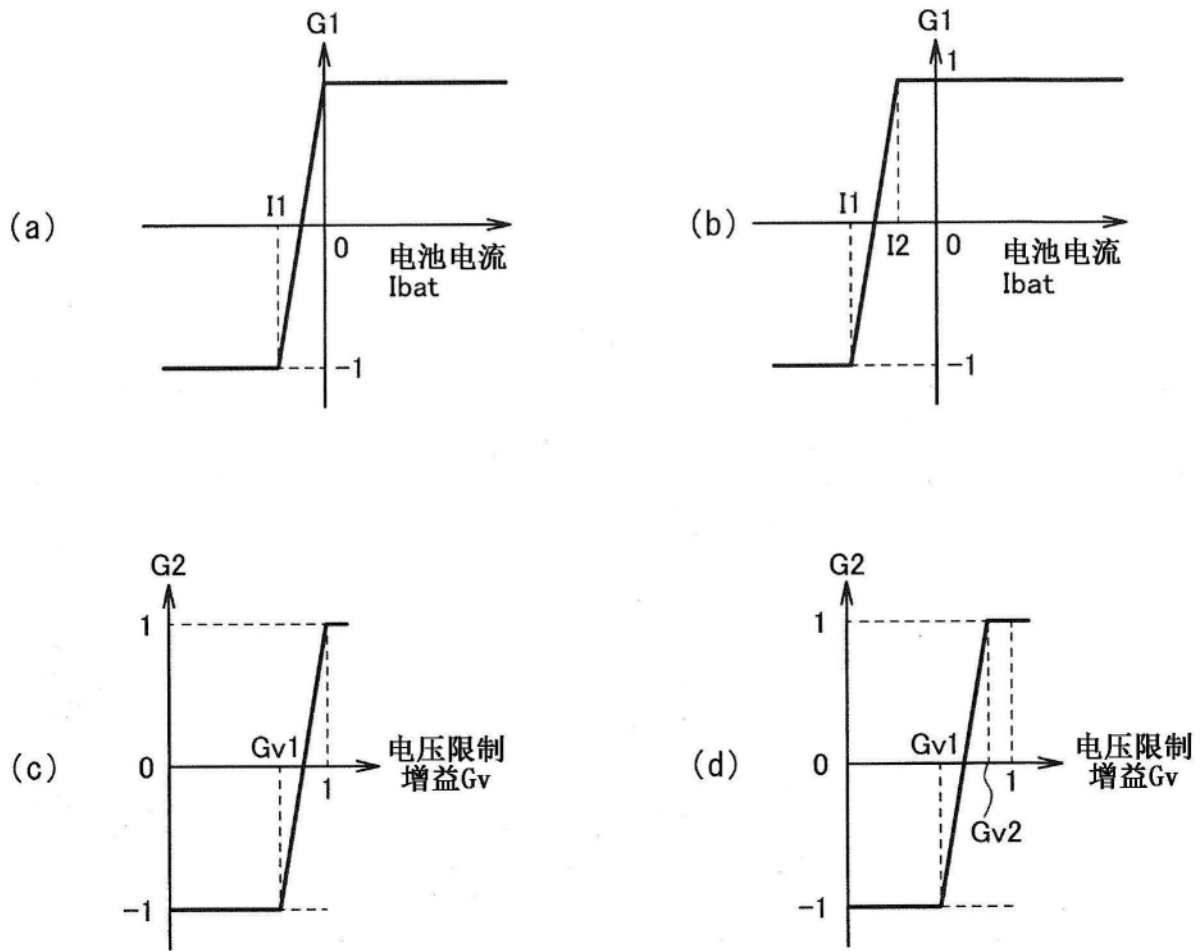


图8

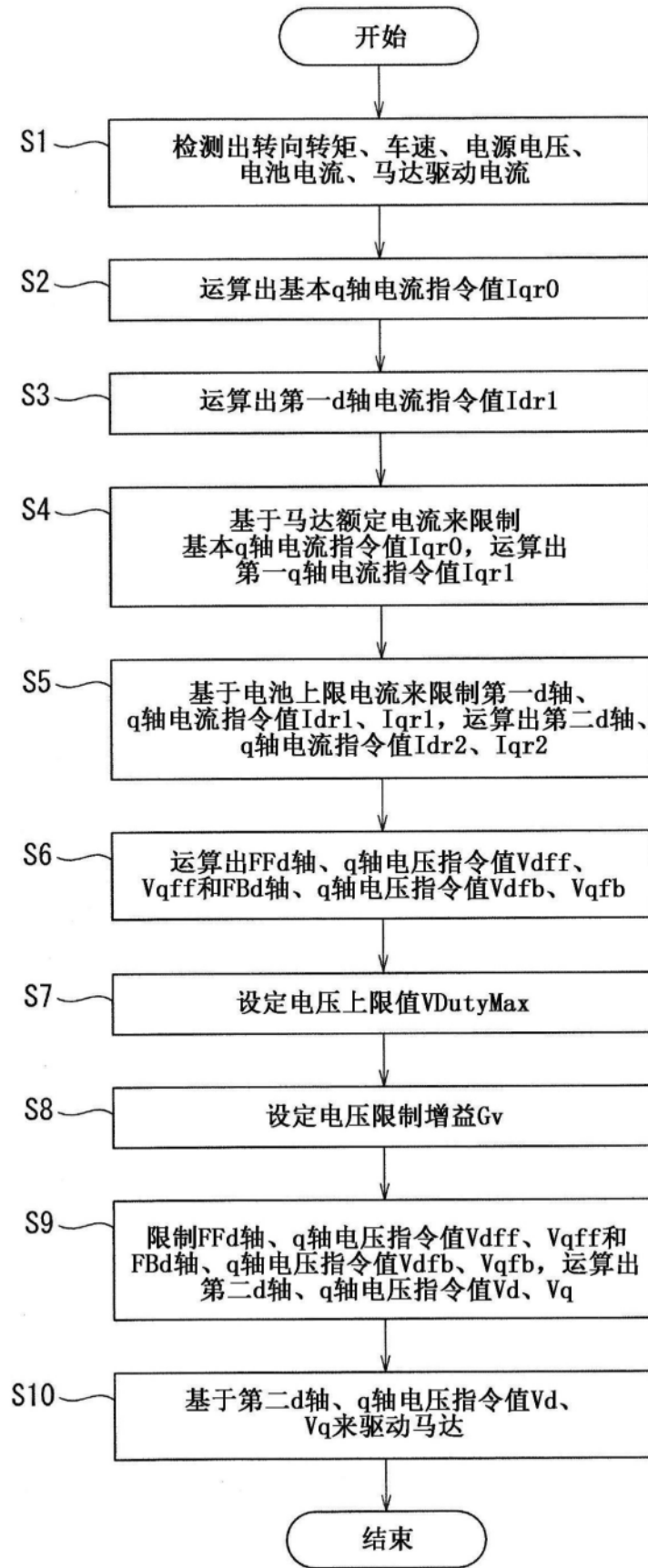


图9

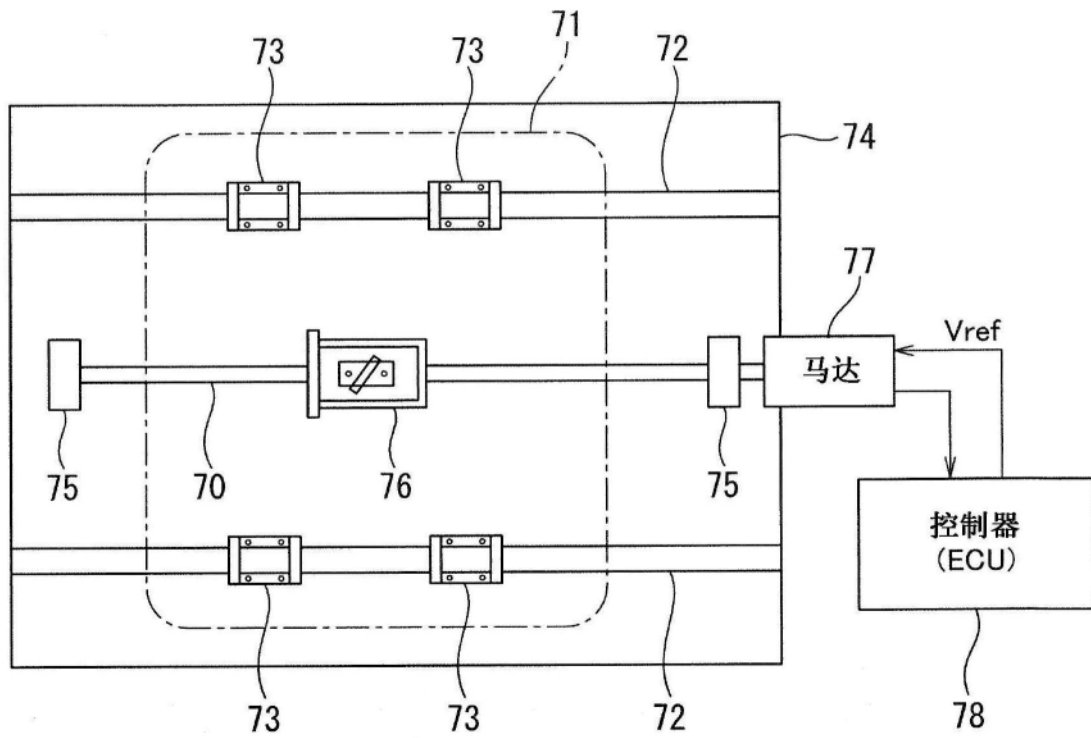


图10