



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101314362 B

(45) 授权公告日 2012. 11. 14

(21) 申请号 200810098383. 5

(22) 申请日 2008. 05. 30

(30) 优先权数据

2007-147188 2007. 06. 01 JP

(73) 专利权人 株式会社捷太格特

地址 日本大阪府大阪市

(72) 发明人 铃木浩

(74) 专利代理机构 北京集佳知识产权代理有限公司 11227

代理人 王艳江 黄霖

(51) Int. Cl.

B62D 5/04 (2006. 01)

B62D 6/00 (2006. 01)

H02P 6/00 (2006. 01)

(56) 对比文件

EP 1737116 A1, 2006. 12. 27,

EP 1737116 A1, 2006. 12. 27,

CN 1277584 A, 2000. 12. 20,

CN 1509926 , 2004. 07. 07,

审查员 游国忠

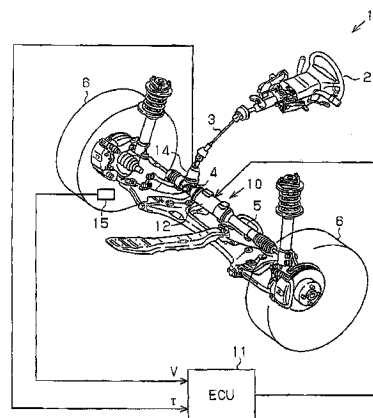
权利要求书 5 页 说明书 15 页 附图 11 页

(54) 发明名称

马达控制器和电动助力转向装置

(57) 摘要

本申请涉及一种马达控制器和一种电动助力转向装置。当在任何一相中发生电流流动故障时, 微型计算机 17 计算沿以预定转角 θA 、 θB 为渐近线的正切曲线而变化的 d 轴电流命令值 I_d^* 。微型计算机 17 通过依据 d 轴电流命令值 I_d^* 进行电流反馈控制来持续地输出使用除发生电流故障的相之外的两相作为电流流动相的马达控制信号。在这种两相驱动操作中, 微型计算机 17 以这样的方式计算 d 轴电流命令值 I_d^* 和 q 轴电流命令值 I_q^* , 使得电流流动相的相电流值在需要依据最大值对相电流进行限制的转角限制范围或者电流限制范围 ($\theta 1 < \theta < \theta 2$, $\theta 3 < \theta < \theta 4$) 中固定于为各相设定的能够流动的电流的各个最大值。



1. 一种马达控制器,包括:信号输出装置,其输出马达控制信号;和驱动电路,其基于所述马达控制信号向马达供应三相驱动电力,其中,所述信号输出装置包括计算装置、信号产生装置和异常检测装置,所述计算装置计算 d/q 坐标系统的 d 轴电流命令值和 q 轴电流命令值作为电流命令值,所述信号产生装置通过基于所述 d 轴电流命令值和所述 q 轴电流命令值而进行所述 d/q 坐标系统的电流反馈控制来产生所述马达控制信号,所述异常检测装置能够检测所述马达的任何一相中的故障电流流动,并且,当检测到故障电流流动时,所述信号输出装置输出使用除发生电流流动故障的相之外的两相作为电流流动相的马达控制信号,

所述马达控制器的特征在于,为所述马达的每个相电流值的绝对值设定能够在所述马达的各相中流动的电流的最大值,

其中,当发生电流流动故障时,所述计算装置计算沿以与发生电流流动故障的相相应的预定转角作为渐近线的正切曲线而变化的 d 轴电流命令值,并且,所述计算装置以这样的方式计算 d 轴电流命令值和 q 轴电流命令值,使得每个所述电流流动相的相电流值在需要基于所述最大值对所述相电流值进行限制的转角范围中固定于所述最大值。

2. 根据权利要求 1 所述的马达控制器,其特征在于,当发生电流流动故障且转角处在不需要对所述相电流进行限制的范围中时,所述计算装置使用下面的表达式依据发生电流流动故障的相来计算所述 d 轴电流命令值:

当 U 相中发生电流流动故障时:

$$I_d^* = I_q^* \frac{\sin \theta}{\cos \theta} = I_q^* \tan \theta$$

当 V 相中发生电流流动故障时:

$$I_d^* = -I_q^* \frac{\sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right)}{\sin\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right)} = I_q^* \tan\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)$$

当 W 相中发生电流流动故障时:

$$I_d^* = -I_q^* \frac{\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)}{\sin\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right)} = I_q^* \tan\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)$$

其中, θ : 转角, I_d^* : d 轴电流命令值, I_q^* : q 轴电流命令值, 并且, 在需要对所述相电流进行限制的转角范围中, 所述计算装置使用下面的表达式计算 d 轴电流命令值和 q 轴电流命令值:

当 U 相中发生电流流动故障时:

如果 $0 < \theta < \pi/2$ 或者 $3\pi/2 < \theta < 2\pi$

$$I_d^* = \sqrt{2} I_{x_max} \sin \theta \quad (I_q^* \geq 0)$$

$$I_d^* = -\sqrt{2} I_{x_max} \sin \theta \quad (I_q^* < 0)$$

$$I_q^* = \sqrt{2} I_{x_max} \cos \theta \quad (I_q^* \geq 0)$$

$$I_q^* = -\sqrt{2} I_{x_max} \cos \theta \quad (I_q^* < 0)$$

如果 $\pi/2 < \theta < \theta_2$ 或者 $\theta_3 < \theta < 3\pi/2$

$$I_d^* = -\sqrt{2} I_{x_max} \sin \theta \quad (I_q^* \geq 0)$$

$$I_d^* = \sqrt{2} I_{x_max} \sin \theta \quad (I_q^* < 0)$$

$$I_q^* = -\sqrt{2} I_{x_max} \cos \theta \quad (I_q^* \geq 0)$$

$$I_q^* = \sqrt{2} I_{x_max} \cos \theta \quad (I_q^* < 0)$$

假设：

$$\theta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{I_q^*}{\sqrt{2} I_{x_max}} \right) \quad (I_q^* \geq 0)$$

$$\theta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{-I_q^*}{\sqrt{2} I_{x_max}} \right) \quad (I_q^* < 0)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{-I_q^*}{\sqrt{2} I_{x_max}} \right) \quad (I_q^* \geq 0)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{I_q^*}{\sqrt{2} I_{x_max}} \right) \quad (I_q^* < 0)$$

$$\theta_3 = 2\pi - \theta_2$$

$$\theta_4 = 2\pi - \theta_1$$

当 V 相中发生电流流动故障时：

如果 $\theta_1 < \theta < \pi/6$ 或者 $7\pi/6 < \theta < \theta_4$

$$I_d^* = I_{x_max} \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \cos \theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \sin \theta \right) \quad (I_q^* \geq 0)$$

$$I_d^* = -I_{x_max} \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \cos \theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \sin \theta \right) \quad (I_q^* < 0)$$

$$I_q^* = I_{x_max} \left(-\sqrt{\frac{3}{2}} \sin \theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \cos \theta \right) \quad (I_q^* \geq 0)$$

$$I_q^* = -I_{x_max} \left(-\sqrt{\frac{3}{2}} \sin \theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \cos \theta \right) \quad (I_q^* < 0)$$

如果 $\pi/6 < \theta < \theta_2$ 或者 $\theta_3 < \theta < 7\pi/6$

$$I_d^* = -I_{x_max} \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \cos\theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \sin\theta \right) (I_q^* \geq 0)$$

$$I_d^* = I_{x_max} \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \cos\theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \sin\theta \right) (I_q^* < 0)$$

$$I_q^* = -I_{x_max} \left(-\sqrt{\frac{3}{2}} \sin\theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \cos\theta \right) (I_q^* \geq 0)$$

$$I_q^* = I_{x_max} \left(-\sqrt{\frac{3}{2}} \sin\theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \cos\theta \right) (I_q^* < 0)$$

假设：

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{-I_q^*}{\sqrt{2} I_{x_max}} \right) + \frac{\pi}{6} (I_q^* \geq 0)$$

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{I_q^*}{\sqrt{2} I_{x_max}} \right) + \frac{\pi}{6} (I_q^* < 0)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{I_q^*}{\sqrt{2} I_{x_max}} \right) + \frac{\pi}{6} (I_q^* \geq 0)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{-I_q^*}{\sqrt{2} I_{x_max}} \right) + \frac{\pi}{6} (I_q^* < 0)$$

$$\theta_3 = \frac{4\pi}{3} - \theta_2$$

$$\theta_4 = \frac{4\pi}{3} - \theta_1$$

当 W 相中发生电流流动故障时：

如果 $\theta_1 < \theta < 5\pi/6$ 或者 $11\pi/6 < \theta < \theta_4$

$$I_d^* = I_{x_max} \left(-\sqrt{\frac{3}{2}} \cos\theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \sin\theta \right) (I_q^* \geq 0)$$

$$I_d^* = -I_{x_max} \left(-\sqrt{\frac{3}{2}} \cos\theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \sin\theta \right) (I_q^* < 0)$$

$$I_q^* = I_{x_max} \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \sin\theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \cos\theta \right) \quad (I_q^* \geq 0)$$

$$I_q^* = -I_{x_max} \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \sin\theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \cos\theta \right) \quad (I_q^* < 0)$$

如果 $5\pi/6 < \theta < \pi/2$ 或者 $\pi/3 < \theta < 11\pi/6$

$$I_d^* = -I_{x_max} \left(-\sqrt{\frac{3}{2}} \cos\theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \sin\theta \right) \quad (I_q^* \geq 0)$$

$$I_d^* = I_{x_max} \left(-\sqrt{\frac{3}{2}} \cos\theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \sin\theta \right) \quad (I_q^* < 0)$$

$$I_q^* = -I_{x_max} \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \sin\theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \cos\theta \right) \quad (I_q^* \geq 0)$$

$$I_q^* = I_{x_max} \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \sin\theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \cos\theta \right) \quad (I_q^* < 0)$$

假设：

$$\theta_4 = \sin^{-1} \left(\frac{I_q^*}{\sqrt{2} I_{x_max}} \right) - \frac{\pi}{6} \quad (I_q^* \geq 0)$$

$$\theta_4 = \sin^{-1} \left(\frac{-I_q^*}{\sqrt{2} I_{x_max}} \right) - \frac{\pi}{6} \quad (I_q^* < 0)$$

$$\theta_3 = \sin^{-1} \left(\frac{-I_q^*}{\sqrt{2} I_{x_max}} \right) - \frac{\pi}{6} \quad (I_q^* \geq 0)$$

$$\theta_3 = \sin^{-1} \left(\frac{I_q^*}{\sqrt{2} I_{x_max}} \right) - \frac{\pi}{6} \quad (I_q^* < 0)$$

$$\theta_2 = \frac{2\pi}{3} - \theta_3$$

$$\theta_1 = \frac{2\pi}{3} - \theta_4$$

其中, I_d^* : d 轴电流命令值, I_q^* : q 轴电流命令值, I_{x_max} : 能够流动的电流的最大值。

3. 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有如权利要求 1 或 2

所述的马达控制器。

马达控制器和电动助力转向装置

技术领域

[0001] 本发明涉及一种马达控制器和一种电动助力转向装置。

背景技术

[0002] 在许多情况下,例如在电动助力转向装置(EPS)中使用的传统马达控制器包括异常检测装置。当由于供电线路断开或驱动电路的接触损坏而造成在U、V和W相的任何一相中发生电流流动故障时,异常检测装置便检测到异常。当检测到这种异常时,迅速停止马达的操作控制,从而进行故障保护。

[0003] 但是,在EPS中,如果暂停马达的操作控制,则将非常大地改变转向特性。具体地,驾驶员需要增加转向力以精确地操纵转向盘。在这方面,例如,日本公开专利公报第2003-26020号公开了一种马达控制器,即使在某一相中检测到电流流动故障,该马达控制器仍通过使用没有电流流动故障的两相作为电流流动相而持续地控制马达的操作。通过这种方式,辅助力持续地施加到转向系统,因而防止了由于故障保护而增加驾驶员的负荷。

[0004] 但是,参照图15,如果在上述传统情况中将正弦电流供应给电流流动相中的各相,则会引起转矩脉动,从而使转向舒适度下降。图15示出了其中U相中电流流动已经发生故障而在V相和W相中正常电流流动得到保证的示例。

[0005] 具体地,如图16所示,如果将传统的两相驱动操作中的马达电流的变化表示在d/q坐标系统中,则为马达转矩的目标控制值的q轴电流命令值保持固定不变。但是,实际的q轴电流值则根据正弦波变化。换句话说,所产生的马达电流并不符合所要求的转矩。因此,马达在没有实现其满输出性能的情况下持续运转。

[0006] 此外,如在日本公开专利公报第2006-67731号中所公开的,通过对d/q坐标系统的电流偏差(主要是q轴电流偏差)与预定阈值进行比较,来检测控制系统的异常,所述异常例如由于驱动电路故障或者传感器的问题而引起的过电流的产生。但是,在上述的两相驱动操作中,d-q坐标系统的电流值各自根据正弦波变化。因此,无论是否存在异常,都会引起电流偏差。因此,在两相驱动操作中不能检测到这种异常。

发明内容

[0007] 因此,本发明的目的是提供一种马达控制器和一种电动助力转向装置,它们以高精度检测异常,同时有效地抑制在任何一相中电流流动发生故障时而进行的两相驱动操作中的转矩脉动。

[0008] 为了实现上述目的,并且根据本发明的第一方面,提供了一种马达控制器,具有:信号输出装置,其输出马达控制信号;和驱动电路,其基于马达控制信号向马达供应三相驱动电力。信号输出装置包括计算装置、信号产生装置和异常检测装置,所述计算装置计算d/q坐标系统的d轴电流命令值和q轴电流命令值作为电流命令值,所述信号产生装置通过基于d轴电流命令值和q轴电流命令值而进行d/q坐标系统的电流反馈控制来产生马达控制信号,所述异常检测装置能够检测马达的任何一相中的故障电流流动。当检测到故障电

流流动时,信号输出装置输出使用除发生电流流动故障的相之外的两相作为电流流动相的马达控制信号。为马达的每个相电流值设定能够在马达的各相中流动的电流的最大值。当发生电流流动故障时,计算装置计算沿以与发生电流流动故障的相相应的预定转角为渐近线的正切曲线而变化的d轴电流命令值,并且,计算装置以这样的方式计算d轴电流命令值和q轴电流命令值,使得每个电流流动相的相电流值在需要基于最大值而对相电流值进行限制的转角范围中固定于最大值。

[0009] 根据本发明的第二方面,提供了一种具有根据本发明第一方面的马达控制器的电动助力转向装置。

附图说明

[0010] 图1是示意性示出电动助力转向装置(EPS)的立体图;

[0011] 图2是示出EPS的电气配置的框图;

[0012] 图3是示出用于检测发生电流流动故障的相的过程的流程图;

[0013] 图4是示出(当U相中电流流动已经发生故障时)两相驱动操作中d/q轴电流变化的曲线图;

[0014] 图5是示出(当V相中电流流动已经发生故障时)两相驱动操作中d/q轴电流变化的曲线图;

[0015] 图6是示出(当W相中电流流动已经发生故障时)两相驱动操作中d/q轴电流变化的曲线图;

[0016] 图7是示出(当U相中电流流动已经发生故障时)两相驱动操作中相电流变化的曲线图;

[0017] 图8是示出(当V相中电流流动已经发生故障时)两相驱动操作中相电流变化的曲线图;

[0018] 图9是示出(当W相中电流流动已经发生故障时)两相驱动操作中相电流变化的曲线图;

[0019] 图10是示出当(U相中)电流流动已经发生故障时,在使d轴电流命令值 I_d^* 和q轴电流命令值 I_q^* 在电流限制范围内维持固定不变的情况下所进行的电流反馈控制中的d/q轴电流变化的曲线图;

[0020] 图11是示出在不存在U相电流流动故障的情况下,在使用U相中发生电流流动故障时的d轴电流命令值而进行的电流反馈控制中的相电流变化的曲线图;

[0021] 图12是示出当(U相中)电流流动已经发生故障时,在使d轴电流命令值 I_d^* 和q轴电流命令值 I_q^* 在电流限制范围内维持固定不变的情况下所进行的电流反馈控制中的相电流变化的曲线图;

[0022] 图13是示出用于确定是否存在异常以及切换控制模式的过程的流程图;

[0023] 图14是示出用于计算在电流限制范围中的d轴电流命令值 I_d^* 和q轴电流命令值 I_q^* 的过程的流程图;

[0024] 图15是示出其中除发生电流流动故障之外的两相被用作电流流动相的传统两相驱动操作的曲线图;以及

[0025] 图16是示出在传统两相驱动操作中的d轴电流和q轴电流变化的曲线图。

具体实施方式

[0026] 现在将参照附图描述为电动助力转向装置 (EPS) 的本发明的实施方式。

[0027] 如图 1 所示,转向盘 2 固定到转向轴 3。转向轴 3 通过齿轮齿条机构 4 连接到齿条轴 5。转向轴 3 通过转向而被转动。转向轴 3 的转动通过齿轮齿条机构 4 转换成齿条轴 5 的线性往复运动。这改变了转向轮 6 的转向角。

[0028] EPS 1 具有 EPS 作动器 10 和 ECU 11。EPS 作动器 10 是将辅助力施加到转向系统以辅助转向的转向力辅助设备。ECU 11 是控制 EPS 作动器 10 的操作的控制装置。

[0029] EPS 作动器 10 是齿条式 EPS 作动器并且由与齿条轴 5 共轴布置的马达 12 或驱动源供以动力。在 EPS 作动器 10 中,马达 12 产生辅助转矩,该辅助转矩通过滚珠螺旋机构 (未示出) 传递给齿条轴 5。马达 12 为无刷型马达并且由从 ECU 11 供应的三相 (U、V、W) 驱动电力驱动。作为马达控制器的 ECU 11 通过调整由马达 12 产生的辅助转矩来调节施加到转向系统的辅助力 (动力辅助控制)。

[0030] 转矩传感器 14 和车速传感器 15 连接到 ECU 11。ECU 11 基于分别由转矩传感器 14 和车速传感器 15 检测的转向转矩 τ 和车速 V 操作 EPS 作动器 10 或进行动力辅助控制。

[0031] 下面将说明根据图示实施方式的 EPS 1 的电气配置。

[0032] 如图 2 所示,ECU 11 具有微型计算机 17 和驱动电路 18。微型计算机 17 是输出马达控制信号的信号输出装置。驱动电路 18 基于马达控制信号向马达 12 供应三相电力。

[0033] 驱动电路 18 是公知的 PWM 变换器,其通过并联连接与各相相应的三个基本单元 (臂) 而构成。每个基本单元由一对串联连接的开关元件形成。由微型计算机 17 输出的马达控制信号限定形成驱动电路 18 的每个开关元件的接通占空比。当马达控制信号提供给每个开关元件的门接线端时,开关元件响应于马达控制信号而被选择性地接通和断开。这会将安装在车辆中的电源 (未示出) 的直流电压转换成三相 (U、V、W) 驱动电力。该驱动电力然后被供应给马达 12。

[0034] ECU 11 具有分别检测相电流值 I_u 、 I_v 、 I_w 的电流传感器 21u、21v、21w,以及检测马达 12 的转角 θ 的转角传感器 22。根据基于这些传感器的检测信号检测的马达 12 的相电流值 I_u 、 I_v 、 I_w 和转角 θ 以及根据转向转矩 τ 和车速 V ,微型计算机 17 向驱动电路 18 输出马达控制信号。

[0035] 微型计算机 17 包括用作计算装置的计算部分 23 和用作信号产生装置的信号产生部分 24。计算部分 23 计算电流命令值作为施加到转向系统的辅助力的目标控制量。信号产生部分 24 基于由计算部分 23 提供的电流命令值产生马达控制信号。

[0036] 基于分别由转矩传感器 14 和车速传感器 15 检测到的转向转矩 τ 和车速 V ,计算部分 23 计算 d 轴电流命令值 I_d^* 和 q 轴电流命令值 I_q^* 。计算部分 23 然后将获得的 d 轴电流命令值 I_d^* 和 q 轴电流命令值 I_q^* 输出到信号产生部分 24。连同由计算部分 23 提供的 d 轴电流命令值 I_d^* 和 q 轴电流命令值 I_q^* ,信号产生部分 24 接收由相应的电流传感器 21u、21v、21w 检测到的相电流值 I_u 、 I_v 、 I_w 以及由转角传感器 22 检测到的转角 θ 。基于相电流值 I_u 、 I_v 、 I_w 和转角 θ (电角度),信号产生部分 24 通过对 d-q 坐标系统中的电流进行反馈控制而产生马达控制信号。

[0037] 具体地,在信号产生部分 24 中,相电流值 I_u 、 I_v 、 I_w 和转角 θ 一起被输入到用作

三相 / 两相转换部分的第一转换部分 25。第一转换部分 25 将相电流值 I_u 、 I_v 、 I_w 转换成 d/q 坐标系统中的 d 轴电流值 I_d 和 q 轴电流值 I_q 。由计算部分 23 输出的 d 轴电流命令值 I_d^* 和 q 轴电流命令值 I_q^* 与 d 轴电流值 I_d 和 q 轴电流值 I_q 中相应的一个一起被分别输入到减法器 26d 和减法器 26q。在正常控制下, 计算部分 23 输出“0”作为 d 轴电流命令值 I_d^* ($I_d^* = 0$)。

[0038] 由减法器 26d 计算的 d 轴电流偏差 ΔI_d 发送给 F/B 控制部分 27d。同样, 由减法器 26q 获得的 q 轴电流偏差 ΔI_q 输入到 F/B 控制部分 27q。F/B 控制部分 27d 进行反馈控制, 以便使代表实际电流的 d 轴电流值 I_d 追从由计算部分 23 输出的 d 轴电流命令值 I_d^* 。类似地, F/B 控制部分 27q 进行反馈控制, 以便使代表实际电流的 q 轴电流值 I_q 追从由计算部分 23 输出的 q 轴电流命令值 I_q^* 。

[0039] 具体地, F/B 控制部分 27d 通过将 d 轴电流偏差 ΔI_d 乘以预定 F/B 增益 (PI 增益) 而获得 d 轴电压命令值 V_d^* 。F/B 控制部分 27q 通过将 q 轴电流偏差 ΔI_q 乘以预定 F/B 增益 (PI 增益) 而确定 q 轴电压命令值 V_q^* 。分别由 F/B 控制部分 27d 和 F/B 控制部分 27q 提供的 d 轴电压命令值 V_d^* 和 q 轴电压命令值 V_q^* 连同转角 θ 被输入到为两相 / 三相转换部分 28 的第二转换部分 28。第二转换部分 28 将 d 轴和 q 轴电压命令值 V_d^* 、 V_q^* 转换成三相电压命令值 V_u^* 、 V_v^* 、 V_w^* 。

[0040] 电压命令值 V_u^* 、 V_v^* 、 V_w^* 输入到 PWM 转换部分 29。PWM 转换部分 29 产生与电压命令值 V_u^* 、 V_v^* 、 V_w^* 相应的负荷命令值 α_u 、 α_v 、 α_w 。信号产生部分 24 产生具有由每个负荷命令值 α_u 、 α_v 、 α_w 表示的接通占空比的马达控制信号。微型计算机 17 输出马达控制信号到形成驱动电路 18 的开关端 (的门接线端)。通过这种方式, 微型计算机 17 控制驱动电路 18 的操作或者控制通向马达 12 的驱动电力的供应。

[0041] [异常发生时的控制]

[0042] 如图 2 所示, ECU 11 的微型计算机 17 具有确定部分 31, 该确定部分 31 在 EPS 1 中发生任何异常时识别异常的类型。ECU 11 (微型计算机 17) 以与由确定部分 31 识别的异常的类型相一致的方式改变马达 12 的控制模式。

[0043] 具体地, 确定部分 31 接收异常信号 S_{tr} , 以便检测 EPS 作动器 10 的机械结构中的异常。响应于异常信号 S_{tr} , 确定部分 31 检测 EPS 1 的机械系统中的异常。确定部分 31 还接收 q 轴电流命令值 I_q^* , q 轴电流值 I_q , 相电流值 I_u 、 I_v 、 I_w , 马达 12 的转动角速度 ω , 以及各相的负荷命令值 α_u 、 α_v 、 α_w 。基于各条件量, 确定部分 31 检测控制系统中异常的发生。

[0044] 更具体地, 确定部分 31 监测 q 轴电流偏差 ΔI_q , 以整体检测控制系统中异常的发生, 包括转矩传感器 14 的故障和驱动电路 18 的故障。换句话说, 确定部分 31 将 q 轴电流偏差 ΔI_q 与预定阈值进行比较。如果 q 轴电流偏差 ΔI_q 在比预定时间长的一段时间上保持大于或等于阈值, 则确定部分 31 确定在控制系统中已经发生异常。

[0045] 确定部分 31 还基于相电流值 I_u 、 I_v 、 I_w , 转动角速度 ω 以及各相的负荷命令值 α_u 、 α_v 、 α_w 来检测发生电流流动故障的相, 所述电流流动故障由电力线路 (包括马达线圈) 断开或驱动电路 18 的失效接触引起。这种检测根据当 X 相 ($X = U, V, W$) 的相电流值 I_x 小于或等于预定值 I_{th} ($|I_x| \leq I_{th}$) 并且转动角速度 ω 处在确定是否已经发生断开情形的目标范围内 ($|\omega| \leq \omega_0$) 时、对应于 x 相的负荷命令值 α_x 是否持续地处于预定范围

之外 ($\alpha_{Lo} \leq \alpha \leq \alpha_{Hi}$) 来进行。预定范围 ($\alpha_{Lo} \leq \alpha \leq \alpha_{Hi}$) 设定为与阈值 ω_0 相应的值的范围,其中值 I_{th} 和目标范围根据该阈值 ω_0 限定。

[0046] 在这种情况下,值 I_{th} 或相电流值 I_x 的阈值设定为接近“0”的值。转动角速度 ω 的阈值 ω_0 设定为与马达的基本速度(最大转数)相应的值。负荷命令值 α_x 的阈值 α_{Lo} 和 α_{Hi} 分别设定为小于正常控制中负荷命令值 α_x 的下限值的值和大于正常控制中负荷命令值 α_x 的上限值的值。

[0047] 具体地,参照图 3 的流程图,确定部分 31 确定所检测到的相电流值 I_x 的绝对值是否小于或等于值 I_{th} (步骤 101)。如果相电流值 I_x 的绝对值小于或等于值 I_{th} ($|I_x| \leq I_{th}$, 步骤 101:是),则确定部分 31 确定转动角速度 ω 的绝对值是否小于或等于预定的阈值 ω_0 (步骤 102)。如果转动角速度 ω 小于或等于阈值 ω_0 ($|\omega| \leq \omega_0$, 步骤 102),则确定部分 31 确定负荷命令值 α_x 是否在预定范围中($\alpha_{Lo} \leq \alpha_x \leq \alpha_{Hi}$, 步骤 103)。如果负荷命令值 α_x 在预定范围之外(步骤 103:否),则确定部分 31 确定在 X 相中电流流动已经发生故障(步骤 104)。

[0048] 如果相电流值 I_x 大于值 I_{th} ($|I_x| > I_{th}$, 步骤 101:否),转动角速度 ω 大于阈值 ω_0 ($|\omega| > \omega_0$, 步骤 102:否)或者负荷命令值 α_x 在上述的预定范围中($\alpha_{Lo} \leq \alpha_x \leq \alpha_{Hi}$, 步骤 103:是),则确定部分 31 确定 X 相没有电流流动故障(确定出 X 相正常运转,步骤 105)。

[0049] 也就是说,如果在 X 相(U、V、W 相中的任何一相)中已经发生电流流动故障(断开),那么 X 相的相电流值 I_x 变为“0”。相电流值 I_x 在除发生故障之外的以下两种情况中可以变为“0”或“接近 0 的值”。

[0050] — 马达的转动角速度达到基本速度(最大转数)。

[0051] — 电流命令值基本为“0”。

[0052] 因此,确定部分 31 首先将属于确定对象的 X 相的相电流值 I_x 与预定值 I_{th} 进行比较,以确定相电流值 I_x 是否为“0”。然后,确定部分 31 确定当前情况是否符合除断开情况之外的其中相电流值 I_x 变为“0”或“接近 0”的上述两种情况中的任何一种。如果当前情况不符合任何一种情况,则确定部分 31 确定在 X 相中存在断开情形。

[0053] 具体地,如果尽管相电流值 I_x 不像小于或等于接近 0 的值 I_{th} 的值那么小但是负荷命令值 α_x 处于极端水平,则确定部分 31 确定在 X 相中已经发生电流流动故障。在图示实施方式中,确定部分 31 通过对 U、V 和 W 相中的各相进行上述确定来识别其中已经发生电流流动故障的相。

[0054] 虽然在出于图示目的的图 3 的流程图中将其省略,不过确定部分仅在电源电压大于或等于驱动马达 12 所需的规定电压时才进行这种确定。在指定步骤 104 中,确定部分 31 根据电流流动故障已经发生的确定状态是否持续预定的时间段来最终确定已经检测到异常。

[0055] ECU 11(微型计算机 17)根据确定部分 31 的确定结果来切换马达 12 的控制模式。具体地,确定部分 31 输出包括电流流动故障检测的确定结果作为异常检测信号 S_{tm} 。然后,计算部分 23 计算与异常检测信号 S_{tm} 相应的电流命令值,并且信号产生部分 24 产生马达控制信号。通过这种方式,微型计算机 17 将马达 12 的控制模式从一种模式切换到另一模式。

[0056] 更具体地, ECU 11 具有三种控制模式。所述控制模式是: “正常控制模式”, 用于正常状态; “辅助暂停模式”, 用于在已经发生异常并因此而必须停止马达 12 时的情况; 以及“两相驱动模式”, 用于在马达 12 的任何一相中已经发生电流流动故障时的情况。如果异常检测信号 S_{tm} 符合“正常控制模式”, 那么计算部分 23 计算正常状态的 d 轴电流命令值 I_d^* 和 q 轴电流命令值 I_q^* 。信号产生部分 24 相应地产生马达控制信号。

[0057] 如果异常检测信号 S_{tm} 符合“辅助暂停模式”, 那么计算部分 23 计算 d 轴电流命令值 I_d^* 和 q 轴电流命令值 I_q^* , 并且信号产生部分 24 以使马达 12 停止的方式产生马达控制信号。如果在机械系统或转矩传感器 14 中发生异常, 或者如果在供电系统中引起了例如产生过电流的异常, 则选择“辅助暂停模式”。进一步地, 根据“辅助暂停模式”, 马达 12 可立即停止或者可在通过减小马达 12 的输出而逐渐减小辅助力之后停止。在后一种情况下, 计算部分 23 逐渐减小 q 轴电流命令值 I_q^* 的绝对值。在停用马达 12 之后, 微型计算机 17 将形成驱动电路 18 的开关元件切换到断开状态, 并且断开未图示的电源继电器。

[0058] 对应于“两相驱动模式”的异常检测信号 S_{tm} 携带标识出其中发生电流流动故障的相的信息。如果异常检测信号 S_{tm} 对应于“两相驱动模式”, 那么信号产生部分 24 产生马达控制信号, 该控制信号指示使用除发生电流流动故障的相之外的两相作为电流流动相。

[0059] 在“两相驱动模式”下, 依据所检测到的发生电流流动故障的相, 计算部分 23 使用下面的表达式 (1) 到 (3) 来计算 d 轴电流命令值 I_d^* :

[0060] 当在 U 相中电流流动发生故障时:

$$[0061] \quad I_d^* = I_q^* \frac{\sin \theta}{\cos \theta} = I_q^* \tan \theta \quad \dots (1)$$

[0062] 当在 V 相中电流流动发生故障时:

$$[0063] \quad I_d^* = -I_q^* \frac{\sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right)}{\sin\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right)} = I_q^* \tan\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad \dots (2)$$

[0064] 当在 W 相中电流流动发生故障时:

$$[0065] \quad I_d^* = -I_q^* \frac{\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)}{\sin\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right)} = I_q^* \tan\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad \dots (3)$$

[0066] 参照图 4 到图 6, 依据 q 轴电流命令值 I_q^* 的符号, d 轴电流命令值 I_d^* 以预定转角 θ_A 、 θ_B 作为渐近线而单调非减 (当 $I_q^* > 0$ 时) 或者单调非增 (当 $I_q^* < 0$ 时)。更具体地, d 轴电流命令值 I_d^* 沿正切曲线 (正切: $\tan \theta$) 或者呈正切曲线变化。

[0067] 为了便于下面的说明, 在从 0° 到 360° 的电角度范围中, 与渐近线相应的两个转角中较小的一个将称作转角 θ_A , 而较大的一个将称作转角 θ_B 。如图 4 所示, 当在 U 相中已经发生异常并且电流因此而被引入到为 V 相和 W 相的其它两相中时, 转角 θ_A 和转角 θ_B 分别是“ 90° ”和“ 270° ”。参照图 5, 当 V 相中的电流流动已经发生故障时, 转角 θ_A 是“ 30° ”, 转角 θ_B 是“ 210° ”。参照图 6, 当 W 相中的电流流动已经发生故障时, 转角 θ_A 是

“150°”, 转角 θ_B 是“330°”。

[0068] 在使用上述表达式 (1) 到 (3) 计算 d 轴电流命令值 I_d^* 中, q 轴电流命令值 I_q^* 是与正常状态的 q 轴电流命令值 I_q^* 相同的值, 或者是与马达转矩的目标值相应的初始值“ I_{q_as} ”。

[0069] 基于 d 轴电流命令值 I_d^* 和 q 轴电流命令值 I_q^* , 信号产生部分 24 对 d/q 坐标系系统中的电流进行反馈控制。通过这种方式, 信号产生部分 24 产生马达控制信号, 以便进行使用除发生电流流动故障的相之外的两相作为电流流动相的两相驱动操作控制。

[0070] 也就是说, 在两相驱动操作中, 信号产生部分 24 基于根据由表达式 (1) 到 (3) 确定的正切曲线而变化的 d 轴电流命令值 I_d^* 进行电流反馈控制。通过这种方式, 在 U、V、W 相的各相中产生如由下面的表达式 (4) 到 (9) 所表示的、根据以转角 θ_A 、 θ_B 作为渐近线的正割曲线或余割曲线变化的相电流 (见图 7 到 9)。发生电流流动故障的相的相电流值是“0”。正割曲线对应于 $\sin \theta$ 的倒数 (余割: $\operatorname{cosec} \theta$), 余割曲线对应于 $\cos \theta$ 的倒数 (正割: $\sec \theta$)。

[0071] 当在 U 相中电流流动发生故障时:

$$[0072] \quad I_v = \frac{I_q^*}{\sqrt{2} \cos \theta} \quad \dots (4)$$

$$[0073] \quad I_w = \frac{-I_q^*}{\sqrt{2} \cos \theta} \quad \dots (5)$$

[0074] 当在 V 相中电流流动发生故障时:

$$[0075] \quad I_u = \frac{-I_q^*}{\sqrt{2} \sin \left(\theta - \frac{\pi}{6} \right)} \quad \dots (6)$$

$$[0076] \quad I_w = \frac{I_q^*}{\sqrt{2} \sin \left(\theta - \frac{\pi}{6} \right)} \quad \dots (7)$$

[0077] 当在 W 相中电流流动发生故障时:

$$[0078] \quad I_u = \frac{-I_q^*}{\sqrt{2} \sin \left(\theta + \frac{\pi}{6} \right)} \quad \dots (8)$$

$$[0079] \quad I_v = \frac{I_q^*}{\sqrt{2} \sin \left(\theta + \frac{\pi}{6} \right)} \quad \dots (9)$$

[0080] 因此, 在理论上, 除了与转角 θ_A 、 θ_B 相应的值之外, 在 d/q 坐标系系统中产生遵从 q 轴电流命令值 I_q^* 的 q 轴电流值 I_q 。

[0081] 换句话说, 如果马达 12 的转角 θ 不是转角 θ_A 、 θ_B , 则在理论上能够产生与所要求的转矩相应的 q 轴电流值 I_q 。也就是说, q 轴电流值 I_q 产生为等于 q 轴电流命令值 I_q^* 的值, 该 q 轴电流命令值 I_q^* 为马达转矩的目标值。通过这种方式, 由两相驱动操作而引起

的转矩脉动的发生在这种操作中得以抑制。此外,在维持改进的转向舒适度的同时,持续地施加辅助力。

[0082] 设定用于能够在各相的马达线圈 12u、12v、12w 中流动的电流的绝对值的最大值 I_{x_max} 。如果电流反馈控制基于在整个转角范围上都沿正切曲线变化的 d 轴电流命令值 I_d^* 进行,则有可能产生超过最大值 I_{x_max} 的相电流。

[0083] 因此,在两相驱动操作中,计算部分 23 以这样的方式计算 d 轴电流命令值 I_d^* 和 q 轴电流命令值 I_q^* ,使得作为电流流动相运转的两相的相电流值变为小于或等于上限值 (I_{x_max}) 并且大于或等于下限值 ($-I_{x_max}$)。这确保了马达的最大输出性能,并且抑制了由于超过最大值 I_{x_max} 的电流流动而引起的驱动电路的开关元件或者所述相的马达线圈的变热。因此马达得以稳定地运转。

[0084] 具体地,如果电流反馈控制基于在整个转角范围上都沿正切曲线变化的 d 轴电流命令值 I_d^* 进行,则计算部分 23 首先确定所检测到的马达 12 的转角 θ 是否在这样的转角范围中,即在该范围中在电流流动相中产生超过最大值 I_{x_max} 的相电流。

[0085] 更具体地,其中在各相中流动的电流的值必须进行限制的转角范围是其中相电流值变为大于或等于最大值 I_{x_max} 的范围 ($I_x \geq I_{x_max}, I_x \leq -I_{x_max}$)。换句话说,电流限制范围是位于与渐近线中的一条相应的转角 θ_A 附近的转角 θ_1 到转角 θ_2 的转角范围,或者是位于与渐近线中的另一条相应的转角 θ_B 附近的转角 θ_3 到转角 θ_4 的转角范围。因此,通过将最大值 I_{x_max} 相应的上限值 ($+I_{x_max}$) 和下限值 ($-I_{x_max}$) 代入上述表达式 (4) 到 (9) 中来获得转角 θ 的解,限定电流限制范围的四个转角 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 便得以确认。

[0086] 也就是说,如果发生电流流动故障的相是 U 相 (当 U 相中的电流流动已经发生故障时),使用表达式 (10)、(11)、(12) 和 (13) 进行计算,每个表达式 (10)、(11)、(12) 和 (13) 是将相电流值的上限值和下限值代入上述表达式 (4) 中而获得。通过这种方式,与渐近线相应的转角 θ_A 、 θ_B 的其中之一得以确定。换句话说,获得了限定转角 θ_A 附近的电流限制范围的转角 θ_1 、 θ_2 。

[0087] 当在 U 相中电流流动发生故障时:

[0088] 如果 $I_q^* \geq 0$,

$$[0089] \quad I_v = \frac{I_q^*}{\sqrt{2} \cos \theta_1} = I_{x_max} \therefore \theta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{I_q^*}{\sqrt{2} I_{x_max}} \right) \quad \dots (10)$$

$$[0090] \quad I_v = \frac{I_q^*}{\sqrt{2} \cos \theta_2} = -I_{x_max} \therefore \theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{-I_q^*}{\sqrt{2} I_{x_max}} \right) \quad \dots (11)$$

[0091] 如果 $I_q^* < 0$,

$$[0092] \quad I_v = \frac{I_q^*}{\sqrt{2} \cos \theta_1} = -I_{x_max} \therefore \theta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{-I_q^*}{\sqrt{2} I_{x_max}} \right) \quad \dots (12)$$

$$[0093] \quad I_v = \frac{I_q^*}{\sqrt{2} \cos \theta_2} = I_{x_max} \therefore \theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{I_q^*}{\sqrt{2} I_{x_max}} \right) \quad \dots (13)$$

[0094] 表达式 (10) 到 (13) 的解或者转角 θ_1 、 θ_2 由 $\cos \theta$ 的逆函数 (反余弦) 表示。

因此,满足下面的等式: $\cos(-\theta) = \cos \theta$; $\cos(\theta + 2\pi) = \cos \theta$ 。因此,使用下面的表达式 (14) 和 (15) 计算预定转角中的其相位与转角 θ_A 的相位偏移 2π 的另一转角。也就是说,获得了限定转角 θ_B 附近的电流限制范围的转角 θ_3 、 θ_4 。

$$[0095] \quad \theta_3 = 2\pi - \theta_2 \quad \dots (14)$$

$$[0096] \quad \theta_4 = 2\pi - \theta_1 \quad \dots (15)$$

[0097] 类似地,如果发生电流流动故障的相是 V 相(当 V 相中的电流流动已经发生故障时),则使用表达式 (16)、(17)、(18) 和 (19) 进行计算,每个表达式 (16)、(17)、(18) 和 (19) 是将相电流值的上限值和下限值代入上述表达式 (6) 中而获得。通过这种方式,获得了与渐近线相应的转角 θ_A 、 θ_B 的其中之一,即限定转角 θ_A 附近的电流限制范围的转角 θ_1 、 θ_2 。

[0098] 当在 V 相中电流流动发生故障时:

[0099] 如果 $I_q^* \geq 0$,

$$[0100] \quad I_u = \frac{-I_q^*}{\sqrt{2} \sin\left(\theta_1 + \frac{\pi}{6}\right)} = I_{x_max}$$

$$\therefore \theta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{-I_q^*}{\sqrt{2} I_{x_max}}\right) + \frac{\pi}{6} \quad \dots (16)$$

$$[0101] \quad I_u = \frac{-I_q^*}{\sqrt{2} \sin\left(\theta_2 - \frac{\pi}{6}\right)} = -I_{x_max}$$

$$\therefore \theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{I_q^*}{\sqrt{2} I_{x_max}}\right) + \frac{\pi}{6} \quad \dots (17)$$

[0102] 如果 $I_q^* < 0$,

$$[0103] \quad I_u = \frac{-I_q^*}{\sqrt{2} \sin\left(\theta_1 - \frac{\pi}{6}\right)} = -I_{x_max}$$

$$\therefore \theta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{I_q^*}{\sqrt{2} I_{x_max}}\right) + \frac{\pi}{6} \quad \dots (18)$$

$$[0104] \quad I_u = \frac{-I_q^*}{\sqrt{2} \sin\left(\theta_2 - \frac{\pi}{6}\right)} = I_{x_max}$$

$$\therefore \theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{-I_q^*}{\sqrt{2} I_{x_max}}\right) + \frac{\pi}{6} \quad \dots (19)$$

[0105] 表达式 (16) 到 (19) 的解或者转角 θ_1 、 θ_2 由 $\sin \theta$ 的逆函数(反正弦)表示。因此,基于等式 $\sin(\pi - \theta) = \sin \theta$,限定转角 θ_A 附近的电流限制范围的转角 θ_1 、 θ_2

与其相位与转角 θ_A 的相位偏移 2π 的其它预定转角或者与限定转角 θ_B 附近的电流限制范围的转角 θ_3 、 θ_4 之间的关系满足下面的表达式 (20) 和 (21)。通过使用表达式 (20)、(21) 进行计算, 其它转角 θ_3 、 θ_4 得以确定。

$$[0106] \quad \pi - \left(\theta_2 - \frac{\pi}{6} \right) = \theta_3 - \frac{\pi}{6} \therefore \theta_3 = \frac{4\pi}{3} - \theta_2 \quad \dots (20)$$

$$[0107] \quad \pi - \left(\theta_1 - \frac{\pi}{6} \right) = \theta_4 - \frac{\pi}{6} \therefore \theta_4 = \frac{4\pi}{3} - \theta_1 \quad \dots (21)$$

[0108] 此外, 如果发生电流流动故障的相是 W 相 (当 W 相中的电流流动已经发生故障时), 使用表达式 (22)、(23)、(24) 和 (25) 进行计算, 每个表达式 (22)、(23)、(24) 和 (25) 是将相电流值的上限值和下限值代入上述表达式 (9) 中而获得。通过这种方式, 获得了与渐近线相应的转角 θ_A 、 θ_B 的其中之一, 即限定转角 θ_B 附近的电流限制范围的转角 θ_3 、 θ_4 。

[0109] 当在 W 相中电流流动发生故障时:

[0110] 如果 $I_q^* \geq 0$,

$$[0111] \quad I_v = \frac{I_q^*}{\sqrt{2} s \ln \left(\theta_4 + \frac{\pi}{6} \right)} = I_{x_max}$$

$$\therefore \theta_4 = \sin^{-1} \left(\frac{I_q^*}{\sqrt{2} I_{x_max}} \right) - \frac{\pi}{6} \quad \dots (22)$$

$$[0112] \quad I_v = \frac{I_q^*}{\sqrt{2} s \ln \left(\theta_3 + \frac{\pi}{6} \right)} = -I_{x_max}$$

$$\therefore \theta_3 = \sin^{-1} \left(\frac{-I_q^*}{\sqrt{2} I_{x_max}} \right) - \frac{\pi}{6} \quad \dots (23)$$

[0113] 如果 $I_q^* < 0$,

$$[0114] \quad I_v = \frac{I_q^*}{\sqrt{2} s \ln \left(\theta_4 + \frac{\pi}{6} \right)} = -I_{x_max}$$

$$\therefore \theta_4 = \sin^{-1} \left(\frac{-I_q^*}{\sqrt{2} I_{x_max}} \right) - \frac{\pi}{6} \quad \dots (24)$$

$$[0115] \quad I_v = \frac{I_q^*}{\sqrt{2} s \ln \left(\theta_3 + \frac{\pi}{6} \right)} = I_{x_max}$$

$$\therefore \theta_3 = \sin^{-1} \left(\frac{I_q^*}{\sqrt{2} I_{x_max}} \right) - \frac{\pi}{6} \quad \dots (25)$$

[0116] 表达式 (23) 到 (25) 的解或者转角 θ_3 、 θ_4 由 $\sin \theta$ 的逆函数 (反正弦) 表示。

因此,基于等式 $\sin(\pi - \theta) = \sin \theta$,限定转角 θ_B 附近的电流限制范围的转角 θ_3 、 θ_4 与其相位与转角 θ_B 的相位偏移 2π 的其它预定转角或者与限定转角 θ_A 附近的电流限制范围的转角 θ_1 、 θ_2 之间的关系满足下面的表达式 (26) 和 (27)。

$$[0117] \quad \pi - \left(\theta_3 + \frac{\pi}{6} \right) = \theta_2 + \frac{\pi}{6} \therefore \theta_2 = \frac{2\pi}{3} - \theta_3 \quad \dots (26)$$

$$[0118] \quad \pi - \left(\theta_4 + \frac{\pi}{6} \right) = \theta_1 + \frac{\pi}{6} \therefore \theta_1 = \frac{2\pi}{3} - \theta_4 \quad \dots (27)$$

[0119] 通过使用表达式 (26) 和 (27) 进行计算,其它转角 θ_1 、 θ_2 得以确定。

[0120] 通过这种方式,确定部分 31 计算转角 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 ,这些转角限定位于与两条渐近线相应的预定转角 θ_A 、 θ_B 附近的相应电流限制范围。如果所检测到的马达 12 的转角 θ 落在电流限制范围 ($\theta_1 < \theta < \theta_2$, $\theta_3 < \theta < \theta_4$) 中的任何一个范围中,确定部分 31 便以这样的方式确定 d 轴电流命令值 I_d^* 和 q 轴电流命令值 I_q^* ,使得电流流动相的相电流值固定在上限值 (I_{x_max}) 或下限值 ($-I_{x_max}$)。

[0121] 具体地,确定部分 31 使用下面的表达式 (28) 到 (51) 且依据所确认的发生电流流动故障的相和 q 轴电流命令值 I_q^* 的符号来计算 d 轴电流命令值 I_d^* 和 q 轴电流命令值 I_q^* 。

[0122] 当在 U 相中电流流动发生故障时:

[0123] 如果 $\theta_1 < \theta < \pi/2$ 或者 $3\pi/2 < \theta < \theta_4$

$$[0124] \quad I_d^* = \sqrt{2} I_{x_max} \sin \theta \quad (I_q^* \geq 0) \quad \dots (28)$$

$$[0125] \quad I_d^* = -\sqrt{2} I_{x_max} \sin \theta \quad (I_q^* < 0) \quad \dots (29)$$

$$[0126] \quad I_q^* = \sqrt{2} I_{x_max} \cos \theta \quad (I_q^* \geq 0) \quad \dots (30)$$

$$[0127] \quad I_q^* = -\sqrt{2} I_{x_max} \cos \theta \quad (I_q^* < 0) \quad \dots (31)$$

[0128] 如果 $\pi/2 < \theta < \theta_2$ 或者 $\theta_3 < \theta < 3\pi/2$

$$[0129] \quad I_d^* = -\sqrt{2} I_{x_max} \sin \theta \quad (I_q^* \geq 0) \quad \dots (32)$$

$$[0130] \quad I_d^* = \sqrt{2} I_{x_max} \sin \theta \quad (I_q^* < 0) \quad \dots (33)$$

$$[0131] \quad I_q^* = -\sqrt{2} I_{x_max} \cos \theta \quad (I_q^* \geq 0) \quad \dots (34)$$

$$[0132] \quad I_q^* = \sqrt{2} I_{x_max} \cos \theta \quad (I_q^* < 0) \quad \dots (35)$$

[0133] 当在 V 相中电流流动发生故障时:

[0134] 如果 $\theta_1 < \theta < \pi/6$ 或者 $7\pi/6 < \theta < \theta_4$

[0135]

$$I_d^* = I_{x_max} \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \cos \theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \sin \theta \right) \quad (I_q^* \geq 0) \quad \dots (36)$$

[0136]

$$I_d^* = -I_{x_max} \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \cos\theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \sin\theta \right) \quad (I_q^* < 0) \quad \dots (37)$$

[0137]

$$I_q^* = I_{x_max} \left(-\sqrt{\frac{3}{2}} \sin\theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \cos\theta \right) \quad (I_q^* \geq 0) \quad \dots (38)$$

[0138]

$$I_q^* = -I_{x_max} \left(-\sqrt{\frac{3}{2}} \sin\theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \cos\theta \right) \quad (I_q^* < 0) \quad \dots (39)$$

[0139] 如果 $\pi/6 < \theta < \theta_2$ 或者 $\theta_3 < \theta < 7\pi/6$

[0140]

$$I_d^* = -I_{x_max} \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \cos\theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \sin\theta \right) \quad (I_q^* \geq 0) \quad \dots (40)$$

[0141]

$$I_d^* = I_{x_max} \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \cos\theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \sin\theta \right) \quad (I_q^* < 0) \quad \dots (41)$$

[0142]

$$I_q^* = -I_{x_max} \left(-\sqrt{\frac{3}{2}} \sin\theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \cos\theta \right) \quad (I_q^* \geq 0) \quad \dots (42)$$

[0143]

$$I_q^* = I_{x_max} \left(-\sqrt{\frac{3}{2}} \sin\theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \cos\theta \right) \quad (I_q^* < 0) \quad \dots (43)$$

[0144] 当在 W 相中电流流动发生故障时：

[0145] 如果 $\theta_1 < \theta < 5\pi/6$ 或者 $11\pi/6 < \theta < \theta_4$

[0146]

$$I_d^* = I_{x_max} \left(-\sqrt{\frac{3}{2}} \cos\theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \sin\theta \right) \quad (I_q^* \geq 0) \quad \dots (44)$$

[0147]

$$I_d^* = -I_{x_max} \left(-\sqrt{\frac{3}{2}} \cos\theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \sin\theta \right) \quad (I_q^* < 0) \quad \dots (45)$$

[0148]

$$I_q^* = I_{x_max} \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \sin\theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \cos\theta \right) \quad (I_q^* \geq 0) \quad \dots (46)$$

[0149]

$$I_q^* = -I_{x_max} \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \sin\theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \cos\theta \right) \quad (I_q^* < 0) \quad \dots (47)$$

[0150] 如果 $5\pi/6 < \theta < \theta_2$ 或者 $\theta_3 < \theta < 11\pi/6$

[0151]

$$I_d^* = -I_{x_max} \left(-\sqrt{\frac{3}{2}} \cos\theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \sin\theta \right) \quad (I_q^* \geq 0) \quad \dots (48)$$

[0152]

$$I_d^* = I_{x_max} \left(-\sqrt{\frac{3}{2}} \cos\theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \sin\theta \right) \quad (I_q^* < 0) \quad \dots (49)$$

[0153]

$$I_q^* = -I_{x_max} \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \sin\theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \cos\theta \right) \quad (I_q^* \geq 0) \quad \dots (50)$$

[0154]

$$I_q^* = I_{x_max} \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \sin\theta + \sqrt{\frac{1}{2}} \cos\theta \right) \quad (I_q^* < 0) \quad \dots (51)$$

[0155] 通过这种方式,在确保最大马达输出性能以及确保马达的稳定持续控制的同时,以改进的精确度检测控制系统中的异常。

[0156] 具体地,参照图 10,简单地通过在使 d 轴电流命令值 I_d^* 和 q 轴电流命令值 I_q^* 在各个电流限制范围 ($\theta_1 < \theta < \theta_2$, $\theta_3 < \theta < \theta_4$) 内维持固定不变的情况下进行电流反馈控制, d 轴电流 I_d 并不追从 d 轴电流命令值 I_d^* 。图 10 示出了当 U 相中的电流流动已经发生故障时的示例。换句话说,在正常状态(当各相中的正常电流流动都得到保证时)下,相电流如图 11 所示地在马达的相中流动。因此, d 轴电流值 I_d 遵循 d 轴电流命令值 I_d^* 。相比之下,如果任何一相中的电流流动发生故障并且进行两相驱动操作,则发生电流流动故障的相的电流值变为“0”。在这种状态下,电流流动相的相电流值呈现出如图 12 所示的波形。因此, d 轴电流值 I_d 并不追从 d 轴电流命令值 I_d^* 。因此,马达 12 的输出不能够最大化。

[0157] 但是,通过基于由表达式 (28) 到 (51) 确定的 d 轴电流命令值 I_d^* 和 q 轴电流命令值 I_q^* 来进行电流反馈控制, d 轴电流值 I_d 和 q 轴电流值 I_q 分别变为在上述电流限制范围中追从 d 轴电流命令值 I_d^* 和 q 轴电流命令值 I_q^* 的值。也就是说,电流流动相的相电流值在电流限制范围中固定在上限值 (T_{x_max}) 或下限值 ($-T_{x_max}$)。这确保了马达的最大输出性能。

[0158] 此外,通过预先将 q 轴电流命令值 I_q^* 确定在使得 q 轴电流值 I_d 能够追从与 q 轴电流命令值 I_q^* 相应的值的范围中,确保了在电流限制范围中基于 q 轴电流偏差 ΔI_q 所进行的异常检测的可靠性。因此,在两相驱动操作中,控制系统中的异常检测得以以增加的精确度进行。

[0159] 接下来,将说明用于使用微型计算机进行上述异常检测以及切换控制模式的过程、以及用于产生马达控制信号的过程。

[0160] 参照图 13, 微型计算机 17 首先确定是否已经发生任何异常 (步骤 201)。如果确定异常已经发生 (步骤 201: 是), 那么微型计算机 17 确定在控制系统中是否已经发生异常 (步骤 202)。如果确定异常位于控制系统中 (步骤 202: 是), 那么微型计算机 17 确定当前控制模式是否是两相驱动模式 (步骤 203)。如果当前驱动模式不是两相驱动模式 (步骤 203: 否), 那么微型计算机 17 确定控制系统的异常是否对应于任何一相中的电流流动故障 (步骤 204)。如果确定电流流动故障已经在任何一相中发生 (步骤 204: 是), 那么微型计算机 17 输出马达控制信号, 该信号指示使用除发生电流流动故障的相之外的其它两相作为电流流动相 (两相驱动模式, 步骤 205)。

[0161] 在步骤 205, 如已描述, 依据所识别出的发生电流流动故障的相、并且根据所检测到的转角 θ 是否落在任何一个电流限制范围 ($\theta_1 < \theta < \theta_2$, $\theta_3 < \theta < \theta_4$) 中, 微型计算机 17 计算 d 轴电流命令值 I_d^* 和 q 轴电流命令值 I_q^* 。

[0162] 具体地, 如图 14 中的流程图所示, 微型计算机 17 确定所检测到的转角 θ 是否在电流限制范围中 (步骤 301)。如果转角 θ 在电流限制范围之外 (步骤 301: 否), 则微型计算机 17 使用表达式 (1) 到 (3) 计算 d 轴电流命令值 I_d^* (步骤 302)。在这种情况下, 微型计算机 17 计算与正常状态 (当相中的正常电流流动得到保证时) 的 q 轴电流命令值 I_q^* 相同的值, 或者与马达转矩的目标值相应的初始值 ($I_q^* = I_{q_as}^*$)。

[0163] 如果所检测到的转矩 θ 落在电流限制范围中 (步骤 301: 是), 那么微型计算机 17 使用表达式 (28) 到 (51) 计算 d 轴电流命令值 I_d^* 和 q 轴电流命令值 I_q^* (步骤 303)。

[0164] 相对之下, 如果在步骤 201 中确定不存在异常 (步骤 201: 否), 那么微型计算机 17 输出用于正常状态的马达控制信号 ($I_d^* = 0$, 正常控制模式, 步骤 206)。如果确定异常发生在控制系统之外 (步骤 202: 否)、当前控制模式是两相驱动模式 (步骤 203: 是)、或者异常并不是在任何一相中的电流流动故障 (步骤 204: 否), 那么微型计算机 17 切换到辅助暂停模式 (步骤 207)。微型计算机 17 然后输出马达控制信号, 该信号指示停止马达 12 的运转并且断开电源继电器。

[0165] 所述的实施方式具有下面的优点。

[0166] 如果存在发生电流流动故障的任何相, 微型计算机 17 便会计算沿以预定转角 θ_A 、 θ_B 为渐近线的正切曲线变化的 d 轴电流命令值 I_d^* 。然后, 微型计算机 17 基于 d 轴电流命令值 I_d^* 进行电流反馈控制, 并因此而持续地输出使用除发生电流流动故障的相之外的两相作为电流流动相的马达控制信号。在两相驱动操作中, 微型计算机 17 以这样的方式计算 d 轴电流命令值 I_d^* 和 q 轴电流命令值 I_q^* , 使得电流流动相的相电流值在相电流值依据最大值而受到限制的转角范围或者电流限制范围 ($\theta_1 < \theta < \theta_2$, $\theta_3 < \theta < \theta_4$) 中固定于针对各相设定的所述最大值。

[0167] 通过这种方式, 除了在与渐近线相应的预定转角 θ_A 、 θ_B 附近的电流限制范围 ($\theta_1 < \theta < \theta_2$, $\theta_3 < \theta < \theta_4$) 之外, 产生了与所要求的转矩 (q 轴电流命令值 I_q^*) 相应的马达电流 (q 轴电流值 I_q)。因此, 即使任何一相中的电流流动发生故障, 转矩脉动的发生也得到抑制。这样, 在维持改进的转向舒适度的同时, 持续地施加辅助力。此外, 通过在电流限制范围中使电流流动相的相电流值维持在固定值即上限值 (I_{x_max}) 或下限值 ($-I_{x_max}$), 确保了马达的最大输出性能。此外, 通过预先确定能够通过 q 轴电流值 I_q 而得到的 q 轴电流命令值 I_q^* , 确保了在电流限制范围中基于 q 轴电流偏差 Δq 所进行的异常检测的

可靠性。因此,即使在两相驱动操作中,也能够以增加的精确度检测控制系统中的异常。

[0168] 所述的实施方式可以按下面的形式修改。

[0169] 虽然在所述的实施方式中本发明实施为电动助力转向装置 (EPS), 不过本发明可以实施为除用在 EPS 之外的其他用途的马达控制器。

[0170] 在所述的实施方式中, ECU 11 或者马达控制器根据三种模式操作, 所述三种模式即“正常控制模式”、“辅助暂停模式”和“两相驱动模式”。但是, 用于异常发生时的控制模式不限于这三种模式。也就是说, 只要是在使用除发生电流流动故障的相之外的两相作为电流流动相的情况下对马达的操作进行, 就可以使用任何合适的马达控制器。此外, 可以使用除所述的实施方式中的方法之外的异常检测方法。

[0171] 在两相驱动操作中计算的 d 轴电流命令值 I_d^* 不必非得确切地等于根据表达式 (1) 到 (3) 而获得的值。但是, 如果 d 轴电流命令值 I_d^* 使用表达式 (1) 到 (3) 确定, 那么 q 轴电流值 I_q 被产生成最接近于 q 轴电流命令值 I_q^* 的值。所产生的值越靠近由表达式确定的 d 轴电流命令值 I_d^* , 所获得的效果就越显著。

[0172] 在所述的实施方式中, 根据本发明, 控制系统中的异常检测是基于 q 轴电流偏差 ΔI_q 进行的。但是, 只要这种异常检测是基于 d-q 坐标系统的电流偏差进行的, 检测可以基于 d/q 坐标系统的 d 轴电流偏差 ΔI_d 或者合成向量偏差来进行。

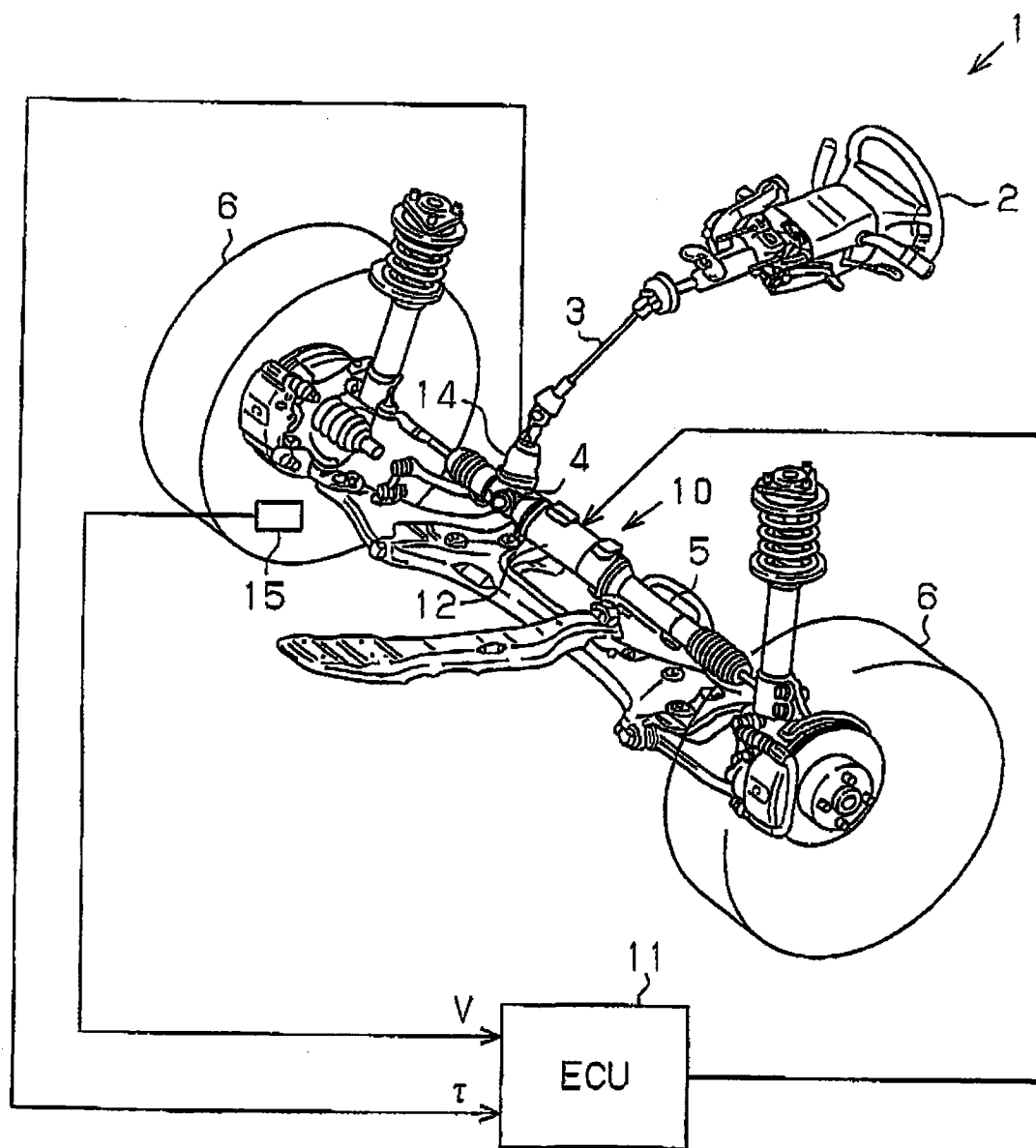


图 1

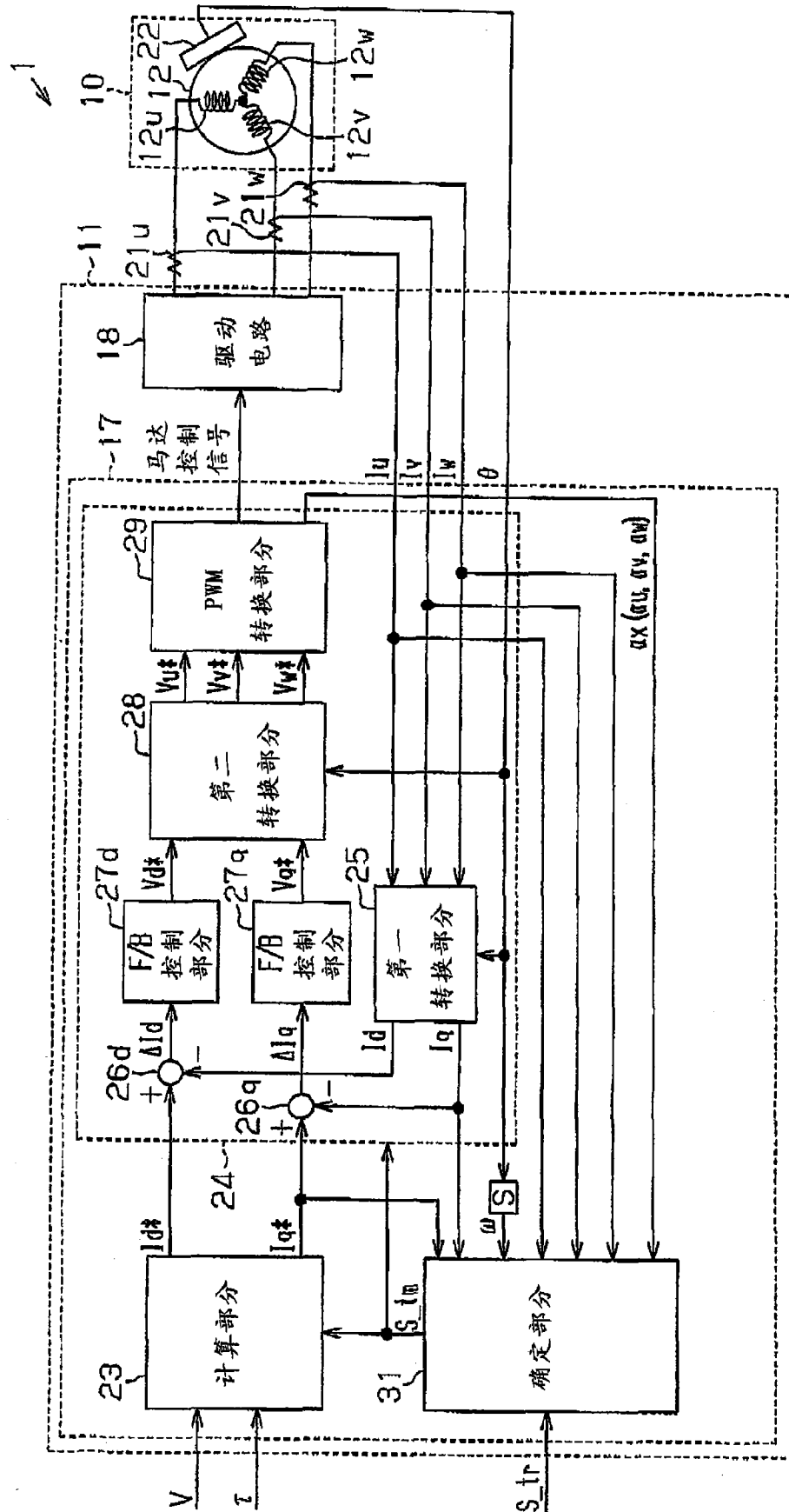


图2

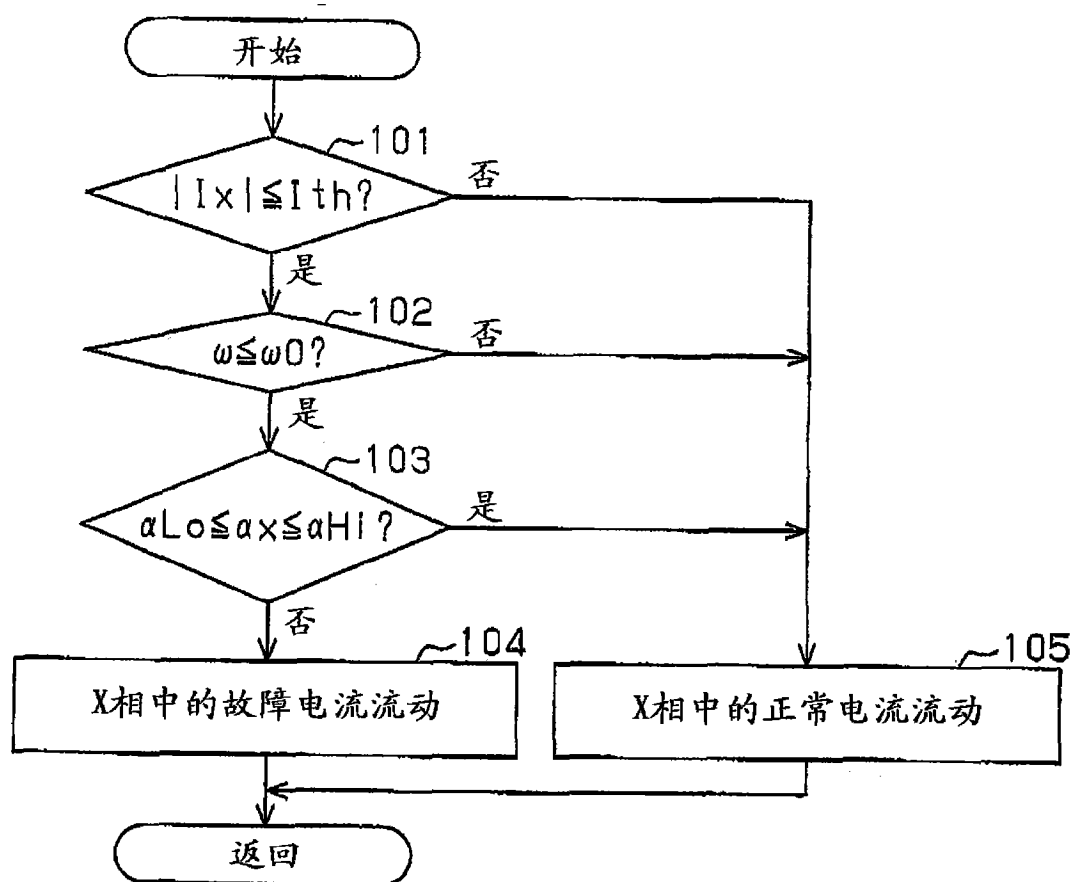


图 3

U相中的电流流动故障

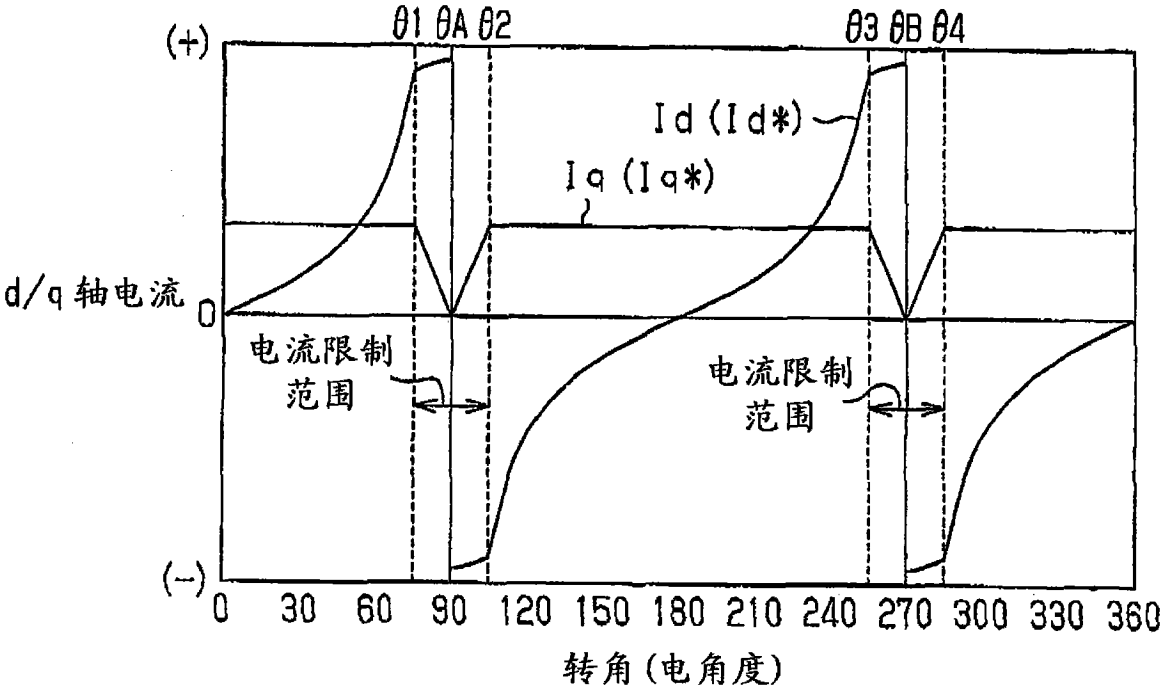


图 4

V相中的电流流动故障

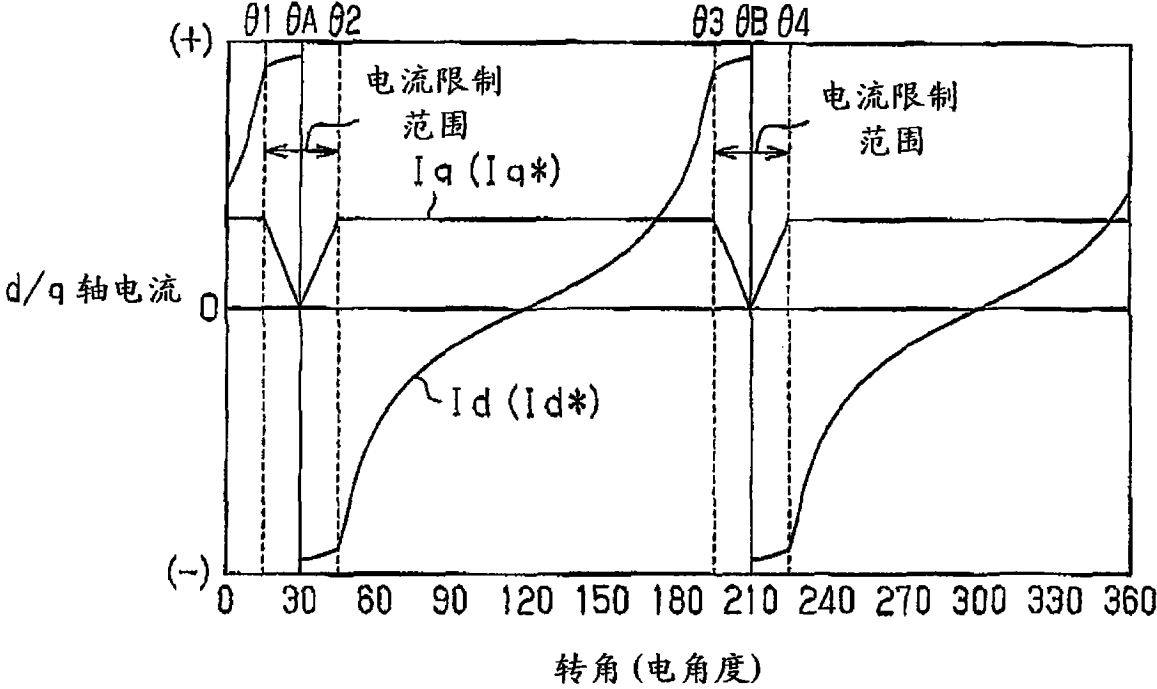


图 5

W相中的电流流动故障

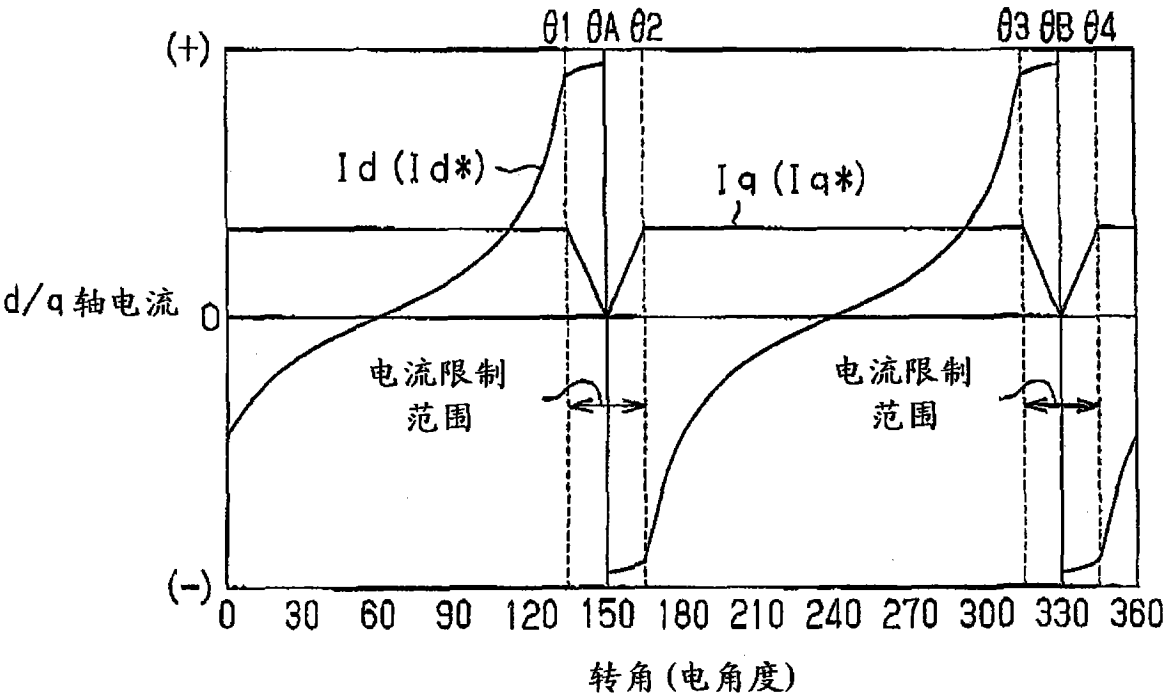


图 6

U相中的电流流动故障

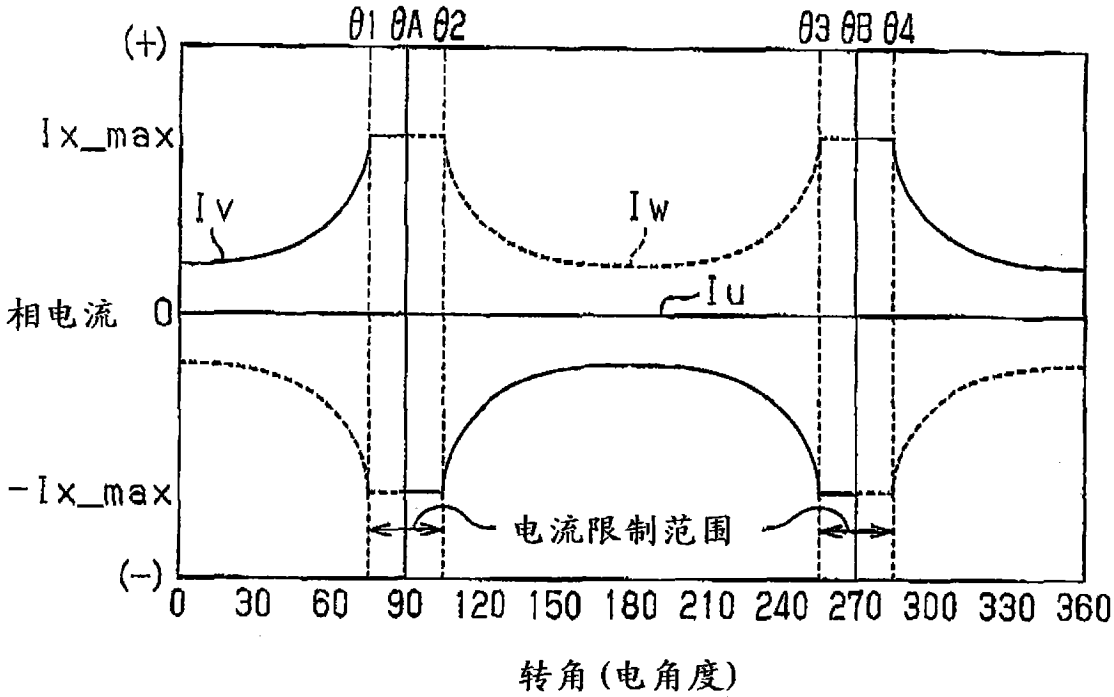


图 7

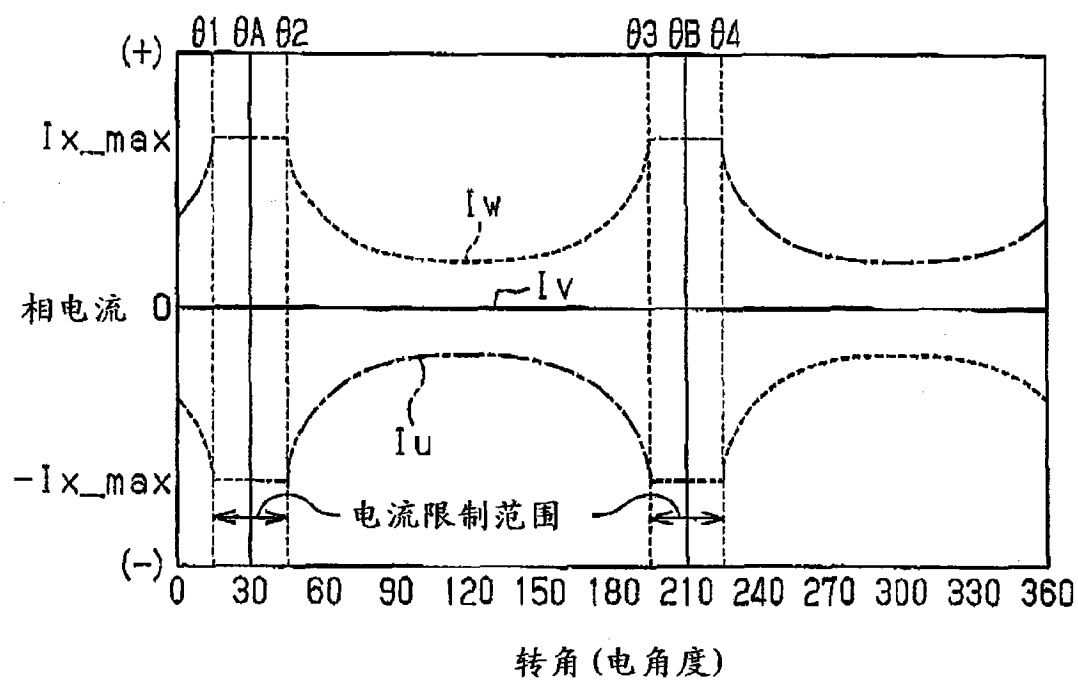
V相中的电流流动故障

图 8

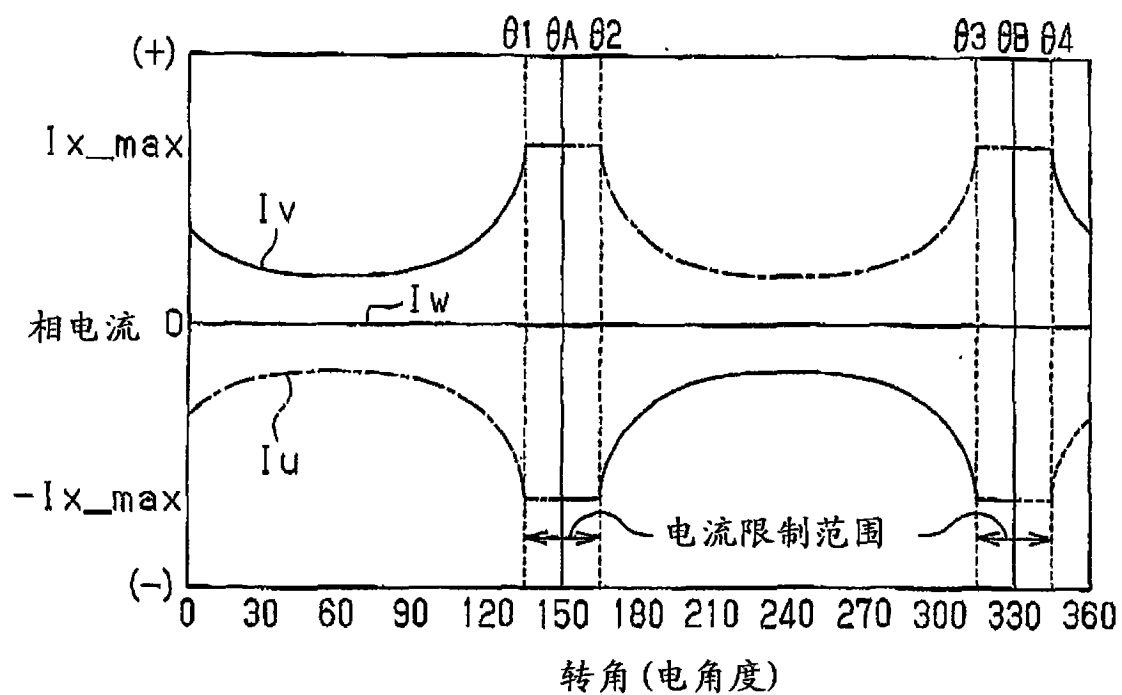
W相中的电流流动故障

图 9

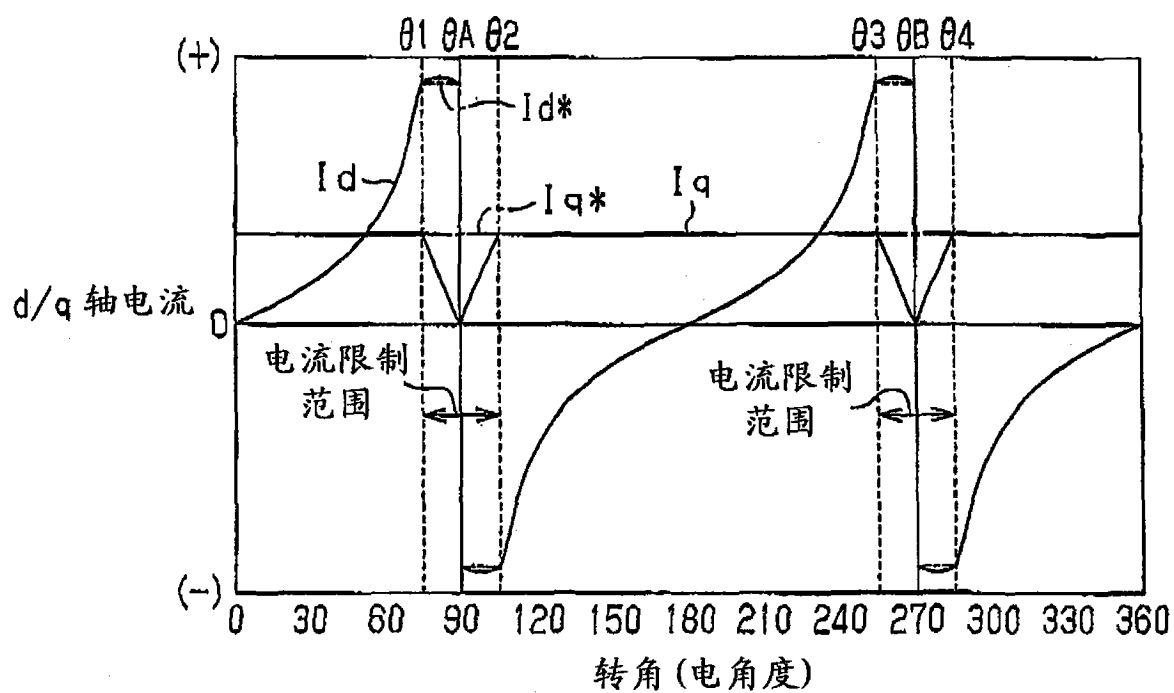


图 10

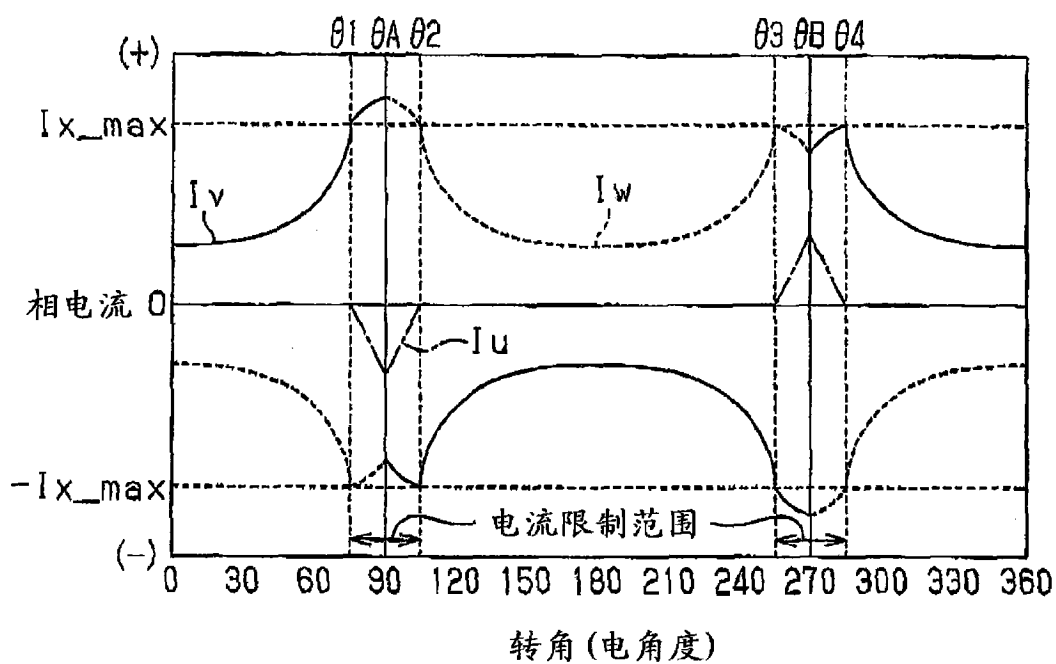


图 11

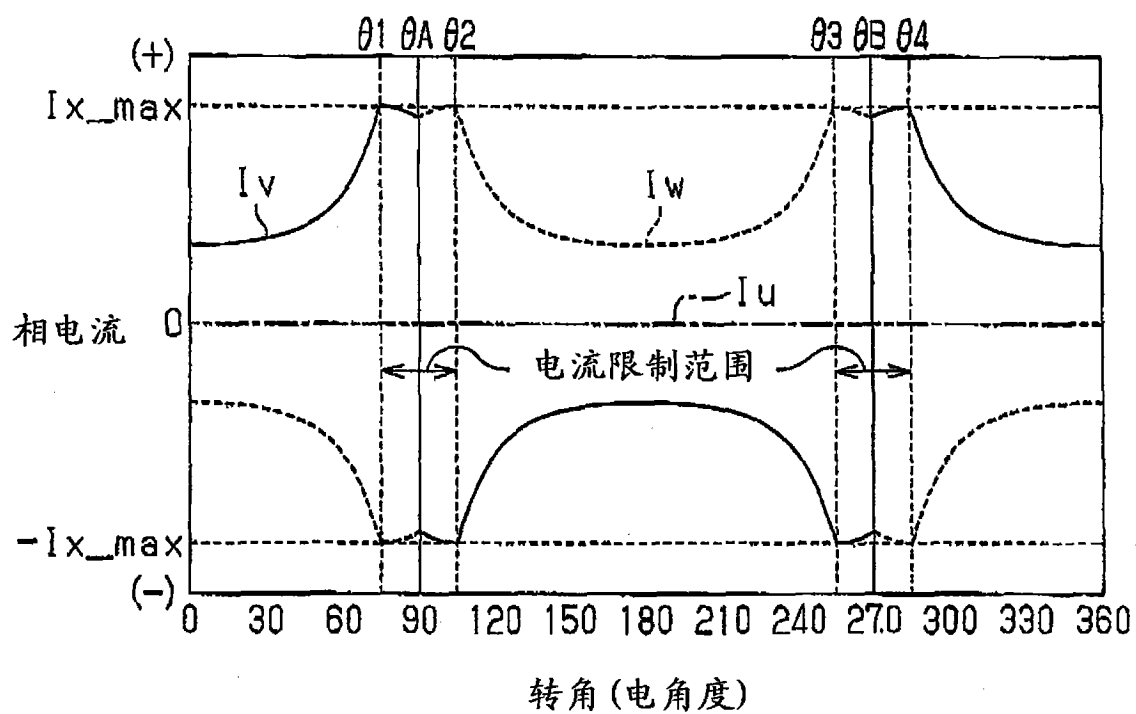


图 12

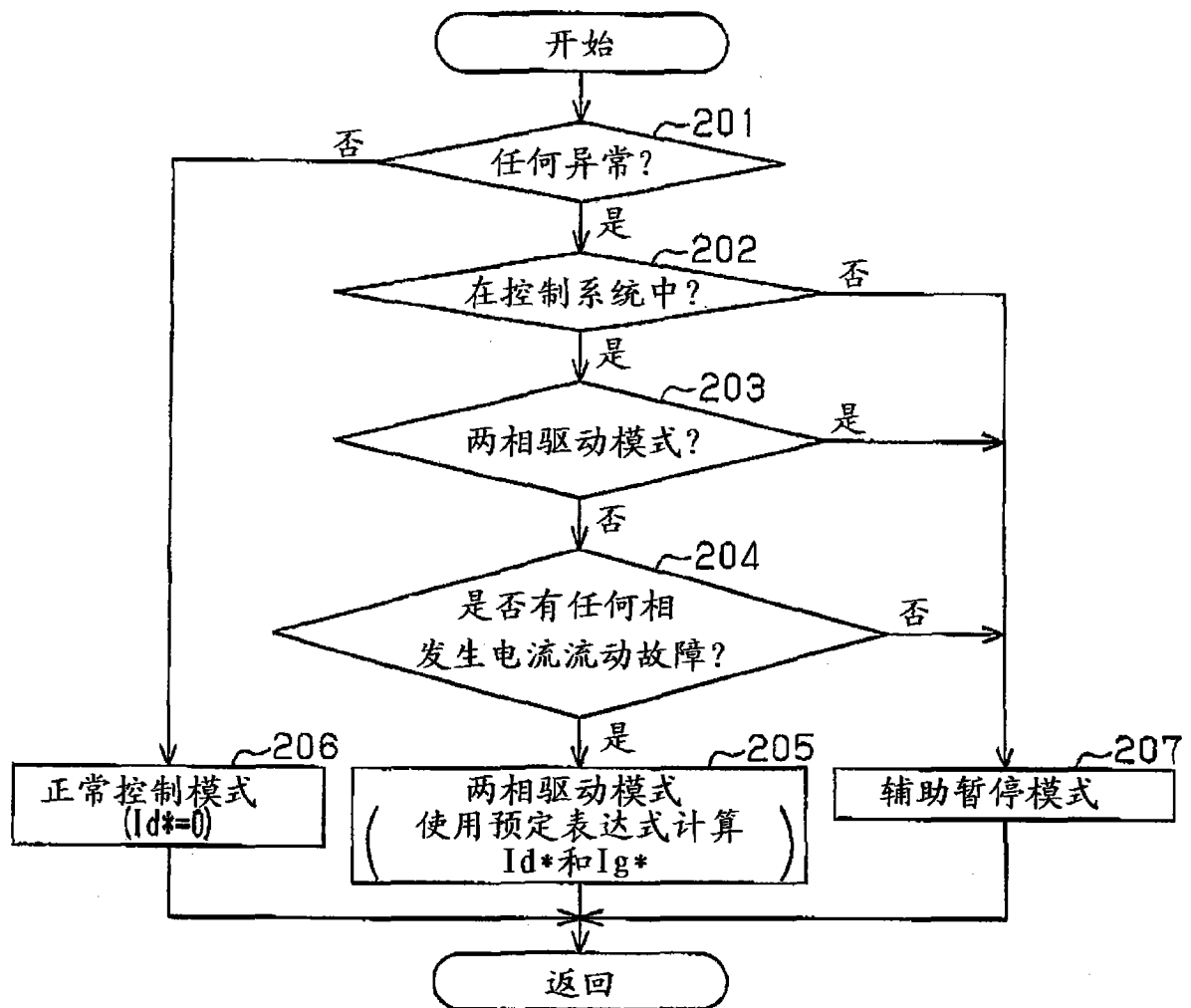


图 13

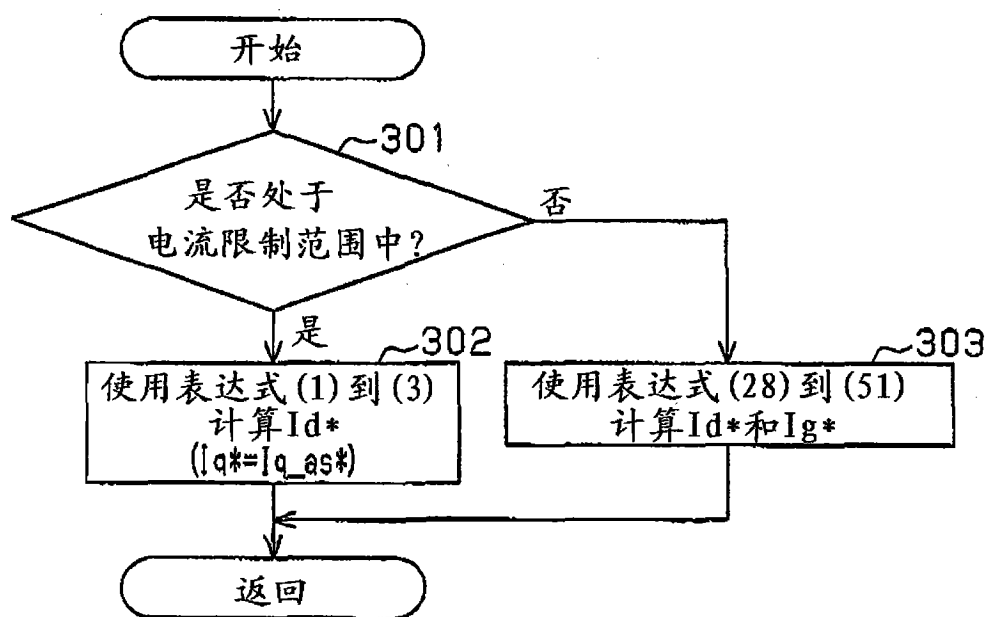


图 14

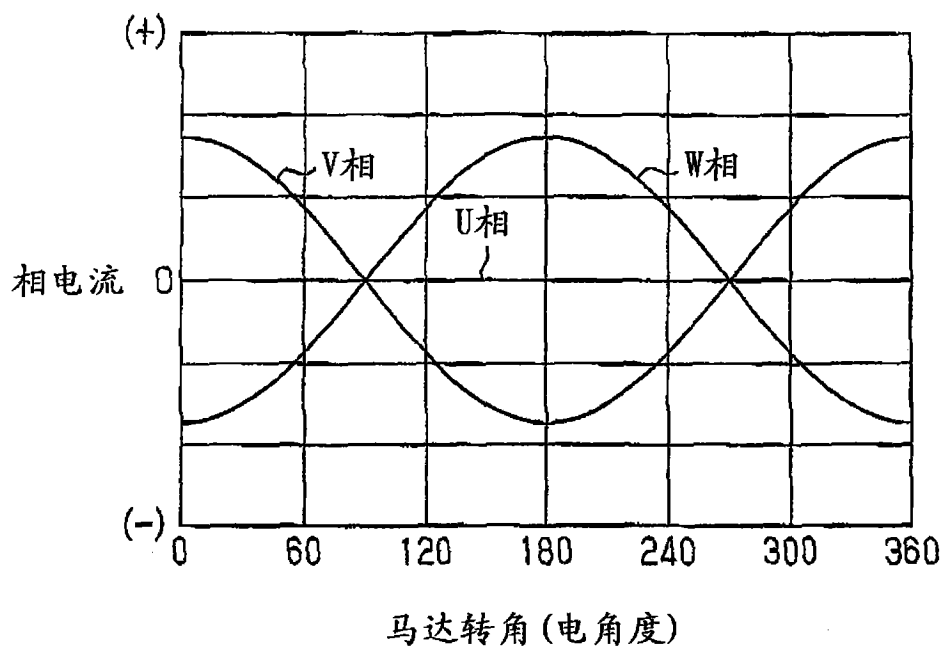


图 15

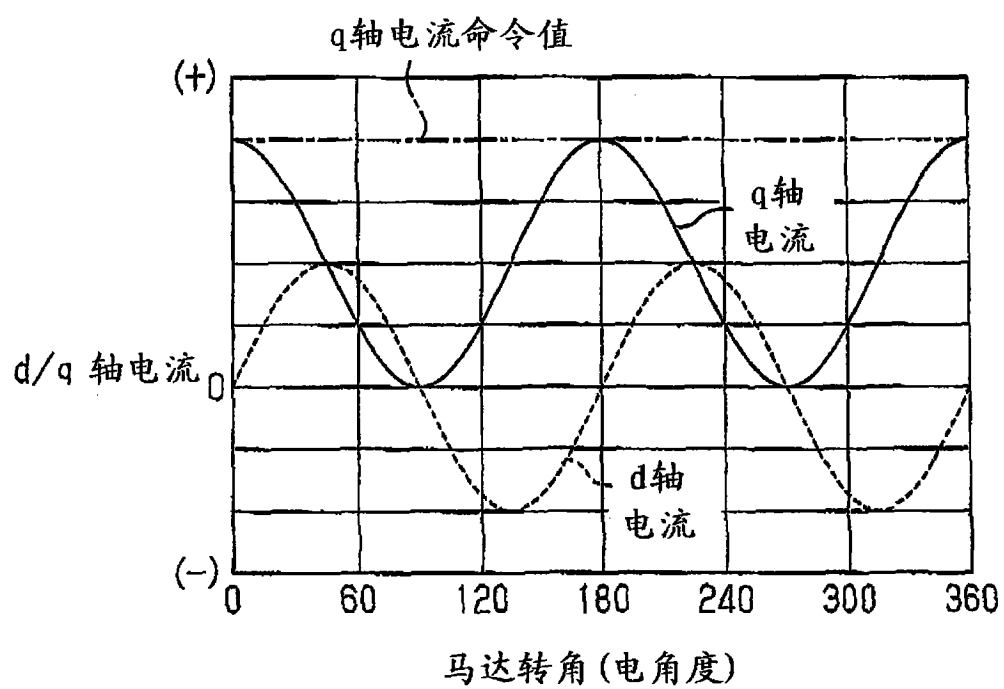


图 16