



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 200480022479.3

[43] 公开日 2006 年 9 月 13 日

[11] 公开号 CN 1833354A

[22] 申请日 2004.6.1

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

[21] 申请号 200480022479.3

代理人 杨凯梁永

[30] 优先权

[32] 2003.6.2 [33] US [31] 10/452,817

[86] 国际申请 PCT/US2004/017328 2004.6.1

[87] 国际公布 WO2004/109895 英 2004.12.16

[85] 进入国家阶段日期 2006.2.5

[71] 申请人 通用汽车公司

地址 美国密执安州

[72] 发明人 S·E·舒尔茨 N·R·帕特尔

J·M·纳加施马 Y·-S·永

S·K·苏尔

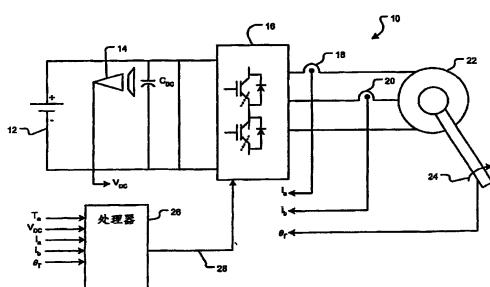
权利要求书 5 页 说明书 8 页 附图 7 页

[54] 发明名称

电机容错控制的方法与设备

[57] 摘要

一种用于控制具有电流传感器的电机的方法，其中所述电流传感器少于所述电机的全部的相，包括操作处理器以执行测试来初步确定所述电流传感器中的一个或多个是否存在故障，并且执行测试以最终确定在一个或多个电流传感器中存在故障。所述方法还包括操作处理器以利用所述电机的状态观测器来估计所述电机的状态，其中向所述状态观测器提供来自每一个无故障电流传感器的输入测量结果，如果有无故障电流传感器的话。忽略来自被确定为有故障的一个或多个电流传感器的测量结果。利用来自所述状态观测器的结果控制所述电机。



1. 一种用于控制具有电流传感器的电机的方法，其中所述电流传感器少于所述电机的全部的相，当所述电流传感器中的一个或多个发生故障时，所述方法包括操作处理器来：

执行测试以确定所述电流传感器中的一个或多个是否存在故障；

利用所述电机的状态观测器以估计所述电机的状态，其中向所述状态观测器提供来自无故障电流传感器的输入测量结果，如果有的话，忽略来自被确定为有故障的一个或多个电流传感器的测量结果；以及

利用来自所述状态观测器的结果控制所述电机。

2. 如权利要求 1 所述的方法，其中所述执行测试以确定在所述电流传感器中的一个或多个中存在故障，包括操作处理器来：

执行测试以初步确定存在于一个或多个电流传感器中的故障；以及

执行测试以最终确定存在于一个或多个电流传感器中的所述故障。

3. 如权利要求 2 所述的方法，其中所述电机是具有三个绕组的三相马达，在所述三个绕组中的两个绕组上有电流传感器，且其中执行测试以初步确定存在于一个或多个电流传感器中的故障，包括操作处理器来：

向具有电流传感器的所述三个绕组中的两个上施加第一测试电压波形；

采样作为时间函数的来自所述两个电流传感器的测量结果；

利用所述采样的测量结果，对具有电流传感器的所述两个绕组执行平衡测试；

利用所述采样的测量结果，对所述电流传感器执行增益错误测

试；

利用所述采样的测量结果，对所述两个电流传感器执行偏移误差测试；以及

利用所述测试确定存在故障，并初步识别所述两个电流传感器中的哪一个可能有故障。

4. 如权利要求3所述的方法，其中所述执行平衡测试包括操作所述处理器以确定由所述采样的测量结果代表的所述三个绕组中的两个的每一个中的采样的电流，是否大小相等且相位相反，并在预定的限度内。

5. 如权利要求3所述的方法，其中所述执行增益误差测试包括操作所述处理器以确定由所述采样的测量结果代表的所述三个绕组中的两个的每一个中的采样的电流的均方根值是否在预定的标称范围内。

6. 如权利要求3所述的方法，其中所述执行偏移误差测试，包括操作所述处理器以确定由所述采样的测量结果代表的所述两个绕组中的采样的电流的总和是否小于预定的一个或多个值。

7. 如权利要求3所述的方法还包括，当存在故障时，操作处理器来：

在所述三个绕组中的每一对之间逐次地施加第二测试电压波形，同时把剩余的未成对的绕组短接到所述绕组对中的一个绕组上；

采样作为时间函数的来自所述两个电流传感器的测量结果；

利用由施加所述第二测试电压产生的所述采样的测量结果，确定识别的电流传感器有故障。

8. 如权利要求1所述的方法，其中所述操作所述处理器以利用所述电机的状态观测器来估计所述电机的状态包括，按照由闭环观测器观测的估计的d-q电流来调节旋转d-q轴中的电流。

9. 如权利要求1所述的方法，其中所述操作所述处理器以利用所述电机的状态观测器来估计所述电机的状态包括，按照由开环观

测器观测的估计的 d-q 电流来调节旋转 d-q 轴中的电流。

10. 如权利要求 1 所述的方法，其中所述状态观测器是同步帧电流估计器。

11. 一种用于控制具有电流传感器的电机的设备，其中所述电流传感器少于所述电机的全部的相，所述设备包括：

换流器，被配置成给所述电机提供电流；

处理器，被配置成按照期望的转矩、功率或速度来控制通过所述换流器提供给所述电机的电流；

所述处理器还被配置成利用所述换流器来测试所述电流传感器，以确定在所述电流传感器中的一个或多个上是否存在故障，且如果确定存在故障，利用所述电机的状态观测器，如果有无故障电流传感器的话，利用来自每一个无故障电流传感器的状态输入测量结果，来估计所述电机的状态，忽略被确定为有故障的一个或多个电流传感器；以及利用所述换流器和来自所述状态观测器的结果来控制所述电机。

12. 如权利要求 11 所述的设备，其中还配置所述处理器以：

执行测试来初步确定存在于一个或多个所述电流传感器中的故障；以及

执行测试来最终确定存在于一个或多个所述电流传感器中的所述故障。

13. 如权利要求 12 所述的设备，其中所述电机是具有三个绕组的三相马达，在所述三个绕组中的两个绕组上带有电流传感器，并且其中执行测试来初步确定在所述电流传感器中的一个或多个上存在故障，所述处理器被配置成：

操作所述换流器给具有电流传感器的所述三个绕组中的两个绕组上施加第一测试电压波形；

采样作为时间函数的来自所述两个电流传感器的测量结果；

利用所述采样的测量结果对有电流传感器的所述两个绕组执行

平衡测试；

利用所述采样的测量结果对所述电流传感器执行增益误差测试；

利用所述采样的测量结果对所述两个电流传感器执行偏移误差测试；以及

利用所述测试确定存在故障并初步识别所述两个电流传感器中的哪一个可能有故障。

14. 如权利要求 13 所述的设备，其中执行平衡测试，所述处理器还被配置成确定由所述采样的测量结果代表的所述三个绕组中的两个绕组的每一个上的采样的电流是否在预定的限度内大小相等且相位相反。

15. 如权利要求 13 所述的设备，其中执行增益误差测试，所述处理器还被配置成确定由所述采样的测量结果代表的所述三个绕组中的两个绕组的每一个上的采样的电流的均方根值是否在预定的标称范围内。

16. 如权利要求 13 所述的设备，其中执行偏移误差测试，所述处理器被配置成确定由所述采样的测量结果代表的所述两个绕组上的采样的电流的总和是否小于预定的一个或多个值。

17. 如权利要求 13 所述的设备，其中所述处理器被配置成：

控制所述换流器在所述三个绕组中的每一对之间逐次施加第二测试电压波形，同时把剩余的未成对的绕组短接到所述绕组对中的一个绕组上；

采样作为时间函数的来自所述两个电流传感器的测量结果；以及

利用由施加所述第二测试电压产生的所述采样的测量结果，确定识别的电流传感器有故障。

18. 如权利要求 11 所述的设备，其中利用所述换流器和所述状态观测器来控制所述电机，所述处理器被配置成按照由闭环观测器

观测的估计的 d-q 电流来操作所述换流器以调节旋转 d-q 轴中的电流。

19. 如权利要求 11 所述的设备，其中利用所述换流器和所述状态观测器来控制所述电机，所述处理器被配置成按照由开环观测器观测的估计的 d-q 电流来调节旋转 d-q 轴中的电流。

20. 如权利要求 11 所述的设备，其中所述状态观测器是同步帧电流估计器，以及所述电机是内部永磁马达。

电机容错控制的方法与设备

技术领域

本发明涉及 AC 马达驱动系统，尤其涉及存在电流传感器故障情况下的 AC 马达驱动系统的容错控制的方法和设备。

背景技术

[0002] 现在多数高性能 AC 马达驱动系统使用相电流传感器，相电流信息被用于控制电机定子电流，其又间接控制电机转矩。电流传感器失灵通常导致 AC 马达驱动系统的失控和停机。

[0003] 最近，由于在自动化工业中越来越多地应用 AC 驱动，AC 马达驱动的容错控制已在文献中引起关注。例如，Raymond Sepe, Jr. ("Fault Tolerant Operation of Induction Motor Drives with Automatic Controller Reconfiguration", IEMDC 2001, 通过引用将其结合在此) 陈述的感应电机型驱动的电流传感器故障。在电流传感器失灵情况下，驱动从间接场定向控制 (IFOC) 重构为伏特/赫兹标量控制。虽然这种方法可能适合于异步感应电机驱动，但它不可应用于永磁 (PM) 型同步电机驱动。

[0004] 今天，场定向控制方案是高性能 AC 驱动的工业标准。场定向控制依赖于同步帧电流电流调节器来正确控制电机转矩。最经常的是通过检测三个定子相电流中的两个来获得电流信息。电机只需要两个传感器，因为电机被假定具有平衡的三相电流。从两个测量的电流可简单地计算第三电流。

[0005] 在电流传感器失灵的情况下，电机电流变得不可调。通常，电流将变得过大，并导致换流器进入关闭驱动的故障模式。没有电流传感器信息，常规驱动系统无法重新开始操作。

发明内容

[0006] 因此，本发明的某些配置提供用于控制具有电流传感器的电机

的方法，其中电流传感器少于电机的全部的相。该方法包括操作处理器来执行测试以确定电流传感器中的一个或多个是否存在故障。该方法还包括操作处理器来利用电机状态观测器估计电机状态，其中向状态观测器提供来自无故障电流传感器的输入测量结果，如果有任何这样的电流传感器的话。忽略来自被确定为有故障的一个或多个电流传感器的测量结果。处理器利用来自状态观测器的结果控制电机。在某些配置中，执行第一测试来初步确定在电流传感器中的一个或多个上存在故障，并执行另一测试来最终确定在一个或多个初步确定的电流传感器中存在故障。第一测试可能包括平衡测试、增益误差测试、以及偏移误差测试。

[0007]本发明的各种配置提供用于控制具有电流传感器的电机的设备，其中电流传感器少于电机的全部的相。该设备包括配置成给电机提供电流的换流器，以及配置成按照期望的转矩、功率或速度来控制由换流器向电机所提供的电流的处理器。处理器还配置成利用换流器测试电流传感器来确定电流传感器中的一个或多个上是否存在故障。如果确定存在故障，该处理器还被配置成利用电机的状态观测器，如果有无故障电流传感器的话，利用来自每个无故障电流传感器的状态输入测量结果，来估计电机状态。处理器还被配置成忽略确定为故障的一个或多个电流传感器；并利用换流器和来自状态观测器的结果来控制电机。

[0008]本发明的各种配置允许 AC 马达驱动系统在检测到一个或多个电流传感器故障后便利地重启。因此，驱动系统的操作可以继续，虽然有时伴随有性能下降。而且，本发明的配置提供一种可应用于 PM 型驱动系统的故障控制类型。

[0009]更具体地说，本发明的配置允许 AC 马达驱动系统以适度的方式重新开始操作，性能上可能有某些降级。这种能力在某种应用中也许是重要的。例如，用在电动车辆 (EV) 或混合电动车辆 (HEV) 中的本发明的配置允许驾驶员在电流传感器失灵后“缓慢费力地回

家”。

[0010]本发明的可应用性的其他范围将会在下文提供的详细说明中变得清晰。应理解的是，表示本发明的优选实施例的详细说明和具体实例，只是为了说明的目的而不是用来限制发明的范围。

附图说明

[0011]通过详细描述与附图，将会更充分地理解本发明，其中：

[0012]图1是代表本发明的AC马达驱动系统的示意图。

[0013]图2是图1的AC马达驱动系统的示意图，为了解释的目的添加了某些另外的细节。图1所示出或包括的部件没有全部在图2中示出。

[0014]图3是用于计算和说明目的的图2的等效电路。

[0015]图4是施加到图3的电路的某种电压和电流以及从图3的电路测量的某种电压和电流的曲线图。

[0016]图5、6和7代表图2的等效电路，说明在最终确定图2的一个或多个电流传感器为故障的测试过程中施加到图2的电机的绕组上的三个不同电压模式。

[0017]图8代表状态观测器，其可由图2的电路的处理器利用来提供当电流传感器中的一个有故障时对图2的电机进行控制。

[0018]图9代表另一个状态观测器，其可由图2的电路的处理器利用来提供当电流传感器中的一个有故障时对图2的电机进行控制。

具体实施方式

[0019]以下对优选的实施例的描述本质上只是示例性的，决不是用来限制本发明及其应用或使用。

[0020]更具体地说，参考图1，在本发明的马达驱动控制设备10的某些配置中，三相电机利用两相电流传感器。驱动系统包括：DC电源12（在电动车辆配置中其可能是电池组），DC总线电容器C_{DC}，DC总线电压传感器14，三相换流器16，两个电流传感器18和20，AC马达22和位置传感器24。更一般地，给电机22提供的电流传感器

(18 和 20) 比电机 22 的绕组的数量少一个，提供的换流器 16 与电机 22 的相数相同。还提供处理器 26，它可包括或者由具有存储器和数模 (D/A) 与模数 (A/D) 转换器的存储有程序的微处理器或微控制器组成。处理器 26 有至少一个输入 T_e ，它是指示电机 22 产生的期望的转矩、速度或功率的控制信号。处理器 26 还利用分别来自电流传感器 18 和 20 的信号 i_a 和 i_b ，以及来自位置传感器 24 的 θ_r 和来自总线电压传感器 14 的 V_{dc} 。使用这些信号，处理器 26 为换流器 16 产生一组门驱动信号 28。例如，电机 22 可能是内部永磁 (IPM) 马达，且处理器 26 可包括 IPM 控制。IPM 控制对那些本领域的技术人员是公知的，这里不需要进一步地解释。换流器 16 给电机 22 提供电流。更精确地，在许多配置中，换流器 16 通过由电压源 12 提供的脉冲宽度调制电流或门控给电机 22 提供电流。处理器 26 配置成诸如通过使用存储的程序，按照期望的转矩、功率或速度来控制由换流器 16 提供给电机 22 的电流。例如，提供信号 T_e 就是为此目的。

[0021] 在某种配置中，利用诊断部件和故障后控制部件来完成控制。为了简化本的说明，实际上，将假设电机 22 是内部永磁型的 AC 马达，但本发明也可应用于其他类型的马达。

[0022] 电流传感器 18 或 20 的突然严重的故障将导致马达驱动控制设备 10 的过流事故。如果换流器 16 的门驱动电路没提供保护，这种严重的故障将会导致换流器 16 的功率半导体不可恢复的故障。诸如电流传感器 18 和/或 20 的增益和偏移漂移这样的小故障将会导致与换流器 16 的输出频率同步的转矩脉动。在某个水平之上的偏移和增益漂移将会导致在电机 22 的高速下的过电流故障和重负载状态。

[0023] 按照本发明的各种配置，当电机 22 不旋转时，检测包括偏移和增益漂移的故障。更具体地说，处理器 26 被配置成诸如通过存储的程序，利用换流器 16 以测试电流传感器 18 和 20 来确定电流传感器中的一个或多个是否存在故障。如果确定存在故障，处理器 26 就利用电机 22 的状态观测器，如果有无故障电流传感器的话，利用来

自无故障电流传感器 18 和/或 20 的状态输入测量结果，来估计电机状态。忽略被确定有故障的电流传感器，以便它们的测量结果不被使用。处理器 26 还被配置成利用换流器 16 和来自状态观测器的结果来控制电机 22。

[0024] 因此，在某些配置中并参考图 2，对 c 相半导体开关 S_c^+ 和 S_c^- 的门控信号最初被处理器 26 阻塞。线对线的测试电压波形， $V_{ab} = V_m \sin(\omega t + \alpha)$ ，在处理器 26 的控制下由脉冲宽度调制（PWM）换流器 16 进行同步。（ V_m 是测试电压大小， ω 是电压角频率， α 是电压初始相位。）图 2 中的部分电路 10 可以用图 3 所示的等效电路 30 来分析。用 L_{ab} 代表电机 22 的 a 相端和 b 相端之间的感应系数。 L_{ab} 是转子位置的函数。让 R_s 代表用作电机 22 的 IMP 马达的相绕组的定子阻抗和功率半导体的传导阻抗的总和。由施加的电压 V_{ab} 在电路中产生的电流是：

$$i_a = -i_b = \frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \phi) \exp^{\frac{2R_s t}{L_{ab}}} + \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \phi),$$

其中

$$Z = \sqrt{4R_s^2 + (\omega L_{ab})^2}, \text{ 和 } \phi = \tan^{-1} \frac{\omega L_{ab}}{2R_s}$$

[0025] 可以看到瞬态项 $\frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \phi) \exp^{\frac{2R_s t}{L_{ab}}}$ 可通过按照电路 30 的功率因子调节施加的电压 V_{ab} 的相位来抑制。

[0026] 处理器 26 采样 a 相和 b 相电流 i_{as} 和 i_{bs} 的检测值，或者更精确地，使用作为时间函数的来自电流传感器 18 和 20 的采样测量结果来推断随时间变化的电流 i_{as} 和 i_{bs} 。在图 4 中，与施加的用于适当操作具有适当操作的电流传感器 18 和 20 的电机 22 的参考电压 V_{ab}^* 一起，分别示出了检测的 a 相和 b 相电流 i_{as} 和 i_{bs} 的迹线。还示出了函数 $-(i_{as} + i_{bs})$ ，其在施加输入测试电压波形过程的整个间隔上基本是零。图 4 中的结果代表利用有数百 μH 电感和包括功率半导体的阻抗的大

约 $10\text{m}\Omega$ 阻抗的电机 22 执行的测试。电路的时间常数是数十毫秒。在适当设置参考电压初始相位角的情况下，电流迹线无 DC 瞬态。测试电压波形的频率是 200Hz，持续时间为 5 个周期。因此，这种测试只需要执行 50 毫秒。

[0027] 如果电机 22 的绕组、换流器 16 以及电流传感器 18 和 22 没有问题，分别采样的 a 相和 b 相电流 i_{as} 和 i_{bs} 应该如图 4 所示大小相等而符号相反。这种比较包括对具有电流传感器的电机 22 的三个绕组中的两个绕组的平衡测试。电路的容差会使得电路不太可能完全的匹配，但本领域熟练的工程师将能够（也许凭经验）确定预定的限度 $\pm \varepsilon_1$ ，以使 $i_{as} = -i_{bs} \pm \varepsilon_1$ 成为电机 22 的可接受的控制的指示。该预定的限度可能包括百分误差而不是恒定误差，或者除恒定误差之外包括百分误差。同样，采样的电流的均方根 (RMS) 值对每一相电流大约分别为 $\frac{V_m}{Z\sqrt{2}}$ 。因此，增益误差测试包括确定采样电流的 RMS 值是否在（也许凭经验确定的）第二预定的限度内，该第二预定的限度限定预定的标称范围。此外，由于零 DC 瞬态和整数个激励周期，每相电流的测量值的总和应该大约为零。该总和是否小于（也许凭经验确定的）预定的一个或多个值的测试包括偏移误差测试。如果该总和不为零或不在零附近，在一个或多个电流传感器 18、20 中可能有显著的偏移误差，或者换流器电源电路 16 或 IPM 马达 22 绕组 L_a 、 L_b 或 L_c 有故障。

[0028] 平衡测试、增益误差测试和偏移误差测试的组合可确定是否存在一个或多个故障，以及初步识别两个电流传感器中的哪一个可能有故障。例如，如果平衡测试或偏移误差测试失败，一个或两个电流传感器可能都有故障。如果增益误差测试失败，使测试失败的采样的一个或多个电流指示哪一个传感器可能有故障。然而，这些测试不能排除除传感器之外的其他东西发生故障而不是传感器（例如马达绕组）有故障的可能性。因此，如果显示有故障，则执行另一

测试以确定识别的一个或多个电流传感器有故障。

[0029] 对这种附加的测试，参考图 5，在马达的 a 相和 b 相端施加第二测试电压波形 $V_b = V_m \sin(\omega t + \alpha)$ 。这种第二测试电压在处理器 26 的控制下由脉冲宽度调制换流器 16 进行同步。同样在处理器 26 的控制下，通过向 C 相发送适当的门驱动信号来使 C 相端与 b 相端短路。测量 a 相和/或 b 相电流并将其存储在处理器 26 的存储器中。接下来，在如图 6 所示的 b 相与 c 相之间施加第二测试电压，并且最后也在 b 相与 c 相之间施加第二测试电压，如图 7 所示。如果换流器 16 与 a 相、b 相和 c 相马达 22 的绕组 L_a 、 L_b 和 L_c 平衡很好，则在图 5、6 和 7 中的测量的相电流的每个相应的时间点处存储的值的总和应当为零。更具体地说，如果值的总和小于（可能凭经验确定的）一个量值，最终确定通过其他测试初步确定为有故障的电流传感器实际上是有故障的。

[0030] 如果一个或多个电流传感器被最终确定为有故障，来自该传感器的测量的值随后被处理器 26 忽略。而参考图 8，处理器 26 使用电机 22 的状态观测器 32 来调节由 PWM 换流器 16 提供给电机 22 的电流。参考图 8，在本发明的某些配置中利用观测器来给处理器 26 提供估计的电流信息。基于估计的 d-q 电流来调节旋转 d-q 轴中的电流。在电流传感器 16 和 18 两者都有故障的情况下由开环观测器来观测估计的 d-q 电流，或者在单个电流传感器（16 或 18）有故障的情况下由闭环观测器来观测估计的 d-q 电流。观测器的结构如图 8 所示，其中如果无故障的电流传感器可用，则测量的值被用作校正项并被反馈给状态估计器以减小估计误差。

[0031] 观测器的输出是估计的状态向量 \hat{X} ，其包括估计的同步帧电流 \hat{i}_{ds}^r 和 \hat{i}_{qs}^r 。矩阵 A 是状态矩阵。矩阵 C 反馈与测量的定子电流（如果可用的话）比较的估计的状态。矩阵 L 衡量作为减小观测器误差的校正项而反馈给观测器的测量误差。

[0032] 在某些配置中，参考图 9，电机 22 是内部永磁马达，同步帧电

流估计器 34 被用作状态观测器 32。

[0033]更一般地，按照用作电机 22 的电机的类型制作所提供的状态观测器。

[0034]这些实验举例说明了在存在电流传感器故障的情况下如何获得适度的性能，于是，为期望的“缓慢费力地回家”的能力，允许以降级的性能来操作。

[0035]更具体地说，本发明的各种配置允许 AC 马达驱动系统在检测到一个或多个电流传感器故障后方便地重启。于是，驱动系统的操作可以继续，虽然有时有降低的性能。而且，本发明的配置提供了一种可应用于 PM 型驱动系统的故障控制类型。

[0036]另外，本发明的配置允许 AC 马达驱动系统以适度的方式重新开始操作，可能伴随有性能的降级。这样的能力在电动车辆 (EV) 与混合电动车辆 (HEV) 中是很有用的，这样的能力允许驾驶员“缓慢费力地回家”或在这样的电流传感器失灵之后提供充足的牵引将车辆拖到安全的位置。

[0037]本发明的描述本质上只是示例性的，因此，不偏离发明要点的各种变化被视为在本发明的范围之内。这样的变化不被看作与本发明的精神和范围相背离。

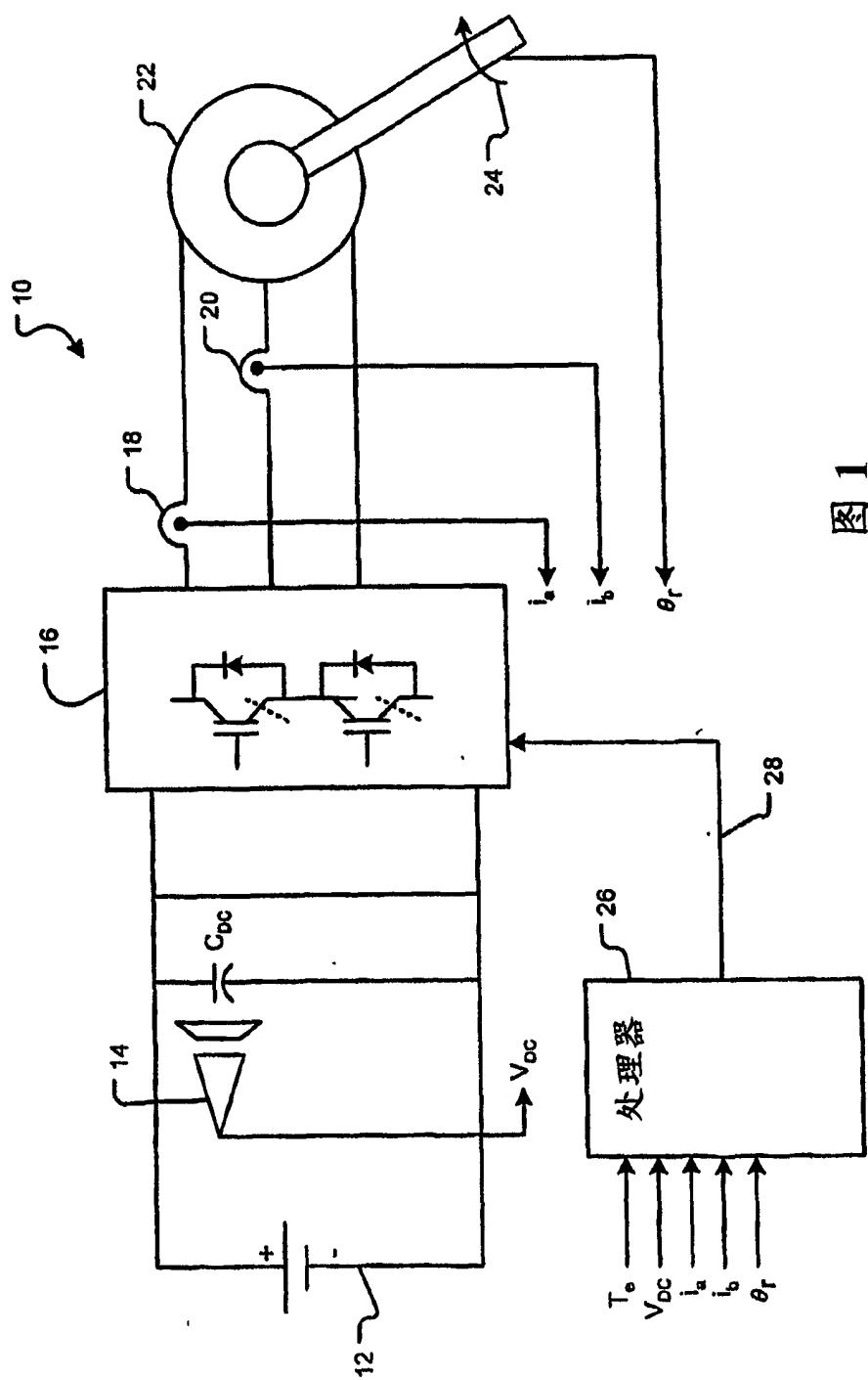
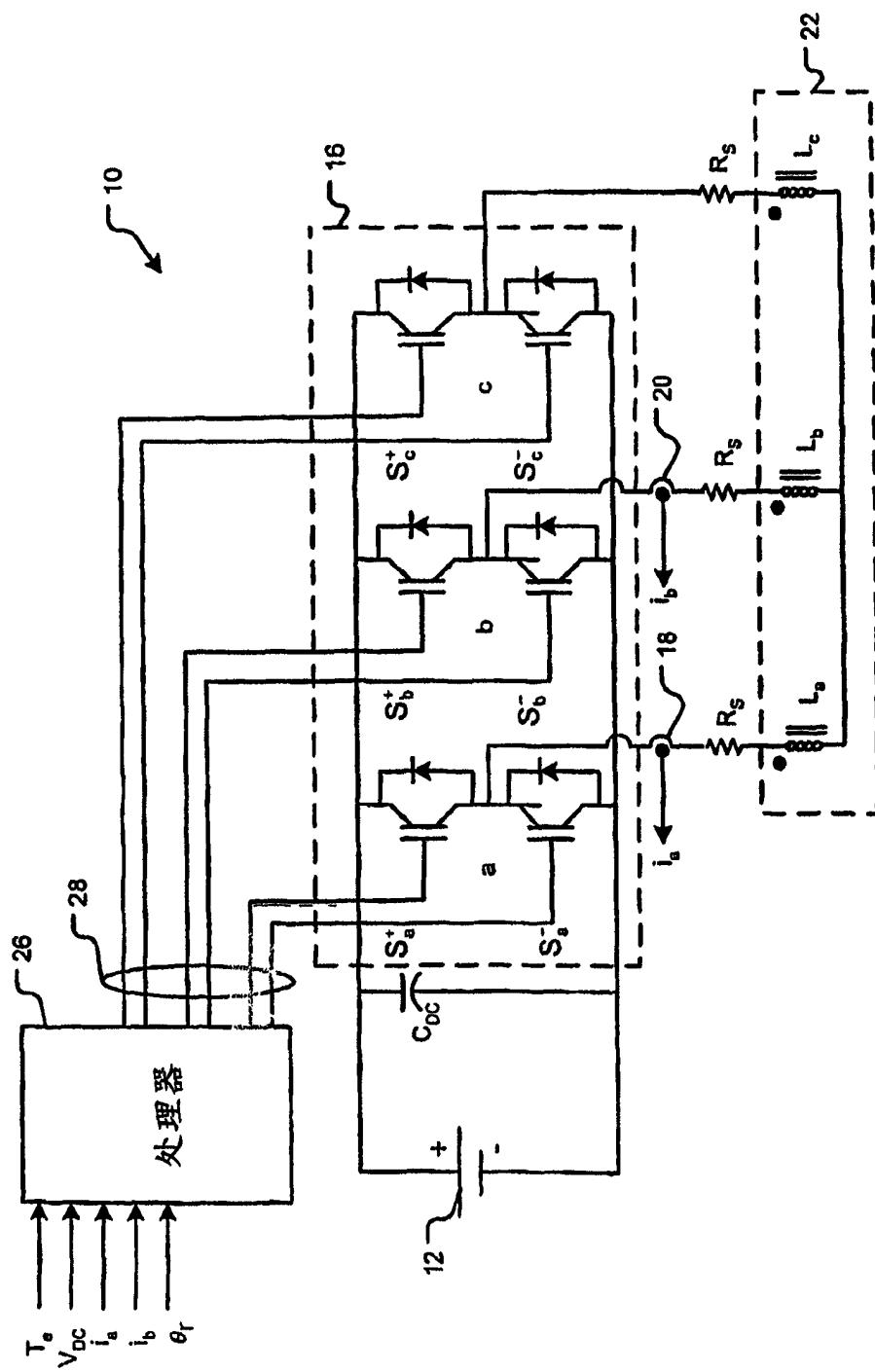


图 1



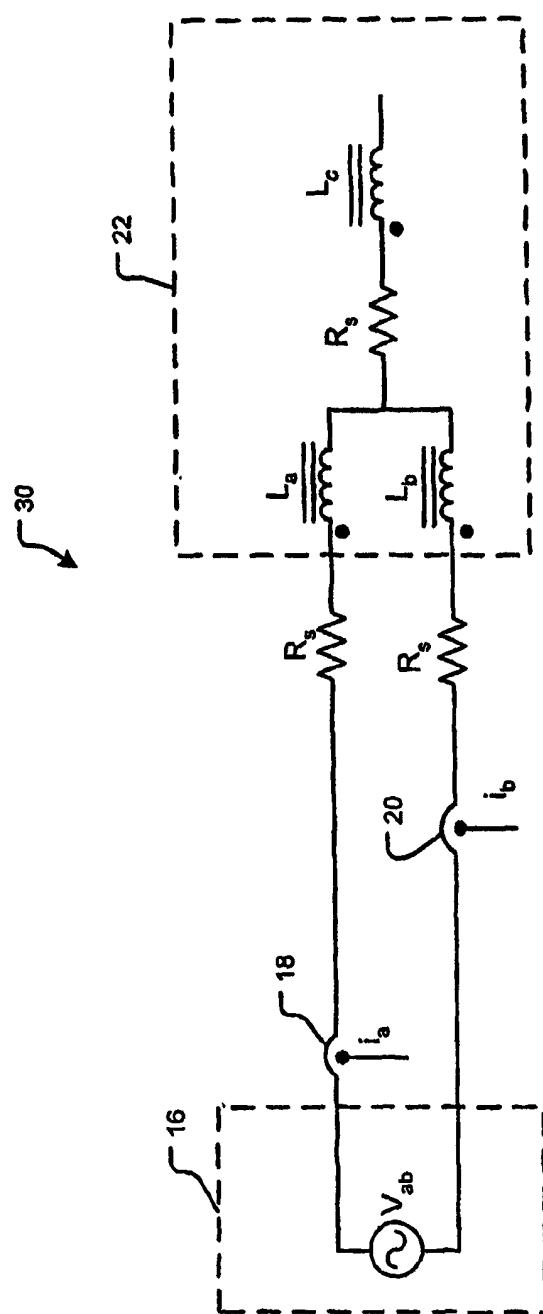


图 3

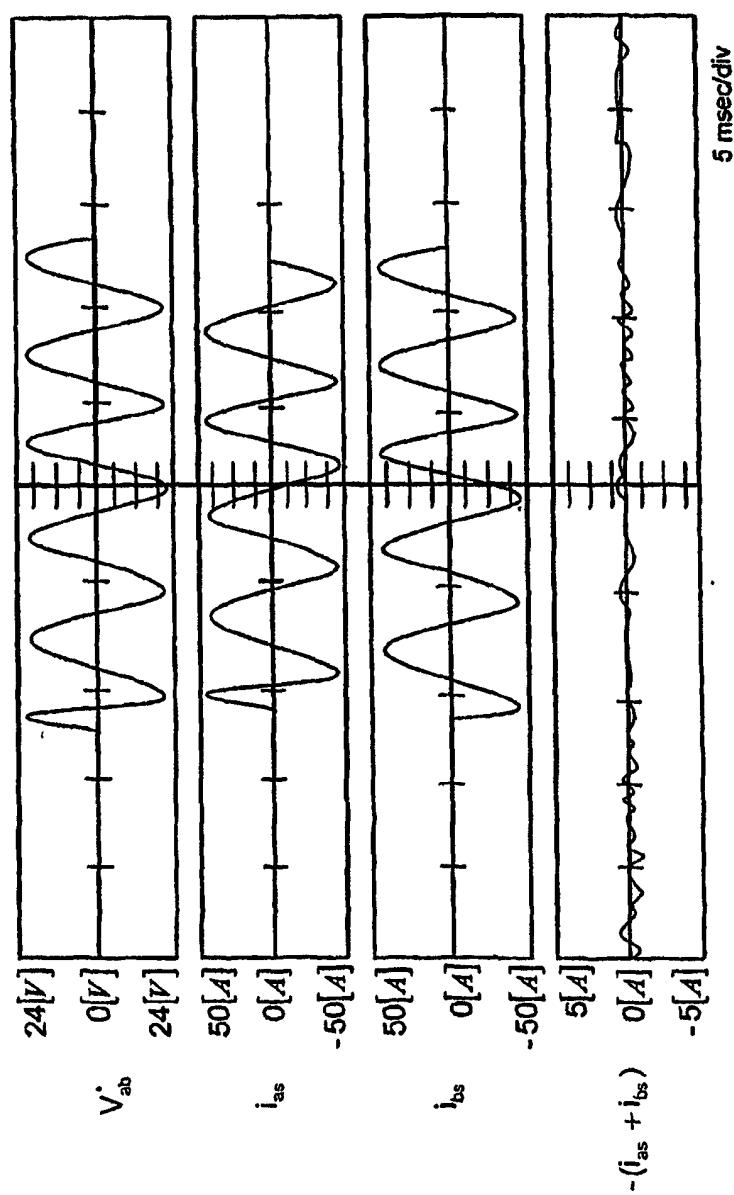


图 4

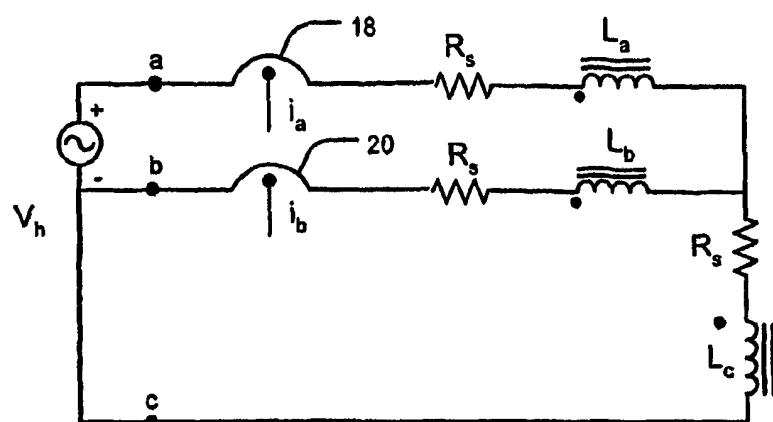


图 5

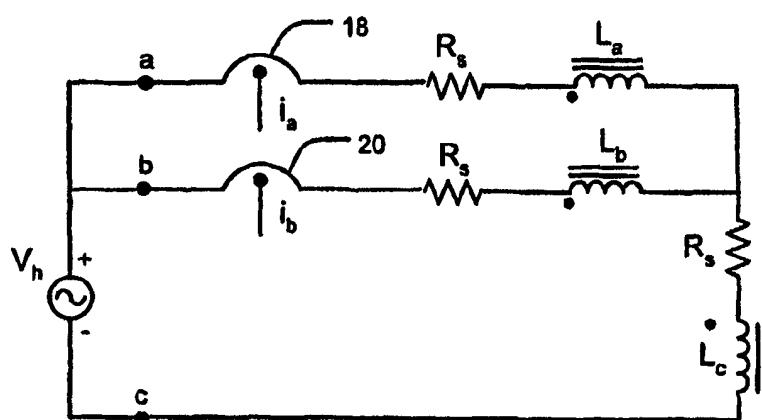


图 6

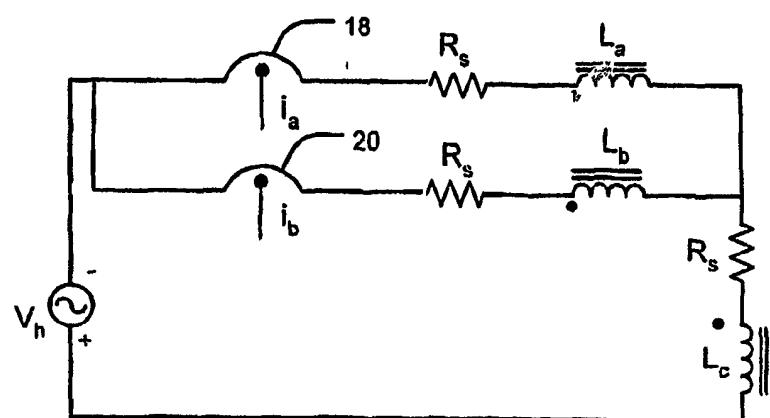


图 7

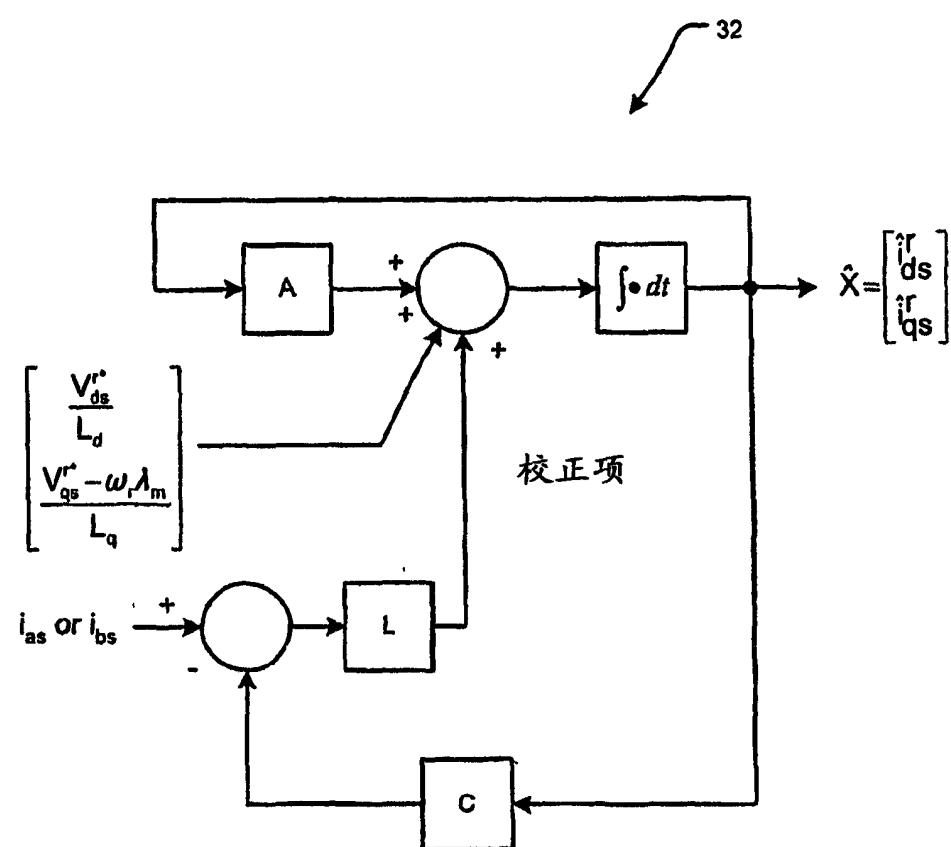


图 8

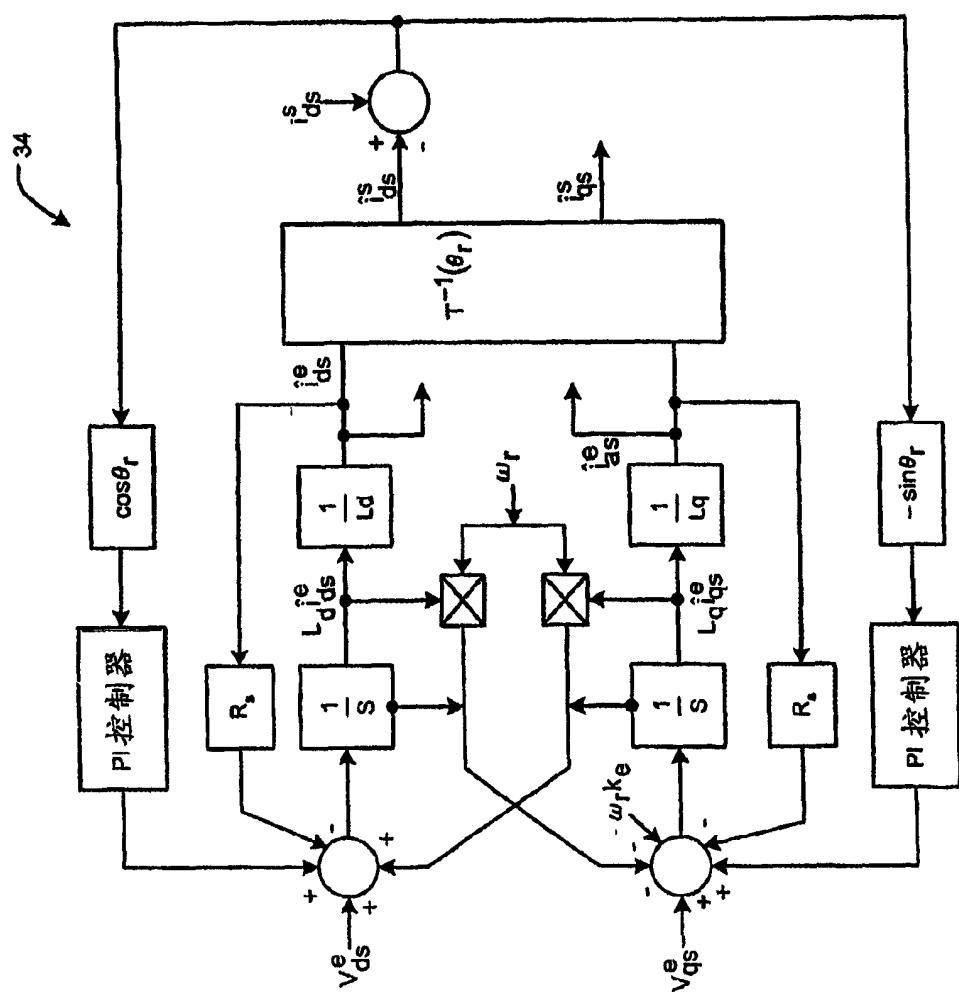


图 9