



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101388643 B

(45) 授权公告日 2012.05.23

(21) 申请号 200810215932.2

US 5197293 A, 1993.03.30, 全文.

(22) 申请日 2008.09.12

US 5992059 A, 1999.11.30, 全文.

(30) 优先权数据

11/853862 2007.09.12 US

US 6291958 B1, 2001.09.18, 全文.

审查员 马永祥

(73) 专利权人 通用汽车环球科技运作公司

地址 美国密执安州

(72) 发明人 Y·C·森 G·加列戈斯-洛佩斯

S·希蒂 M·米拉尼 M·佩里西克

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司 72001

代理人 张雪梅 陈景峻

(51) Int. Cl.

H02P 27/06(2006.01)

H02M 1/32(2007.01)

H02M 7/5387(2007.01)

(56) 对比文件

KR 100747228 B, 2007.08.01, 全文.

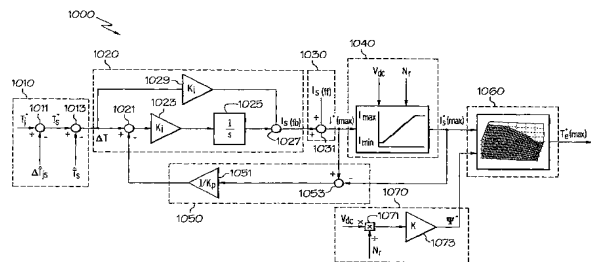
权利要求书 2 页 说明书 9 页 附图 7 页

(54) 发明名称

功率逆变器模块热管理

(57) 摘要

本发明涉及功率逆变器模块热管理。根据示例实施例,提供了一种用于限制电机的工作温度的方法。该方法包括基于功率逆变器模块的温度基准T\*和功率逆变器模块的半导体器件温度T之间的温差生成用于电机的最大容许电流I\_S(max)。该方法还包括基于最大容许电流I\_S(max)和最大容许通量Psi\_S(max)生成最大容许转矩T\_e(max),并使用最大容许转矩T\_e(max)限制转矩命令T\_e\*以便将半导体器件温度T抑制在温度基准T\*以下。



1. 一种用于限制电机的操作温度的方法,包括 :  
 基于功率逆变器模块的温度基准  $T^*$  和功率逆变器模块的半导体器件温度  $T$  之间的温差生成用于电机的最大容许电流  $I_{S(\max)}^*$  ;  
 基于最大容许电流  $I_{S(\max)}^*$  和最大容许通量  $\Psi_{S(\max)}^*$  生成最大容许转矩  $T_e^*$  ;和  
 使用最大容许转矩  $T_e^*$  限制转矩命令  $T_e^*$  以便将半导体器件温度  $T$  抑制到温度基准  $T^*$  以下。
2. 如权利要求 1 所述的方法,其中生成最大容许电流  $I_{S(\max)}^*$  包括计算功率逆变器模块的半导体器件温度  $T$ 。
3. 如权利要求 2 所述的方法,其中计算功率逆变器模块的半导体器件温度  $T$  包括至少使用功率逆变器模块的冷却剂温度  $T_c$  来估计功率逆变器模块的结温  $T_j$ 。
4. 如权利要求 3 所述的方法,其中计算功率逆变器模块的半导体器件温度  $T$  还包括使用功率逆变器模块的总功率耗散  $P_d$  来估计结温  $T_j$ 。
5. 如权利要求 1 所述的方法,其中生成最大容许电流  $I_{S(\max)}^*$  包括测量功率逆变器模块的半导体器件温度  $T$ 。
6. 如权利要求 5 所述的方法,其中测量功率逆变器模块的半导体器件温度  $T$  包括 :  
 测量功率逆变器模块的结温  $T_j$  ;和  
 通过调节功率逆变器模块的晶体管的自耗散  $P_{dq}$  和通过调节功率逆变器模块的总功率耗散  $P_d$ ,来控制功率逆变器模块的结温  $T_j$ 。
7. 如权利要求 5 所述的方法,其中测量功率逆变器模块的半导体器件温度  $T$  包括测量功率逆变器模块的基片温度  $T_s$ 。
8. 一种操作用于以限制汽车系统中的功率逆变器模块的温度的控制器,该控制器包括 :  
 温度误差电路,所述温度误差电路操作用于以在温度误差电路的输出处提供功率逆变器模块的温度基准和功率逆变器模块的温度之间的差值 ;和  
 耦合到温度误差电路的输出的比例积分器 PI 控制器电路,所述 PI 控制器电路操作用于以提供至少部分基于该差值的电流基准  $I_{S(\text{ref})}$ 。
9. 如权利要求 8 所述的控制器,功率逆变器模块的温度包括测量的功率逆变器模块的温度。
10. 如权利要求 9 所述的控制器,测量的功率逆变器模块的温度包括测量的功率逆变器模块的结的温度。
11. 如权利要求 8 所述的控制器,功率逆变器模块的温度包括估计的功率逆变器模块的温度。
12. 如权利要求 11 所述的控制器,估计的功率逆变器模块的温度包括估计的功率逆变器模块的基片温度。
13. 如权利要求 8 所述的控制器,其中 PI 控制器电路具有传递函数  $C(s)$ ,其表示为  $C(s) = k_p + \frac{k_i}{s}$ ,其中  $k_p$  和  $k_i$  包括 PI 控制器电路的增益。
14. 如权利要求 8 所述的控制器,还包括耦合到 PI 控制器电路的输出的前馈电路,该

前馈电路操作用于以基于将前馈电流项  $I_{S(ff)}$  添加到电流基准  $I_{S(fd)}$  而输出初始最大容许电流  $I_{S(max)}^{**}$ 。

15. 如权利要求 14 所述的控制器,还包括耦合到前馈电路的输出的限制电路,该限制电路操作用于以通过基于汽车系统运行所需的最大值或最小值来限制初始最大容许电流  $I_{S(max)}^{**}$ ,而输出最大容许电流  $I_{S(max)}^*$ 。

16. 如权利要求 15 所述的控制器,还包括耦合到前馈电路的输出、限制电路的输出以及 PI 控制器电路的输入的差集电路,该差集电路操作用于以计算最大容许电流  $I_{S(max)}^*$  与初始最大容许电流  $I_{S(max)}^{**}$  之间的差值,然后按因子  $1/k_p$  减小该最大容许电流  $I_{S(max)}^*$  与初始最大容许电流  $I_{S(max)}^{**}$  之间的差值,其中  $k_p$  包括 PI 控制器电路的增益。

17. 一种汽车系统,包括:

电机;

耦合到该电机的功率逆变器模块;

耦合到该电机的控制器,该控制器操作用于以基于功率逆变器模块的温度极限  $T^*$  与功率逆变器模块的半导体器件温度  $T$  之间的差值生成用于该电机的最大容许电流  $I_{S(max)}^*$ ;以及

耦合到控制器的转矩限制器,该转矩限制器操作用于以基于最大容许电流  $I_{S(max)}^*$  限制用于该电机的转矩命令。

18. 如权利要求 17 所述的汽车系统,其中功率逆变器模块的温度极限  $T^*$  包括结温极限  $T_j^*$  且功率逆变器模块的半导体器件温度  $T$  包括估计的结温  $\hat{T}_j$ 。

19. 如权利要求 17 所述的汽车系统,其中功率逆变器模块的温度极限  $T^*$  包括结温极限  $T_j^*$  且功率逆变器模块的半导体器件温度  $T$  包括测量的结温  $T_j$ 。

20. 如权利要求 17 所述的汽车系统,其中功率逆变器模块的温度极限  $T^*$  包括基片温度极限  $T_s^*$  且功率逆变器模块的半导体器件温度  $T$  包括基片温度  $T_s$ 。

## 功率逆变器模块热管理

### 技术领域

[0001] 本公开一般涉及电动机 (electric motor), 且更具体地涉及用于电动机的功率逆变器模块 (PIM) 的热管理。

### 背景技术

[0002] 近年来, 技术的进步以及不断发展变化的风格喜好已引起汽车设计的重大变化。其中一个变化涉及汽车内各种电气系统的复杂性以及功率使用, 尤其是代用燃料车辆, 诸如混合动力车辆、电动车辆和燃料电池车辆。

[0003] 在这些车辆中使用的电机 (motor) 所需的功率和 / 或转矩密度极其高。特定电机可以产生的功率或转矩的量很大程度上受绕组、或线圈、运行期间电机内的温度所限制。如果容许电机运行从而使得绕组温度变得太高, 诸如 PIM 的半导体器件之类的敏感电部件可能受到损坏。

[0004] 一种限制 PIM 温度的常用方法是计算输出或直流电流的 I2T (电流对温度 (current to temperature)) 并限制峰值电流的持续时间, 所述峰值电流与规格的标称电流成固定比例。然而, 该方法未考虑到 PIM 内部的加热机制, 且以完全开环的方式工作。

[0005] 因此, 希望提供一种用于限制电动机的工作温度的系统和方法, 其允许在运行的每个阶段连续地控制工作温度。另外, 希望提供一种便利电机的连续运行同时限制工作温度的系统和方法。此外, 结合附图和前述的技术领域及背景技术, 本发明的其它可取特征和特性将根据随后的详细描述及所附权利要求书而变得显而易见。

### 发明内容

[0006] 根据各种示范性实施例, 提供了一种用于限制电机的操作温度的方法。该方法包括基于功率逆变器模块的温度基准 (temperature reference)  $T^*$  和功率逆变器模块的半导体器件温度  $T$  之间的温差生成用于电机的最大容许电流  $I_{S(max)}^*$ 。该方法还包括基于最大容许电流  $I_{S(max)}^*$  和最大容许通量  $\Psi_{S(max)}^*$  生成最大容许转矩  $T_e^*$ , 并使用最大容许转矩  $T_e^*$  限制转矩命令  $T_e^*$  以便将半导体器件温度  $T$  抑制在温度基准  $T^*$  以下。

[0007] 根据其他示范性实施例, 提供了一种控制器, 该控制器可操作以限制汽车系统中的功率逆变器模块的温度。该控制器包括温度误差电路和比例积分器 (PI) 控制器电路, 所述温度误差电路可操作以在温度误差电路的输出处提供功率逆变器模块的温度基准与功率逆变器模块的温度之间的差值, 所述 PI 控制器电路耦合到温度误差电路的输出且可操作以提供至少部分基于该差值的电流基准  $I_{S(fb)}$ 。

[0008] 根据各种其它示范性实施例, 提供了一种汽车系统。该汽车系统适当地包括电机和耦合到电机的功率逆变器模块。该汽车系统还包括耦合到电机的控制器和耦合到控制器的转矩限制器。控制器可操作以基于功率逆变器模块的温度极限  $T^*$  与功率逆变器模块的半导体器件温度  $T$  之间的差值生成用于电机的最大容许电流  $I_{S(max)}^*$ 。转矩限制器可操作以基于最大容许电流  $I_{S(max)}^*$  限制用于电机的转矩命令。

## 附图说明

- [0009] 将在下文中结合附图描述本发明,其中相同的数字表示相同的元件,且
- [0010] 图 1 是根据本发明实施例的示范性汽车的示意图;
- [0011] 图 2 是示出根据本发明实施例的示范性 PIM 的框图;
- [0012] 图 3 是进一步示出根据本发明实施例的图 2 的 PIM 的构造的示意图;
- [0013] 图 4 是示出图 2 和 3 的 PIM 的等效热模型的框图;
- [0014] 图 5 是对利用图 2 的 PIM 的设备 (plant) 建模的框图;
- [0015] 图 6 是根据本发明的实施例对要控制的设备建模的框图;
- [0016] 图 7 是根据本发明的实施例对系统建模的框图;
- [0017] 图 8 是根据本发明的实施例对系统建模的框图;
- [0018] 图 9 是示出作为通量和电流的函数的示例电机的最大可用转矩的曲线图;
- [0019] 图 10 是示出根据实施例的示范性 PIM 温度限制控制器 1000 的框图;和
- [0020] 图 11 是示出根据实施例的基于图 10 的输出限制转矩命令的示例的框图。

## 具体实施方式

[0021] 下列详细描述本质上仅是示范性的,且并不打算限制本发明或本发明的应用及用途。此外,不打算受前述的技术领域、背景技术、发明内容或下列详细描述中给出的任何明示或暗示的理论约束。

[0022] 以下描述涉及被“连接”或“耦合”到一起的元件或零件。如本文中使用的,除非另有明确声明,“连接”是指一个元件/零件直接接合到另一个元件/零件(或直接与其通信),且不一定是通过机械方式。同样,除非另有明确声明,“耦合”是指一个元件/零件直接或间接地接合到另一元件/零件(或者直接或间接地与其通信),且不一定是通过机械方式。然而,应当理解,尽管下面可能在一个实施例中说明两个元件是“连接”的,但是在可选实施例中类似元件可以是“耦合”的,且反之亦然。因而,尽管这里示出的示意图描绘了元件的示范性布置,但在实际实施例中可以存在其它插入(intervening)元件、装置、零件或部件。也应该理解到,图 1-11 仅仅是说明性的且可以不按比例绘制。

[0023] 图 1 到图 11 示出了一种用于限制电动机的工作温度的方法和/或系统。根据一方面,基于结温基准(junction temperature reference)(或极限) $T_j^*$ 与实际(要么是测量的要么是估计的)结温  $T_j$  之间的温差生成电机的最大容许电流  $I_{S(\max)}^*$ 。根据另一方面,基于基片温度基准(或极限) $T_s^*$ 与实际(要么是测量的要么是估计的)基片温度  $T_s$  之间的温差生成电机的最大容许电流  $I_{S(\max)}^*$ 。电机的最大容许电流  $I_{S(\max)}^*$  然后被转换为转矩极限,该转矩极限用于限制电机的转矩命令。

[0024] 图 1 示出了根据一个实施例的车辆 10 或“汽车”。汽车 10 包括底盘 12、车体 14、四个车轮 16、和电子控制系统 18。车体 14 布置在底盘 12 上且基本上封闭汽车 10 的其它部件。车体 14 和底盘 12 可以共同形成车架。车轮 16 的每一个均在车体 14 的相应拐角附近转动地耦合到底盘 12。

[0025] 汽车 10 可以是许多不同类型汽车中的任一种,诸如轿车、货车、卡车、或运动型多功能车(SUV),且可以是两轮驱动(2WD)(即后轮驱动或前轮驱动)、四轮驱动(4WD)或全轮

驱动 (AWD)。车辆 10 也可以合并许多不同类型发动机中的任一种或它们的组合,所述发动机诸如汽油燃料内燃机或柴油燃料内燃机、“灵活燃料型车辆”(FFV) 发动机(即,使用汽油和酒精的混合物)、气态化合物(例如,氢气和/或天然气)燃料发动机、燃烧/电动机混合发动机,以及电动机。

[0026] 在图 1 所示出的示范性实施例中,汽车 10 是混合动力车辆、且还包括致动器 (actuator) 组件 20、电池 22、PIM 组件 24 和散热器 26。致动器组件 20 包括内燃机 28 和电动机/发电机(或电机)30。如本领域技术人员将理解的,电动机 30 在其中包括变速器,且尽管未示出还在其中包括定子组件(包括多个导电线圈)、转子组件(包括铁磁芯)、冷却流体(即冷却剂)、和至少一个温度传感器。内燃机 28 和电动机 30 是集成的,从而使得两者通过一个或多个驱动轴 32 机械地耦合到至少一些车轮 16。散热器 26 连接到车架的外部,且尽管没有详细示出,散热器 26 包括贯穿其中的多个冷却通道,所述冷却通道包含诸如水和/或乙二醇(即“防冻剂”)的冷却流体(即冷却剂),并且散热器 26 耦合到发动机 28 和 PIM 组件 24。在一个实施例中,PIM 组件 24 接收冷却剂并与电动机 30 共享冷却剂。散热器 26 可以类似地连接到 PIM 组件 24 和/或电动机 30。

[0027] 电子控制系统 18 与致动器组件 20(包括其中的温度传感器)、电池 22 和 PIM 组件 24 可操作通信。尽管没有详细示出,电子控制系统 18 包括诸如逆变器控制模块和车辆控制器的各种传感器和汽车控制模块,或电子控制单元 (ECU),以及至少一个处理器和/或存储器,所述存储器包括存储在其上(或另一种计算机可读介质中)的用于执行如下所述的过程和方法的若干指令。

[0028] 在运行期间,仍参考图 1,通过以交替的方式用内燃机 28 和电动机 30 给车轮 16 提供功率和/或同时用内燃机 28 和电动机 30 给车轮 16 提供功率来操作车辆 10。为了给电动机 30 供电,从电池 22 向 PIM 组件 24 提供直流 (DC) 功率,在功率被传送给电动机 30 之前所述 PIM 组件将直流功率转化为交流 (AC) 功率。

[0029] 图 2 是示出根据实施例的示范性 PIM200 的框图。PIM200 适当地包括栅极驱动单元 210 和六对并联连接的绝缘双极型晶体管 (IGBT) 和二极管 201-206,其中对 201 包括 IGBT Q1 和二极管 D1,对 202 包括 IGBT Q2 和二极管 D2,对 203 包括 IGBT Q3 和二极管 D3,等等。每个 IGBT 和二极管可以代表单一的硅片或并联连接的多片。

[0030] IGBT Q1-Q6 的栅极耦合到控制 IGBT 操作的栅极驱动单元 210。六个 IGBT-二极管对 201-206 中的每一对与该六对中的另一对串联连接在由电池 22 提供的正电源电压和负电源电压两端,所述电池 22 构成了用于 PIM200 的直流输入电压  $V_{dc}$ 。每个 IGBT-二极管对 201-206 变为用于电机控制的开关,且串联连接的 IGBT-二极管对之间的节点 220、230、240 一起提供了三相交流输出电压。PIM200 还包括连接在直流输入电压  $V_{dc}$  两端的电容器 215。

[0031] 其它实施例也可以利用其它 PIM 设计。例如,在某些应用中,可以使用金属-氧化物-半导体场效应晶体管 (MOSFET) 来代替 IGBT-二极管对 201-206。

[0032] 图 3 是进一步示出根据实施例的图 2 的 PIM200 构造的示意图。PIM200 的一个或多个硅片可以附接到像图 3 示出的直接敷铜基片那样的电路板。可选地,该一个或多个硅片可以附接到带绝缘材料的引线框或具有类似配置的绝缘金属基片。

[0033] 图 3 示出 IGBT Q1 和二极管 D1 被用焊料层 350 结合到铜层 340。绝缘层 330 布置

在铜层 340 与另一铜层 320 之间,所述另一铜层 320 通过热接触 (thermal contact) 310 而热耦合到散热件 (heatsink) 300。

[0034] PIM200 的额定电流或额定功率在运行期间受硅结 (silicon junction) 的最大温度限制,其是它们所附接处的热阻抗和功率耗散的函数。每个 IGBT- 二极管对 201-206 在该对被接通时经受传导损耗,并且在导通和关断状态之间的过渡期间经受开关损耗。在硅片中产生的这些损耗被传递通过图 3 中所示的各层。图 3 中所示的每个层 300-350 具有有限的热阻抗,当发生任何功率耗散时这导致了各层之间的温差。

[0035] 因为图 2 的每个开关应当与外界电隔离,绝缘层 330 代表 PIM200 热阻抗的相当大的一部分。图 3 中的散热件 300 将 PIM 与环境冷却剂 (ambient coolant) 相接且该散热件 300 代表了热系统中的热阻抗的另一大部分,所述环境冷却剂可以是空气、水、油等。铜层 320、340 和焊料层 350,以及 IGBT Q1-Q6 和二极管 D1-D6 的硅具有远小于绝缘层 330 的热阻抗。为简单起见,可以认为芯片温度等于结温  $T_j$ ,可以认为基片温度等于散热件 300 的底部处的温度。可以认为基片是焊料层 350、铜层 340、绝缘层 330 和铜层 320 的组合,且其可以被建模为单一的热阻抗片。类似地,热接触 310 可以是具有相对较低热阻抗的热脂或散热垫 (thermal pad),且可以被视作散热件 300 的一部分。

[0036] 图 4 是示出图 2 和 3 的 PIM200 的等效热模型的框图。假设基片温度是均匀的,且在开关 201-206 之间没有直接的热相互作用。如果用多个芯片来实施开关 201-206,假设功率耗散平均分布,那么其可以被视为集总元件 (lumped element)。例如,图 2 中的 IGBT Q1 的热阻抗可以由功率耗散与温差之间的关系定义,如方程 (1)。

$$[0037] \quad \Delta T_{j_s(Q1)} = T_{j(Q1)} - T_s = T_{j_sQ} * P_{d(Q1)} \quad (1)$$

[0038] 在方程 (1) 中,下标“j”代表结,下标“s”代表基片, $P_{d(Q1)}$  代表 Q1 的功率耗散, $T_{j_sQ}$  是热阻抗,且 \* 是卷积算子。在方程 (1) 的拉普拉斯变换后,热阻抗  $T_{j_sQ}$  通常被表示为一阶滞后系统,如方程 (2) 所示。

$$[0039] \quad T_{j_sQ} = \Delta T_{j_s(Q1)} / P_{d(Q1)} = R_{\theta_{j_sQ}} / (\tau_{j_sQ} s + 1) \quad (2)$$

[0040] 在方程 (2) 中, $\tau_{j_sQ}$  是热时间常数,s 是拉普拉斯算子,且  $R_{\theta_{j_sQ}}$  是热阻、或在稳态时的热阻抗。类似地在方程 (3) 中定义基片与环境材料之间的热阻抗。

$$[0041] \quad T_{sc} = \Delta T_{sc} / P_d = R_{\theta_{sc}} / (\tau_{sc} s + 1) \quad (3)$$

[0042] 在方程 (3) 中,下标“c”指的是冷却剂,且  $P_d$  是传递到散热件的总功率耗散。假设所有的 IGBT- 二极管对 201-206 附接到同一散热件,则随后可以用方程 (4) 计算出 Q1 的结温,所述方程 (4) 根据方程 (1) 到 (3) 获得的。

$$[0043] \quad T_{j(Q1)} = \Delta T_{j_s(Q1)} + T_s = T_{j_sQ} * P_{d(Q1)} + T_s$$

$$[0044] \quad = \Delta T_{j_s(Q1)} + \Delta T_{sc} + T_c = T_{j_sQ} * P_{d(Q1)} + T_{sc} * P_d + T_c \quad (4)$$

[0045] 在方程 (4) 中, $\Delta T_{sc} = T_s - T_c$ ,其中  $T_c$  是系统的环境温度,且其在汽车应用中是冷却剂温度。根据方程 (4),如果结温  $T_{j(Q1)}$  是可测得的,则有可能通过调节其的自耗散 (self dissipation)  $P_{d(Q1)}$  以及总功率耗散  $P_d$  来控制结温。

[0046] 在大多数实际情况下,直接测量结温是困难的,除非在硅片上有内置的温度传感器。然而,在汽车应用中,为了其它目的测量环境温度  $T_c$ ,且如果对热系统的功率耗散有足够的知识,则其可以被用于估计方程 (4) 中的结温。在极其低的电机速度下,来自每个开关的功率耗散可能不是平衡的。在此情况下,建立每个开关产生其温度的热模型是适当的,且

随后取最大值来限制模块内的最大结温。此后,假设图 2 中每个开关的功率耗散是平衡的,且 IGBT 温度是受控的。正如 D. W. Chung 等人 (IEEE Trans. Ind. Electronics., 1999 年 6 月第 46 卷第 3 期, pp. 517-526 上的“Minimum-loss strategy for three-phase PWM rectifier”)所展示的,可以根据方程 (5)-(12) 计算每个芯片的功率耗散,其中假设 PIM 以平衡方式运行,且从每个芯片均匀地产生功率耗散。

$$[0047] \quad P_{\text{con(Q)}} = \frac{V_T}{2\pi} \left( 1 + \frac{\pi}{4} \cdot MI \cdot \cos\phi \right) I_s + \frac{R_T}{8} \left( 1 + \frac{8}{3\pi} \cdot MI \cdot \cos\phi \right) I_s^2 \quad (5)$$

$$[0048] \quad P_{\text{con(D)}} = \frac{V_D}{2\pi} \left( 1 - \frac{\pi}{4} \cdot MI \cdot \cos\phi \right) I_s + \frac{R_D}{8} \left( 1 - \frac{8}{3\pi} \cdot MI \cdot \cos\phi \right) I_s^2 \quad (6)$$

$$[0049] \quad P_{\text{sw(Q)}} \Big|_{\text{SVPWM}} = E_{\text{sw(Q)}} \cdot f_{\text{sw}} \cdot \frac{I_s}{I_{\text{spec}}} \cdot \frac{V_{\text{dc}}}{V_{\text{spec}}} \quad (7)$$

$$[0050] \quad P_{\text{sw(D)}} \Big|_{\text{SVPWM}} = E_{\text{sw(D)}} \cdot f_{\text{sw}} \cdot \frac{I_s}{I_{\text{spec}}} \cdot \frac{V_{\text{dc}}}{V_{\text{spec}}} \quad (8)$$

$$[0051] \quad P_{\text{sw}} = \alpha_{\text{PWM}} \cdot P_{\text{sw}} \Big|_{\text{SVPWM}} \quad (9)$$

$$[0052] \quad P_{\text{d(Q)}} = P_{\text{con(Q)}} + P_{\text{sw(Q)}} \quad (10)$$

$$[0053] \quad P_{\text{d(D)}} = P_{\text{con(D)}} + P_{\text{sw(D)}} \quad (11)$$

$$[0054] \quad P_{\text{d}} = 6 (P_{\text{d(Q)}} + P_{\text{d(D)}}) \quad (12)$$

[0055] 方程 (5) 和 (6) 分别计算 IGBT 和二极管的传导损耗,且忽略了调制方法的影响。在方程 (5) 和 (6) 中,  $I_s$  是正弦电机电流的峰值振幅在方程 (5) 中,  $V_T$  和  $R_T$  是 IGBT 电压降的一阶模型的参数,该电压降作为器件电流 (device current) (当其导电时为相电流) 的函数,且 MI 是通过一半直流电源电压  $V_{\text{DC}}$  归一化的调制指数。类似地,在方程 (6) 中,  $V_D$  和  $R_D$  是二极管电压降的一阶模型的参数,该电压降作为器件电流 (当其导电时为相电流) 的函数,且 MI 是通过  $V_{\text{DC}}/2$  归一化的调制指数。

[0056] 方程 (7) 和 (8) 分别计算 IGBT 和二极管的开关损耗。在方程 (7) 和 (8) 中,  $I_s$  是正弦电机电流的峰值振幅,  $E_{\text{sw(Q)}}$  和  $E_{\text{sw(D)}}$  是在给定的相电流  $I_{\text{spec}}$  和给定的直流总线电压  $V_{\text{spec}}$  下在导通和关断过渡期间分别由 IGBT 和二极管耗散的能量总和。假定以切换频率  $f_{\text{sw}}$  使用连续的单值脉宽调制 (SVPWM)。可以从方程 (7) 和 (8) 看出,开关损耗与相电流  $I_s$  和直流电源电压  $V_{\text{DC}}$  成比例。

[0057] 在使用不连续 PWM 的情况下,在方程 (7) 和 (8) 中计算出的开关损耗根据方程 (9) 进行缩放,其中  $0.5 \leq \alpha_{\text{PWM}} \leq 1$ ,表示开关损耗根据调制方法减少。分别通过方程 (10) 和 (11) 给出每个 IGBT 和二极管耗散的总功率,而由 PIM200 耗散的总功率是方程 (10) 和 (11) 的总和的六倍,如方程 (12) 所示。如上所述,方程 (10) 的功率耗散  $P_{\text{d(Q)}}$  和方程 (11) 的功率耗散  $P_{\text{d(D)}}$  影响硅结与基片之间的温差,而方程 (12) 的总功率耗散  $P_{\text{d}}$  影响基片与环境之间的温差,如方程 (1)-(4) 所示。

[0058] 为了在用于直流总线电压  $V_{\text{DC}}$  和运行速度的给定操作条件下控制 IGBT 或二极管的温度,可以调节工作电流  $I_s$ 。也有可能调节开关频率以实现相同的目的,但这在某些操作条件下受到约束,尤其是在高速运行时,因为这会降低控制分辨能力 (control resolution)。

[0059] 图 5 是对利用图 2 的 PIM 的设备 500 建模的框图。如图 5 所示,相电流  $I_s$  被输入到 PIM 块 510、以及 IGBT 块 520 和二极管块 530。直流电源电压  $V_{\text{DC}}$  和调制指数 MI 是 PIM 块



510 的操作条件,且是在方程 (5)-(8) 中使用的参数。基于到 IGBT 块 520 和二极管块 530 的这些输入,可以获得功率耗散  $P_{d(Q)}$  和  $P_{d(D)}$ ,如方程 (10) 和 (11) 所示。求和块 540 和具有增益系数 6 的增益块 (gain block) 550,一起实施方程 (12) 以获得总耗散功率  $P_d$ 。

[0060] 在块 560 中,在结和基片之间的热阻抗 ( $T_{jsQ}$ ) 乘以 IGBT 所耗散的功率 ( $P_{d(Q)}$ ) 以计算结与基片之间的温差 ( $\Delta T_{js(Q)}$ ),如方程 (2) 所定义的。类似地,在块 570 中,基片和冷却剂之间的热阻抗 ( $T_{sc}$ ) 乘以总耗散功率 ( $P_d$ ) 以计算基片与环境之间的温差 ( $\Delta T_{sc}$ ),如方程 (3) 所定义的。最后,在求和块 580 中,IGBT 结 (IGBT junction) 与基片之间的温差 ( $\Delta T_{js(Q)}$ )、基片与冷却剂之间的温差 ( $\Delta T_{sc}$ )、和冷却剂温度  $T_c$  相加以获得 IGBT 结温度 ( $T_{j(Q)}$ ),如方程 (4) 中定义的。

[0061] 图 6 是根据本发明实施例对系统 600 建模的简化框图。在图 6 中,系统 600 包括差分块 (difference block) 610 和控制器 C(s) 620。系统 600 另外包括图 5 的设备 P(s) 500,其在图 6 中被简化且表示为单个块。到图 5 中设备 500 的其余输入作为参数处理,且在图 6 中未示出。如图 6 所示,电机电流  $I_s$  是到设备 500 的输入,且 IGBT 结温  $T_j$  是该设备的输出。控制器 620 可操作以基于 IGBT 结温基准 (或极限)  $T_j^*$  与实际 IGBT 结温  $T_j$  之间的温差调节相电流  $I_s$  的量,所述温差是由差分块 610 计算出的。

[0062] 由于方程 (2) 中的基片的热时间常数 ( $\tau_{jsQ}$ ) 通常小于 1/2,所以使用该时间常数来提高逆变器额定值 (inverter rating) 是不切实际的。而且,大多数温度传感器具有比时间常数  $\tau_{jsQ}$  更慢的动态特性,所以可以假设基片没有动态特性,且只有基片温度根据散热件的时间常数缓慢变化。在消除了基片时间常数的影响之后,可以修改图 6 的系统 600,如图 7 所示。

[0063] 图 7 是根据本发明实施例的对系统 700 建模的框图。像系统 600 一样,系统 700 包括图 5 的设备 P(s) 500。系统 700 另外包括控制器 C(s) 730 和差分结 (difference junction) 701、720 和 740。根据此实施例,控制器 730 可操作以基于基片温度基准 (或极限)  $T_s^*$  和所测量的基片温度  $T_s$  之间的温差而调节相电流  $I_s$  的量,所述温差由差分结 720 提供。

[0064] 通过在差分结 710 处从 IGBT 结温基准  $T_j^*$  减去估计的温差  $\Delta \hat{T}_{js(Q)}$ ,可以计算出基片温度基准  $T_s^*$ 。通过忽略方程 (2) 的热时间常数 ( $\tau_{jsQ}$ ) 的影响,可以计算出估计的温差  $\Delta \hat{T}_{js(Q)}$ ,如方程 (13) 所示。

[0065]

$$\Delta \hat{T}_{js(Q)} = R_{\theta_{jsQ}} \cdot P_{d(Q)} \quad (13)$$

[0066] 反馈信号或基片温度  $T_s$  可以从温度传感器测量,所述温度传感器通常附接到功率模块的基片用于温度保护。设备 P(s) 500 和差分结 740 可以被认为具有相电流  $I_s$  作为输入且基片温度  $T_s$  作为输出的新设备 p(s) 750。

[0067] 图 8 是根据本发明实施例的对系统 800 建模的框图。像系统 600 一样,系统 800 包括图 5 的设备 P(s) 500。系统 800 也包括控制器 C(s) 830、差分结 810 和 820、以及计算块 840。根据此实施例,控制器 830 可操作以基于基片温度基准 (或极限)  $T_s^*$  和估计的基片温度  $\hat{T}_s$  之间的温差而调节相电流  $I_s$  的量,所述温差由差分结 820 提供。系统 800 代表结温  $T_j$  的准 (quasi) 开环控制。

[0068] 在与图 7 中示出的实施例不同的情况下,从附接到基片的温度传感器不能得到所测量的基片温度  $T_s$ ,则可以使用估计的基片温度  $\hat{T}_s$ 。计算块 840 可操作以从方程 (2)-(12) 获得估计的基片温度  $\hat{T}_s$  和相电流  $I_s$ 。计算块 840 还可操作以使用方程 (13) 获得估计的温差  $\Delta\hat{T}_{j(Q1)}$ 。差分结 810 具有与图 7 中差分结 710 相同的功能,但差分结 820 使用估计的基片温度  $\hat{T}_s$  而不是由差分结 720 使用的所测量的基片温度  $T_s$ 。

[0069] 当涉及到控制基片温度的控制器 730 和 830 的设计时,可以使用比例积分控制器,其具有如下所述导出的增益。为了得到具有有限带宽  $\omega_c$  的一阶响应,图 7 的系统 700 的开环增益应成为如方程 (14) 所示的一阶积分器,且控制器  $C(s)$  应满足方程 (15) 的条件,其中  $k_p$  和  $k_i$  是 PI 控制器的增益。

$$[0070] \quad G_o(s) = C(s) \cdot p(s) = \frac{\omega_c}{s} \quad (14)$$

$$[0071] \quad C(s) = \frac{\omega_c}{s} \cdot p^{-1}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (15)$$

[0072] 设备  $p(s)$  实际上并不是线性时不变系统,而是非线性时变系统,且其可以从方程 (3) 和 (5)-(12) 计算出。假定所有参数不随电机电流  $I_s$  的微小变化而变化,则有可能使用小信号分析来得出方程 (16) 以解决此问题。

$$[0073] \quad p(s) = \left. \frac{\partial T_s}{\partial I_s} \right|_{\Delta I_s \rightarrow 0} = \frac{6R_{\theta sc}}{\tau_{sc}s + 1} [(C_{Q1} + C_{D1}) + 2(C_{Q2} + C_{D2})I_s] = \frac{K(I_s)}{\tau_{sc}s + 1} \quad (16)$$

[0074] 然而,诸如方程 (5) 和 (6) 中的  $MI$  和  $\Phi$  这样的参数也是电机运行的相电流  $I_s$  的函数,因而方程 (16) 可以是迭代方程的解。通过接受方程 (16) 的结果,那么方程 (15) 中的 PI 控制器  $C(s)$  的增益  $k_p$  和  $k_i$  是按方程 (17) 和 (18) 导出的。

$$[0075] \quad k_p = \frac{\tau_{sc} \cdot \omega_c}{K(I_s)} \quad (17)$$

$$[0076] \quad k_i = \frac{\omega_c}{K(I_s)} \quad (18)$$

[0077] 在方程 (16) 中,  $C_{Q1}$ 、 $C_{Q2}$ 、 $C_{D1}$ 、和  $C_{D2}$  是方程 (10) 和 (11) 中 IGBT 和二极管损耗的系数,其可以表示为方程 (19) 和 (20)。

$$[0078] \quad P_{d(Q)} = C_{Q1} \cdot I_s + C_{Q2} \cdot I_s^2 \quad (19)$$

$$[0079] \quad P_{d(D)} = C_{D1} \cdot I_s + C_{D2} \cdot I_s^2 \quad (20)$$

[0080] 迄今,控制器  $C(s)$  的设计一直集中于 IGBT 结温控制,但是对于大多数实际应用而言, PIM 温度应被约束在安全极限以下,而不是将其控制为与基准相等。在这种情况下,控制器  $C(s)$  的输出将确定在容许温度极限  $T_j^*$  内操作 PIM 的最大容许电流极限。

[0081] 而且,由于相电流  $I_s$  不直接与取决于运行速度和直流总线电压的转矩成比例,则转矩命令应当被输入到电机控制算法,而不是相电流  $I_s$ 。因此,温度限制控制器  $C(s)$  应适应电机控制目的。

[0082] 例如,在永磁交流电机的情况下,在特定速度下的最大转矩受直流总线电压与反电动势 (BEMF) 振幅之间的关系限制。如果 BEMF 超出直流总线电压 VDC 的某部分,则应当通过增加电机的去磁电流、或通过减少电机转矩命令,减少 BEMF。这给出了电机转矩与电流

之间的非线性关系,该关系可以通过图 9 中所示的二维表求解。

[0083] 图 9 是示出作为通量和电流的函数的示例电机的最大可用转矩的曲线图。图 9 的曲线图需要两个输入;一个是容许电流极限 $I_{S(\max)}^*$ ,以安培为单位,其可以是温度限制控制器 C(s) 的输出。另一个输入是最大容许通量 $\Psi_{S(\max)}^*$ ,以伏特秒为单位,其由直流总线电压 $V_{DC}$ 与运行速度之间的比率定义。图 9 的输出是对应于操作条件下的电流极限的最大容许转矩 $T_e^*$ 。对于特定的电机,通过测量驱动系统的容量,可容易地获得诸如图 9 的曲线图,或其可以通过表征电机的弱磁运行(field weakening operation)而得到。

[0084] 当为了 PIM 温度限制目的而应用控制器 730、830 的输出 $I_s$ 时,由于稳定性问题,控制带宽 $\omega_c$ 不应被设定为比用于测量基片温度 $T_s$ 的温度传感器的反馈带宽还高。因而,在反馈带宽与得自方程(3)的截止频率 $1/\tau_{sc}$ 之间选择 $\omega_c$ 。

[0085] 作为例子,典型的热敏电阻器的时间常数是在大约 3 到 5 秒的范围内。如果热敏电阻器用于测量基片温度 $T_s$ ,那么该控制器的带宽不能高于 0.2 到 0.3rad/s,这与电机驱动系统中的任何其它控制器相比是相当慢的。因此,如果该控制器的输出被用来限制电机电流或转矩命令以用于超温保护,所达到的最终转矩将跟随温度控制器的动态特性,该动态特性不应被用于汽车应用,汽车应用应具有大约几毫秒到一百毫秒的响应时间的快速转矩控制。

[0086] 为了加速控制行为,应使用前馈电流项 $I_{S(ff)}$ ,其提供了在稳态下的容许电流极限的估计。通过解出方程(4)、(12)、(19)和(20)的稳态解,可以计算出前馈电流 $I_{S(ff)}$ 。在稳态中,方程(4)可以被重写为方程(21)。

$$\begin{aligned}
 [0087] \quad T_{j\varrho} - T_c &= 6R_{\theta sc}(P_D + P_Q) + R_{\theta sc}P_Q \\
 [0088] \quad &= [6R_{\theta sc}(C_{\varrho 1} + C_{D1}) + R_{\theta js}C_{\varrho 1}]I_s \\
 [0089] \quad &+ [6R_{\theta sc}(C_{\varrho 2} + C_{D2}) + R_{\theta js}C_{\varrho 2}]I_s^2 \\
 [0090] \quad &= \beta_1 I_s + \beta_2 I_s^2
 \end{aligned} \tag{21}$$

[0091] 此处, $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 是如上所述的操作条件的函数。当温度基准 $T_j^* = T_{j(\varrho)}$ 大于冷却剂温度 $T_c$ 时,方程(21)存在唯一解:方程(22)。

$$[0092] \quad I_{S(ff)} = \frac{-\beta_2 + \sqrt{\beta_2^2 + 4\beta_1(T_j^* - T_c)}}{2\beta_1} \tag{22}$$

[0093] 当采用前馈电流项 $I_{S(ff)}$ 时,控制器 730、830 应减少前馈电流以在温度误差为负时补偿建模误差,并在温度误差为正时提高逆变器功率。在 PI 控制器中的积分器的正极限应设为零,以便在反馈温度低于温度基准时不累积温度误差。换句话说,当误差为正且初始积分器值为零时,通过控制器增益 $k_p$ 和温度误差,确定了根据此算法的电流提升的量,如方程(23)中所示。

$$\begin{aligned}
 [0094] \quad I_{S(\max)} &= I_{S(ff)} + I_{S(\beta)} \\
 [0095] \quad &= I_{S(ff)} + k_p(T_j^* - T_{j(\varrho)}) \quad \text{当 } T_j^* > T_{j(\varrho)} \text{ 时} \\
 [0096] \quad &= I_{S(ff)} + k_p(T_s^* - T_s)
 \end{aligned} \tag{23}$$

[0097] 图 10 是示出根据本发明实施例的示范性 PIM 温度限制控制器 1000 的框图。控制器 1000 适当地包括温度误差块 1010、PI 控制器块 1020、前馈块 1030、限制块 1040、差异收

集块 (discrepancy collection block) 1050、最大转矩块 1060、和操作条件块 1070。

[0098] 温度误差块 1010 包括差分结 1011 和 1013。差分结 1011 从温度基准  $T_j^*$  减去该结 (junction) 与基片之间的估计温差  $\Delta \hat{T}_{js}$  以获得基片温度基准  $T_s^*$ 。差分结 1013 从基片温度基准  $T_s^*$  减去估计的基片温度  $\hat{T}_s$  以获得基片温度误差  $\Delta T$ ，该误差被提供为到 PI 控制器块 1020 的输入。可以基于方程 (5)-(12) 获得估计的基片温度  $\hat{T}_s$  和估计的结温  $\hat{T}_j$ 。

[0099] 如图 10 中所示的使用估计的基片温度  $\hat{T}_s$  和估计的结温  $\hat{T}_j$ ，代表准开环控制。在可选实施例中，可以使用所测量的基片温度  $T_s$  和所测量的结温  $T_j$ 。

[0100] PI 控制器块 1020 包括差分结 1021、增益块 1023 和 1029、积分器块 1025、和求和结 (summing junction) 1027，这实施了上述的 PI 控制器。用于电流提升的电流基准  $I_{s(fb)}$  是 PI 控制器块 1020 的输出。前馈块 1030 计算前馈电流项  $I_{s(ff)}$  并在求和结 1031 将其添加到电流基准  $I_{s(fb)}$  以获得初始最大允许电流  $I_{s(max)}^{**}$ 。限制块 1040 基于系统操作所需的最大值或最小值而限制前馈块 1030 的初始最大容许电流  $I_{s(max)}^{**}$ ，以获得最大容许电流  $I_{s(max)}^*$ 。如前面解释的，最大容许电流  $I_{s(max)}^*$  是到最大转矩块 1060 的输入之一。

[0101] 差异收集块 1050 在差分结 1053 处收集前馈块 1030 与限制块 1040 之间的差值，随后在增益块 1051 处用因子  $1/k_p$  将其减小。减小的差值然后在差分结 1021 被反馈回 PI 控制器块 1020 以便避免终结 (wind-up) 现象。

[0102] 操作条件块 1070 在块 1071 获得直流总线  $V_{dc}$  电压与运行速度  $N_r$  的比率，然后在增益块 1073 将该比率乘以因子  $K$  以获得最大容许通量  $\Psi_{s(max)}^*$ 。如前面解释的，最大容许电流  $I_{s(max)}^*$  是到最大转矩块 1060 的另一个输入。基于最大容许电流  $I_{s(max)}^*$  和最大容许通量  $\Psi_{s(max)}^*$ ，最大转矩块 1060 产生最大容许转矩  $T_{e(max)}^*$ 。该最大容许转矩  $T_{e(max)}^*$  然后可以被发送到电机控制算法以限制转矩命令从而将 IGBT 结温降低到温度基准或极限以下。

[0103] 图 11 是示出根据示例实施例的基于图 10 输出限制转矩命令的示例的框图。在图 11 中，示出的最大转矩块 1060 和操作条件块 1070 如同图 10 中一样。转矩限制块 1080 使用最大容许转矩  $T_{e(max)}^*$  限制初始转矩命令  $T_e^{**}$  并生成转矩命令  $T_e^*$ 。然后使用弱磁算法 1090 在特定速度 ( $N_r$ ) 和直流总线电压  $V_{dc}$  下根据受限的转矩生成电流命令。在示出的实施例中，电流命令包括两个命令  $I_d^*$  和  $I_q^*$ ，以控制诸如图 2 的 PIM200 之类的逆变器内的电流。

[0104] 尽管已经在前面的详细描述中给出了至少一个示例实施例，应理解存在大量的变型。也应理解，一个或多个示例实施例不打算以任何方式限制本发明的范围、适用性或配置。相反，前面的详细描述将给本领域技术人员提供实施可以在至少一个实施例中发现的创造性方面的便利指南。本发明的主题包括在示例实施例中公开的各种元件、零件、功能和/或性质的所有组合和子组合。应理解，可以对元件的功能与布置作出多种改变，而不脱离由所附权利要求书及其法律等效物记载的本发明的范围。

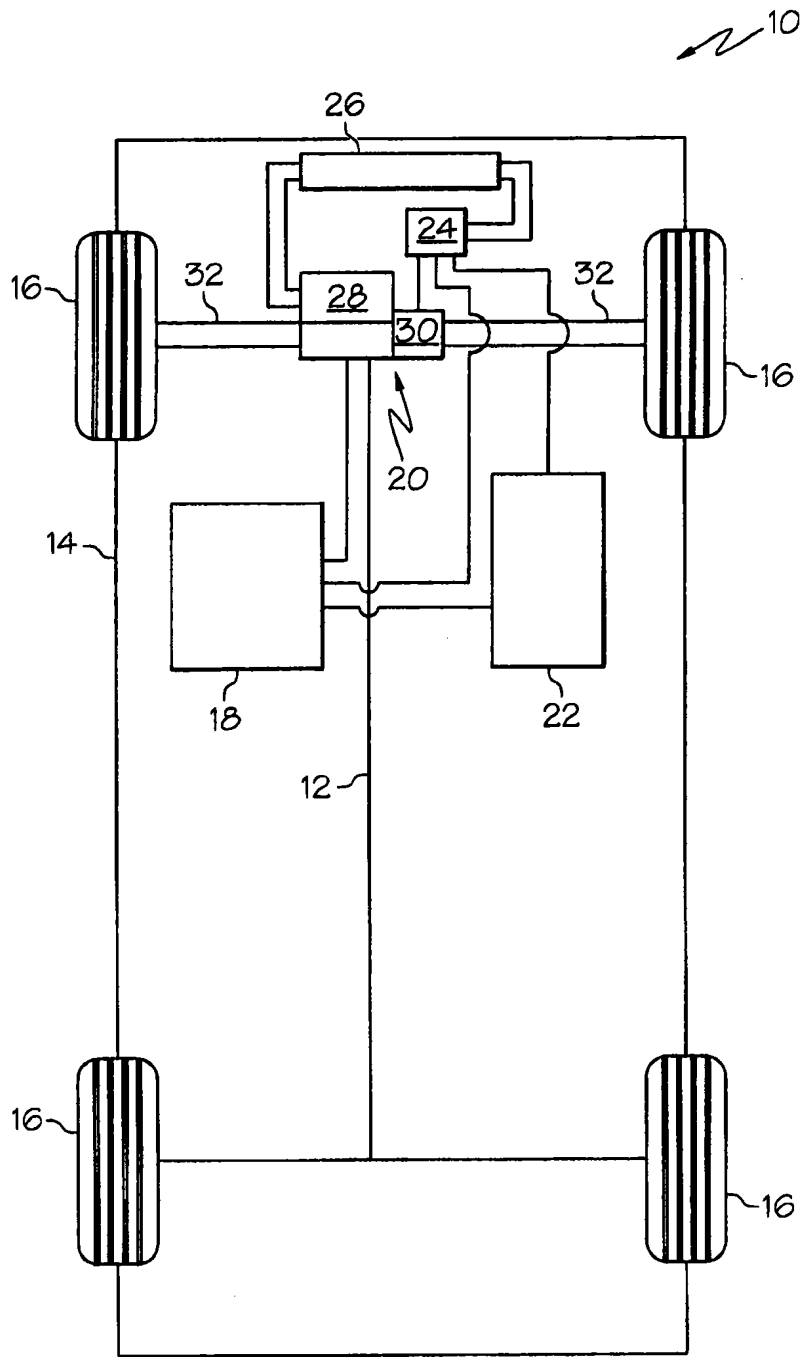


图 1

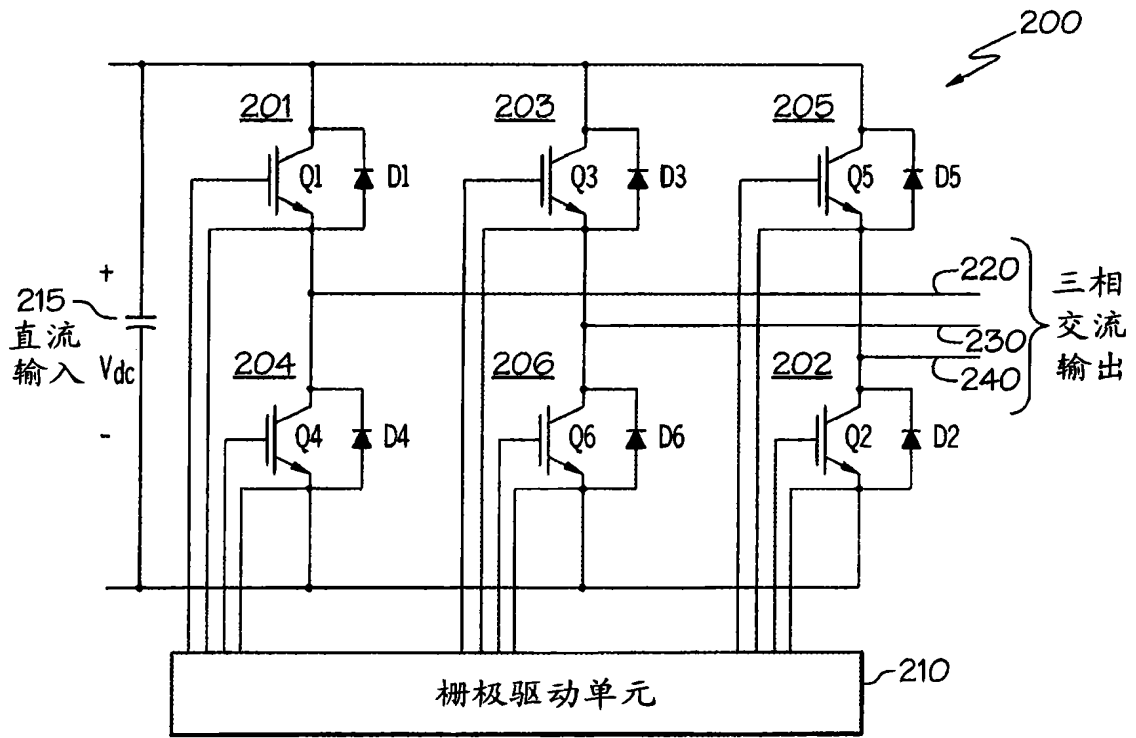


图 2

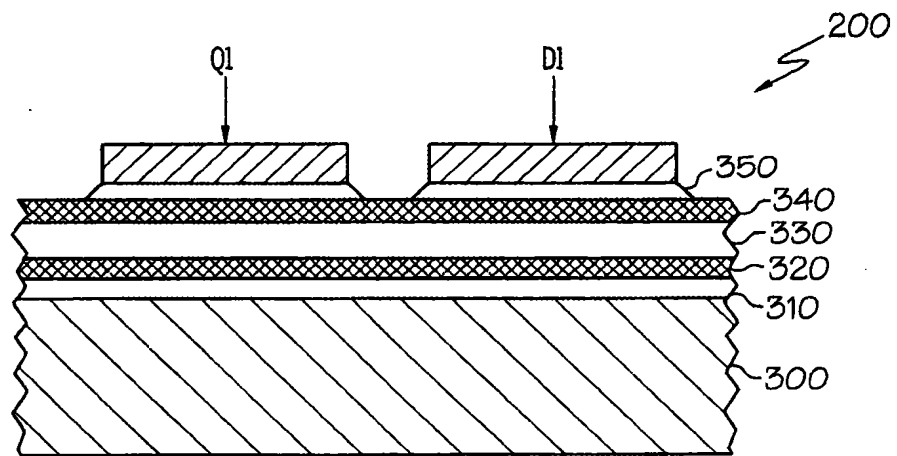


图 3

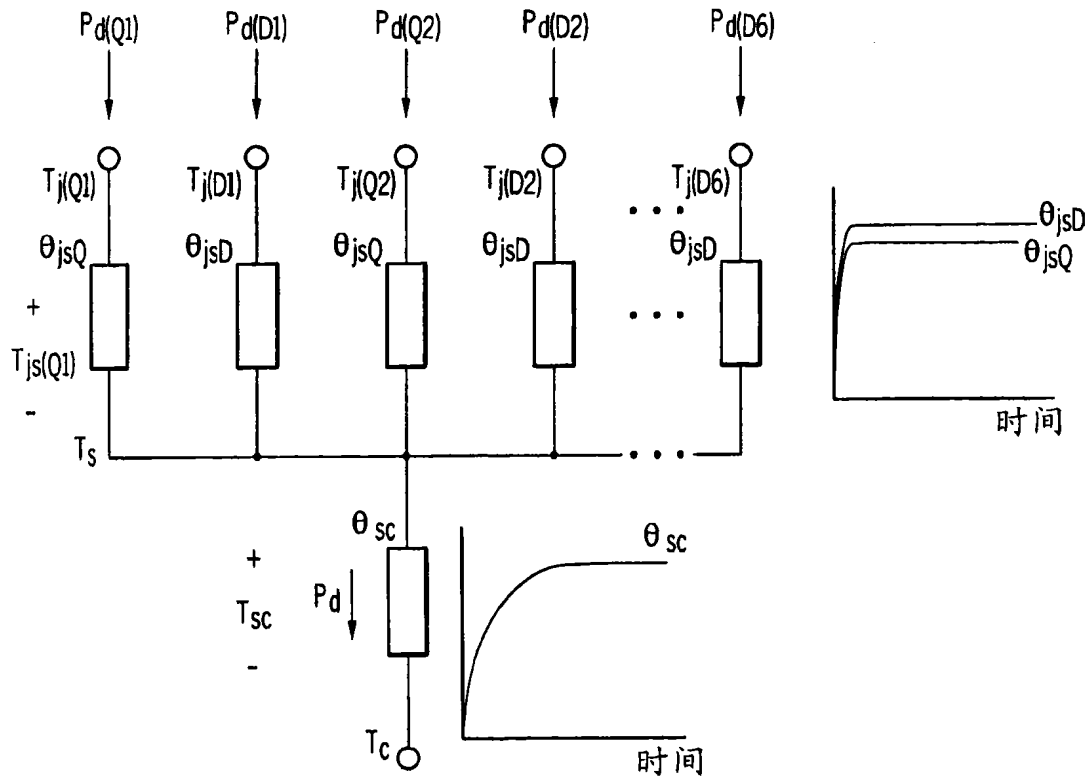


图 4

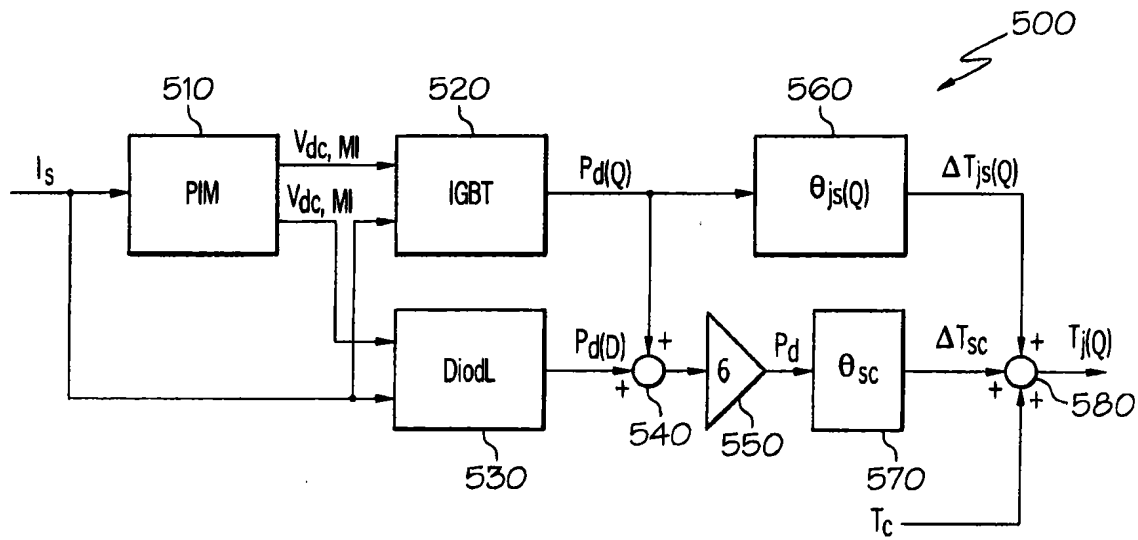


图 5

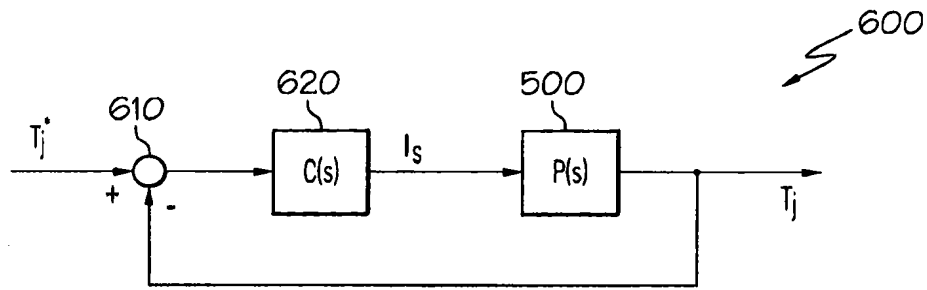


图 6

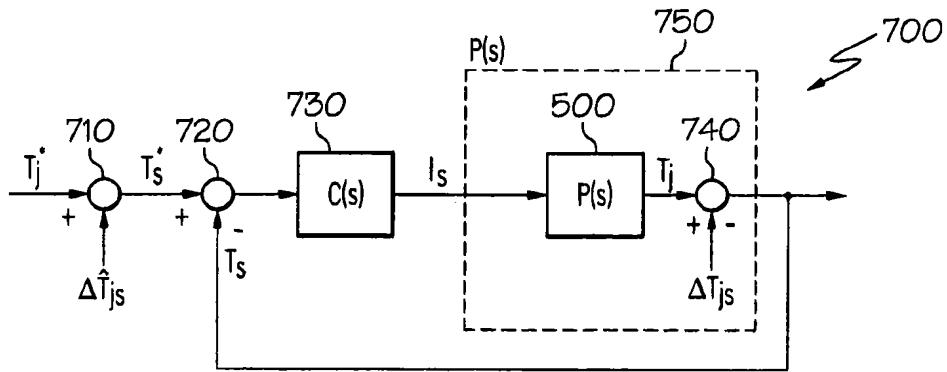


图 7

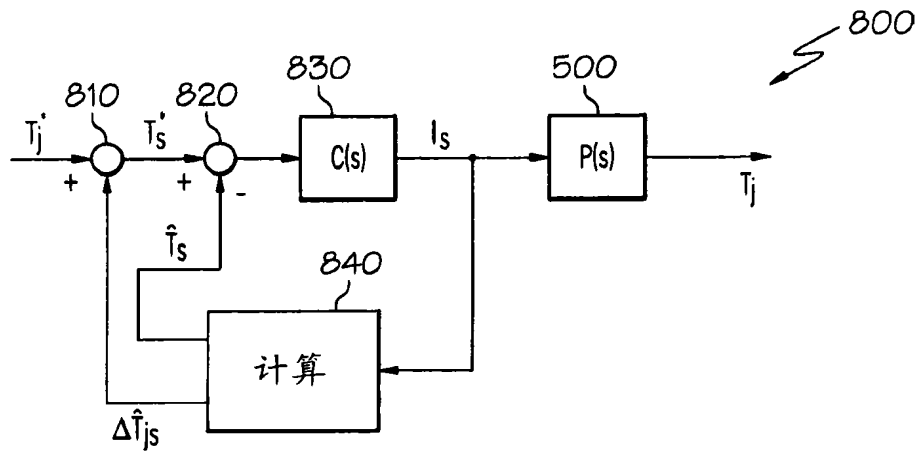


图 8



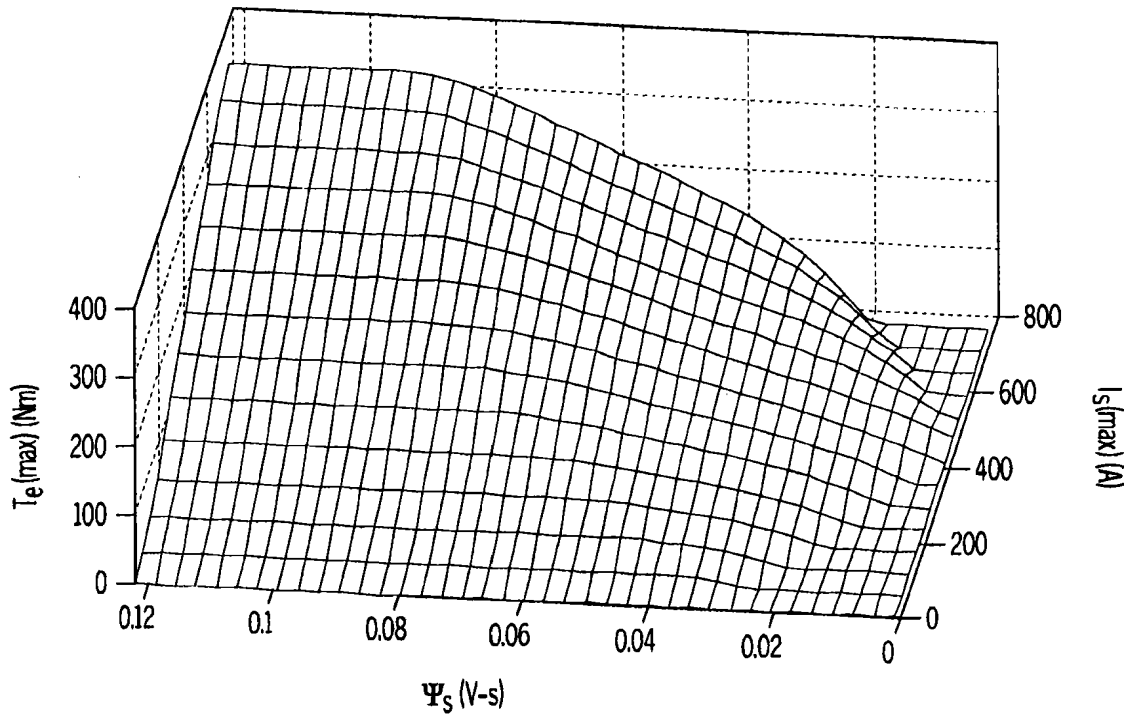


图 9

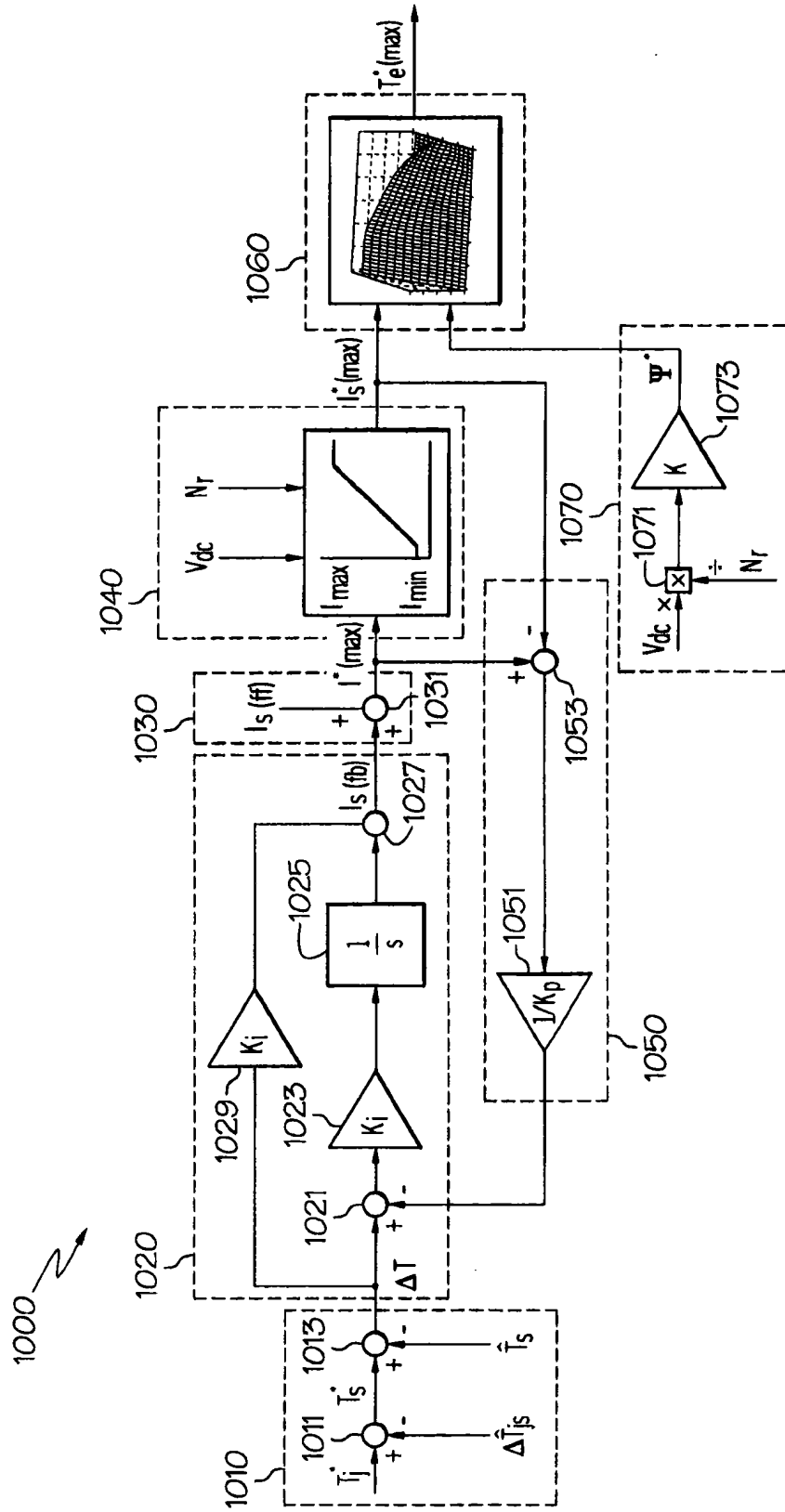


图 10

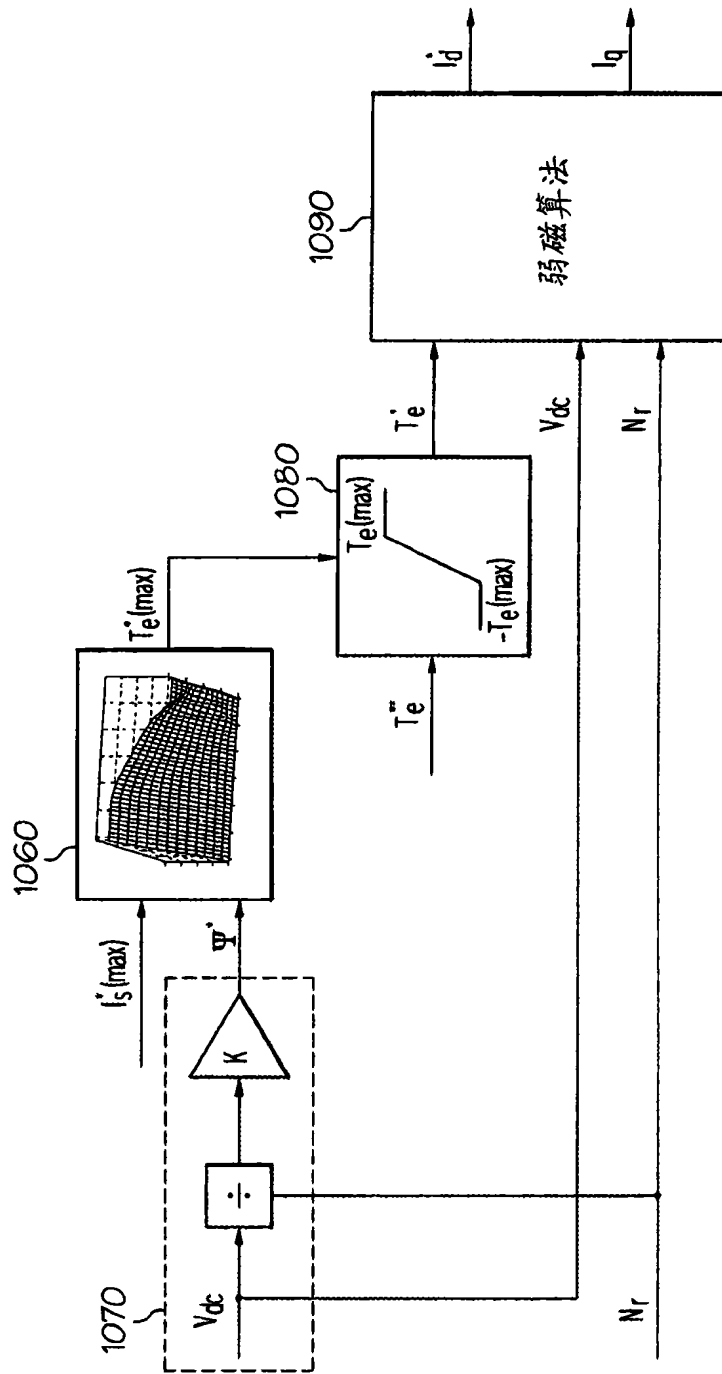


图 11