



## (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102783012 B

(45) 授权公告日 2015. 09. 30

(21) 申请号 201080056106. 3

(22) 申请日 2010. 12. 10

(30) 优先权数据

0958879 2009. 12. 11 FR

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2012. 06. 08

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/EP2010/069406 2010. 12. 10

(87) PCT国际申请的公布数据

W02011/070165 FR 2011. 06. 16

(73) 专利权人 雷比诺电力系统

地址 法国布拉尼亚克

(72) 发明人 吉约姆·勒琼 塞巴斯蒂安·维拉德

(74) 专利代理机构 中国商标专利事务所有限公

司 11234

代理人 宋义兴 刘广新

(51) Int. Cl.

H02P 21/13(2006. 01)

H02P 21/14(2006. 01)

H02P 23/14(2006. 01)

(56) 对比文件

JP 2001112282 A, 2001. 04. 20, 说明书第 11-17 段, 图 1-3.

US 5969499 A, 1999. 10. 19, 全文.

CN 101098117 A, 2008. 01. 02, 说明书第 1 页倒数第 1 行至第 3 页倒数第 10 行, 图 37-39.

审查员 贾贺帅

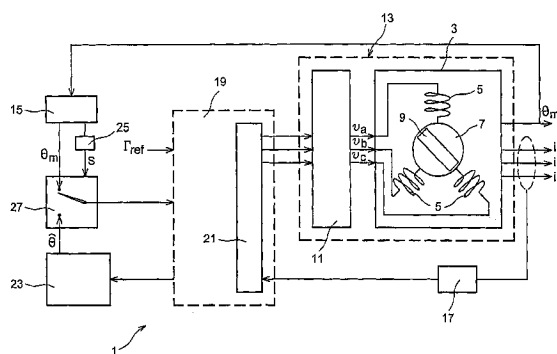
权利要求书3页 说明书9页 附图6页

## (54) 发明名称

永磁同步电机 (PMSM) 的控制装置

## (57) 摘要

本发明涉及控制永磁同步电机的装置, 包括: 传感器, 可从转子位置测量值  $\theta_m$  中采样, 控制装置, 根据转子位置和预定参数控制永磁同步电机的工作点, 估算装置 (23), 确定与转子相关估算帕克参照系  $\delta-\gamma$  中转子位置的估算值  $\hat{\theta}$ , 其中, 所述估算装置 (23) 包括调节装置 (61), 使所估算转子位置  $\hat{\theta}$  与所测转子位置  $\theta_m$  相一致。故障检测器, 检测所述传感器的故障, 以及开关, 用来将控制装置接至传感器, 以便在故障检测器未指示所述传感器任何故障时, 控制装置接收转子的所测位置, 反之, 将控制装置接至估算装置, 以便在故障检测器指示所述传感器出现故障时, 控制装置接收转子的估算位置  $\hat{\theta}$ 。



1. 一种控制永磁同步电机“PMSM”(3)的装置(1),所述电机包括定子和转子(7),并由逆变器(11)提供动力,其中,所述装置(1)包括传感器(15),用于测量转子(7)的位置 $\theta_m$ ,以及根据转子位置和设定值,控制永磁同步电机(3)工作点的控制装置(19),其特征在于,还包括:

估算装置(23),确定在一与转子相关的估算的帕克参照系 $\delta-\gamma$ 中的转子位置的估算值 $\hat{\theta}$ ,该估算装置(23)包括:

电动势估算器(31),用来根据所述估算的帕克参照系内限定的数值,确定所述估算的帕克参照系 $\delta-\gamma$ 中的电动势“emf”的估算分量 $\hat{e}_\delta$ ,  $\hat{e}_\gamma$ ,所述数值包括从定子电流测量值获得的电流分量 $i_\delta$ ,  $i_\gamma$ ,对应于逆变器参考电压的定子电压分量 $v_\delta$ ,  $v_\gamma$ ,和转子的转速 $\Omega_c$ ;

转速估算器(33),该转速估算器(33)使用从所述电动势估算器(31)获得的所述电动势“emf”的估算分量 $\hat{e}_\delta$ ,  $\hat{e}_\gamma$ ,并使用一非线性修正器,来根据控制定律确定转速 $\Omega_c$ ,所述控制定律具有一整体收敛区域,所述整体收敛区域包括一个等同于永磁同步电机的工作设定点的渐近稳定均衡的单点;以及

积分器(35),该积分器(35)使用所述从转速估算器(33)获得的转速 $\Omega_c$ ,来计算所述转子位置的估算值 $\hat{\theta}$ ;

调节装置(61),使所述转子位置的估算值 $\hat{\theta}$ 与所测的转子位置 $\theta_m$ 相一致;

故障检测器(25),该故障检测器(25)用来检测所述传感器(15)的故障;以及

开关(27),该开关(27)用来将控制装置(19)接至传感器(15),以便在故障检测器(25)未指示所述传感器出现任何故障时,控制装置(19)接收所测的转子位置 $\theta_m$ ,相反,将控制装置(19)接至估算装置(23),以便在故障检测器(25)指示所述传感器出现故障时,控制装置(19)接收所述转子位置的估算值 $\hat{\theta}$ 。

2. 根据权利要求1所述的控制永磁同步电机“PMSM”(3)的装置(1),其特征在于,所述转速估算器(33)包括第一估算器(43),用来根据与轴 $\gamma$ 相关的电动势估算分量 $\hat{e}_\gamma$ 和取决于转子永磁铁特性的预定物理参数 $K_f$ ,按照如下公式确定一在前的转速的估算值 $\hat{\Omega}$ :

$$\hat{\Omega} = \frac{\hat{e}_\gamma}{K_f},$$

以及,其特征还在于,非线性修正器用来通过引入修正项来调节转速,所述修正项可根据如下公式修正所述转速的估算值 $\hat{\Omega}$ :

$$\Omega_c = \frac{\xi}{K_f} - \frac{b}{K_f} \text{sign}(\hat{\Omega}) \cdot K \cdot \hat{e}_\delta$$

式中,  $b$  是预定工作设定值,  $\text{sign}(\hat{\Omega})$  是所述转速的估算值 $\hat{\Omega}$ 的  $\text{sign}$ ,  $\hat{e}_\delta$  是与轴 $\delta$ 相关的电动势“emf”的估算分量,式中,  $K$  是非线性系数,该系数取决于与轴 $\delta$ 相关的电动势“emf”的估算分量 $\hat{e}_\delta$ 的  $\text{sign}$  和通过如下公式和条件预定的系数 $\xi$

$$K = 1 - \xi \cdot \text{sign}(\hat{e}_\delta) \text{ 和 } 0 < \xi < 1 \text{ 和 } \frac{1}{1+\xi} < b < \frac{1}{1-\xi}。$$

3. 根据权利要求 1 或 2 所述的控制永磁同步电机“PMSM”(3) 的装置 (1), 其特征在于, 所述调节装置 (61) 用来在所测的转子位置  $\theta_m$  和估算转子位置  $\hat{\theta}$  之间完成一 PI 控制。

4. 根据权利要求 3 所述的控制永磁同步电机“PMSM”(3) 的装置 (1), 其特征在于, 所述调节装置 (61) 包括, 在检测到所述传感器存在故障时, 可限制调节装置的限制装置 (71)。

5. 根据权利要求 4 所述的控制永磁同步电机“PMSM”(3) 的装置 (1), 其特征在于, 所述估算装置 (23) 包括初始化装置, 用来在检测到传感器 (15) 故障前, 采用最后一个转子位置的估算值  $\hat{\theta}_0$  来初始化所述转子位置的估算值  $\hat{\theta}$ 。

6. 一种永磁同步电机“PMSM”(3), 其包括根据权利要求 1 或 2 所述的控制永磁同步电机“PMSM”(3) 的装置 (1)。

7. 一种飞机上的执行机构, 其包括根据权利要求 6 所述的永磁同步电机“PMSM”。

8. 一种控制永磁同步电机“PMSM”(3) 的方法, 所述电机包括定子和转子 (7), 并由逆变器 (11) 提供动力, 其中, 控制方法包括如下步骤:

通过传感器 (15) 测量转子的位置  $\theta_m$ , 以及

根据转子位置和预定参数来检查永磁同步电机的工作点,

其特征在于, 所述方法还包括如下步骤:

确定与转子相关的一估算的帕克参照系  $\delta - \gamma$  中转子位置的估算值  $\hat{\theta}$ , 所述确定还包括:

根据所述估算的帕克参照系内确定的数值, 确定所述估算的帕克参照系  $\delta - \gamma$  中的电动势“emf”的估算分量  $\hat{e}_\delta$ ,  $\hat{e}_\gamma$ , 所述数值包括从定子电流的测量中获得的电流分量  $i_\delta$ ,  $i_\gamma$ , 对应于逆变器参照电压的定子电压分量  $v_\delta$ ,  $v_\gamma$ , 和转子的转速  $\Omega_c$ ,

根据所述 emf 的估算分量  $\hat{e}_\delta$ ,  $\hat{e}_\gamma$  并按控制定律使用非线性修正器来估算转速  $\Omega_c$ , 所述控制定律具有一整体收敛区域, 所述整体收敛区域包括一个等于永磁同步电机的工作设定点的渐近稳定均衡的单一一点, 以及

根据转速  $\Omega_c$  计算所述转子位置的估算值  $\hat{\theta}$ ,

使所述转子位置的估算值  $\hat{\theta}$  与所述测量的转子位置  $\theta_m$  相一致,

检测所述传感器的故障, 以及

在传感器未出现故障时, 根据所测转子位置  $\theta_m$ , 检查永磁同步电机的工作点, 反之, 在传感器出现故障时, 根据所述转子位置的估算值  $\hat{\theta}$ , 检查永磁同步电机的工作点。

9. 根据权利要求 8 所述的控制方法, 其特征在于, 其包括如下步骤:

根据与轴  $\gamma$  相关的电动势估算分量  $\hat{e}_\gamma$  和取决于转子永磁铁特性的预定物理参数  $K_f$ , 按照如下公式, 确定一在前的转速的估算值  $\hat{\Omega}$ :

$$\hat{\Omega} = \frac{\hat{e}_\gamma}{K_f},$$

根据如下公式,向所述转速的估算值 $\hat{\Omega}$ 中引入一个修正项来调节转速:

$$\Omega_e = \frac{\hat{e}_\gamma}{K_f} - \frac{b}{K_f} \text{sign}(\hat{\Omega}) \cdot K \cdot \hat{e}_\delta$$

式中,  $b$  是预定工作设定值,  $\text{sign}(\hat{\Omega})$  是转速的所述转速的估算值 $\hat{\Omega}$ 的 sign,  $\hat{e}_\delta$  是与轴  $\delta$  相关的电动势“emf”的估算分量, 式中,  $K$  是非线性系数, 该系数取决于与轴  $\delta$  相关的电动势“emf”的估算分量 $\hat{e}_\delta$ 的 sign 和通过如下公式和条件预定的系数  $\xi$ :

$$K = 1 - \xi \cdot \text{sign}(\hat{e}_\delta) \text{ 式中 } 0 < \xi < 1 \text{ 和 } \frac{1}{1+\xi} < b < \frac{1}{1-\xi}。$$

## 永磁同步电机 (PMSM) 的控制装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及永磁同步电机 (PMSM) 的控制领域。

### 背景技术

[0002] 永磁同步电机 (PMSM) 包括定子和转子。通常,定子包括以星形连接的绕组,转子包括永磁铁。

[0003] 永磁同步电机习惯上由逆变器提供动力,逆变器可使电流波纹系数和电机扭矩得以降低。

[0004] 永磁同步电机具有高扭矩和甚低惯性的特点。此外,其电感系数也较低,对电流反应快,因此对扭矩也反应快。

[0005] 因此,在高功率和高性能执行机构的电动机中使用永磁同步电机,特别是机载系统上。

[0006] 图 5 示出了包括控制装置 101,逆变器 111 和永磁同步电机 103 的系统。

[0007] 逆变器 111 使用直流电源来向永磁同步电机 103 提供动力。它可以将经由控制装置 101 调整的振幅和频率电压施加在永磁同步电机 103 的端子上。

[0008] 控制装置 101 布置成可使用电气反馈数据 106 矢量控制逆变器 111 的电压,特别是,控制转子位置  $\theta$  的精确指示。这个信息习惯上都来自于同步电机轴上的位置或速度传感器。

[0009] 然而,也有无传感器的永磁同步电机控制装置(例如,参见 Babak Nahid-Mobarakeh 等人发表的文章,题目是“基于电动势估算的永磁同步电机无传感器控制定律的收敛性分析”,[国际电气工程评论],文章 Vol6/5-6-2003-pp547-577-doi: 10.3166/rige.6.545-577)。

[0010] 应该注意的是,有关无传感器控制的装置的说明主要都来自上面 Babak Nahid-Mobarakeh 等人的文章。

[0011] 通常,在与定子相关的静止参照系中,永磁同步电机的电气方程描述为:

$$[0012] \quad \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix}$$

[0013] 式中,  $v_a, v_b, v_c$  是定子相位的电压,  $R$  是定子相位的电阻,  $i_a, i_b, i_c$  是定子相位的电流,而  $\psi_a, \psi_b, \psi_c$  是穿过定子绕组的磁通量。

[0014] 另外,在与转子相关的旋转参照系内,也可非常方便地模拟永磁同步电机。

[0015] 图 6 示出了与转子相关的旋转参照系 d-q(称之为帕克参照系 Park frame of reference),包括直轴  $0_d$  和交轴  $0_q$ 。直轴  $0_d$  构成了相对于与定子相关的静轴  $0_\alpha$  的角度  $\theta$ 。更具体地说,角度  $\theta$  标明了由其励轴  $0_d$  所确定的转子位置。

[0016] 通过将肯考迪哑变换 (Concordia transformation)  $T_{32}$  和帕克变换 (Park transformation) 应用到上述方程系上,帕克参照系 d-q 内的电气方程就可表示如下:

$$[0017] \quad v_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - p\Omega Li_q + e_d$$

$$[0018] \quad v_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} - p\Omega Li_d + e_q$$

[0019] 式中,  $v_d$ ,  $v_q$  和  $i_d$ ,  $i_q$  是直交和正交电压和电流分量,  $L$  是定子感应,  $\Omega$  是转子的旋转速度 (即, 参照系 d-q 的角速度),  $p$  是转子永磁铁的极对的数量, 以及  $e_d$ ,  $e_q$  是参照系 d-q 内电动势的分量, 由如下关系确定:

$$[0020] \quad e_d = 0$$

$$[0021] \quad e_q = p\Omega\psi_f$$

[0022] 式中,  $\psi_f$  是流过直流等效电路的磁铁的磁通量。

[0023] 假定转子位置  $\theta$  和角速度  $\Omega$  未测, 参照系 d-q 的位置就不能确定, 那么, 该参照系中的电气量的分量就不可知。

[0024] 通常, 为了解决这个问题, 旋转估算参照系  $\delta-\gamma$  是确定的, 其位置  $\theta$  和速度  $\Omega_c$  已知。估算参照系  $\delta-\gamma$  的轴  $O\delta$  构成了相对于静轴  $O\alpha$  的角度  $\theta$  和相对轴  $Od$  的角度  $\varphi$ 。角度  $\varphi$  表示轴  $O\delta$  和  $Od$  之间的位移。

[0025] 那么, 无传感器矢量控制的问题就在于确定角速度  $\Omega_c$ , 这样,  $\theta$  和  $\varphi$  之间位置的差就可以相互抵消。

[0026] 估算参照系  $\delta-\gamma$  中永磁同步电机的电方程可以写成如下形式:

$$[0027] \quad v_\delta = Ri_\delta + L \frac{di_\delta}{dt} - p\Omega_c Li_\gamma + e_\delta$$

$$[0028] \quad v_\gamma = Ri_\gamma + L \frac{di_\gamma}{dt} - p\Omega_c Li_\delta + e_\gamma$$

[0029] 式中,  $v_\delta$ ,  $v_\gamma$  和  $i_\delta$ ,  $i_\gamma$  是参照系  $\delta-\gamma$  中的电压和电流分量,  $\Omega_c$  是参照系  $\delta-\gamma$  中的角速度, 而  $e_\delta$ ,  $e_\gamma$  是由如下关系确定的参照系  $\delta-\gamma$  中电动势分量:

[0030]

$$e_\delta = p\psi_f\Omega\sin\varphi$$

[0031]

$$e_\gamma = p\psi_f\Omega\cos\varphi$$

[0032] 通常, 为了控制无传感器永磁同步电机, 电动势的分量  $e_\delta$ ,  $e_\gamma$  是在旋转估算参照系  $\delta-\gamma$  中估算的。如果后者和转子相关的参照系 d-q 一致, 那么, 旋转估算参照系中电动势的直接分量为零。这就给出了旋转估算参照系  $\delta-\gamma$  位置  $\theta$  和速度  $\Omega_c$  得以修正的标准, 从而可以与转子相关参照系 d-q 同步。此后, 转子的位置和速度则直接从估算参照系的位置和速度中推算得出。

[0033] 然后, 无传感器矢量控制的问题可以通过确定控制规律来概括, 该控制规律定义了参照系  $\delta-\gamma$  中的角速度  $\Omega_c$  和定子电压分量  $v_\delta$ ,  $v_\gamma$ , 确保  $\varphi$  持续保持为零, 以及在由参考扭矩  $\Gamma_{ref}$  确定的参照点  $i_{\delta ref}$ ,  $i_{\gamma ref}$  处的电流分量  $i_\delta$ ,  $i_\gamma$ 。

[0034] 图 7 示出了一种无传感器控制装置。

[0035] 该控制装置包括扭矩 - 电流变换器 137、矢量控制装置 119, 和参照系  $\delta-\gamma$  中的逆变器 -MSAF 装置 114。

[0036] 变换器 137 通过将参考扭矩 (或设定扭矩)  $\Gamma_{ref}$  的值转换为参照系  $\delta-\gamma$  中相应

参考电流  $i_{\delta \text{ref}}, i_{\gamma \text{ref}}$  而实现从扭矩到电流的转换。

[0037] 矢量控制装置 119 确定了控制逆变器 -MSAF 装置 114 的控制规律,同时确保  $\varphi$  始终保持为零( $\varphi_{\text{ref}} = 0$ )。该控制规律根据反向电流测量所获得的电流分量  $i_{\delta}, i_{\gamma}$  确定了角速度  $\Omega_c$  和参照系  $\delta - \gamma$  中的定子电压分量  $v_{\delta}, v_{\gamma}$ , 以及参照电流  $i_{\delta \text{ref}}, i_{\gamma \text{ref}}$ 。

[0038] 无传感器控制装置特别坚固,因为其少了一个检测部件。为此,无传感器控制装置制造简单,并且,使用寿命比传感器控制装置要长。

[0039] 然而,位置传感器一般都非常精确,而且,使用位置传感器的控制装置都可对向 MSAF 提供动力的逆变器电压进行调节,比无传感器控制装置更精确。

[0040] 为此,本发明的目的就是提供一种可控制具有最佳可靠性、极其安全的 MSAF 的装置,而这些都是航空航天领域的当务之急。

## 发明内容

[0041] 本发明涉及控制永磁同步电机的装置“PMSM”,包括定子和转子,并由逆变器提供动力,其中,所述控制装置包括:

[0042] - 从转子位置测量  $\theta_m$  中采样的传感器,

[0043] - 根据转子位置和预定参数,控制永磁同步电机工作点的控制装置,

[0044] - 确定在与转子相关的估算帕克参照系  $\delta - \gamma$  中转子位置估算值  $\hat{\theta}$  的估算装置,其中,所述估算装置包括调节装置,使所述估算转子位置  $\hat{\theta}$  与所述测量转子位置  $\theta_m$  相一致。

[0045] - 检测所述传感器故障的故障检测器,以及

[0046] - 用来将控制装置连接到传感器上的开关,目的是该控制装置接收转子测量位置  $\theta_m$  的同时,故障检测器不会指示所述传感器的任何故障,或者,将控制装置连接至估算装置,目的是当故障检测器指示所述传感器的故障时,该控制装置接收转子的估算位置  $\hat{\theta}$ 。

[0047] 这样,通过确保电机在传感器出现故障情况下仍能令人满意地工作,从而增加了永磁同步电机降性能下的使用性。应该指出的是,通过传感器采样的测量值,这种装置有利于控制永磁同步电机,并在只有检测到传感器异常情况时,才转换到无传感器控制,同时,可以避免传感器控制转换到无传感器控制时两个位置之间出现的重大差异。

[0048] 有利的是,估算装置包括:

[0049] - 电动势估算器,用来根据所述帕克参照系中确定的数值,在估算帕克参照系  $\delta - \gamma$  内,估算电动势“emf”的分量  $\hat{e}_{\delta}, \hat{e}_{\gamma}$ , 所述帕克参照系中确定的数值包括从定子电流测量中获得的电流分量  $i_{\delta}, i_{\gamma}$ , 对应于逆变器参考电压的定子电压分量  $v_{\delta}, v_{\gamma}$ , 以及转子的旋转速度  $\Omega_c$ 。

[0050] - 速度估算器,其使用的是从电动势估算器获得的电动势的所述估算分量  $\hat{e}_{\delta}, \hat{e}_{\gamma}$ , 以及使用非线性修正器来根据带有整体收敛区域的控制规律确定转速  $\Omega_c$ , 包括一个等于永磁同步电机工作设定点的非对称稳定平衡点。

[0051] - 积分器,使用从转速估算器获得的转速  $\Omega_c$  来计算转子位置所述估算值  $\hat{\theta}$ 。

[0052] 为此,根据本发明的控制装置可根据带有整体收敛区域的控制定律在传感器出现故障的情况下控制永磁同步电机,所述控制规律限制了向单个所需工作点的收敛,不论转子相对于定子的位置如何。

[0053] 根据本发明的一个实施例,所述转速估算器包括第一估算器,用来根据与轴  $\gamma$  相关的电动势估算分量  $\hat{e}_\gamma$  和预定物理参数  $K_f$ , 确定转速的已有估算值  $\hat{\Omega}$ , 这取决于转子永磁铁的特性, 公式如下:

$$[0054] \quad \hat{\Omega} = \frac{\hat{e}_\gamma}{K_f},$$

[0055] 以及非线性修正器, 用来通过引入修正项来调节转速, 该修正项可根据如下公式对转速的所述估算值  $\hat{\Omega}$  进行修正:

$$[0056] \quad \Omega_c = \frac{\xi}{K_f} - \frac{b}{K_f} \text{sign}(\hat{\Omega}) \cdot K \cdot \hat{e}_\delta$$

[0057] 式中,  $b$  是预定的工作设定值,  $\text{sign}(\hat{\Omega})$  是转速所述估算值  $\hat{\Omega}$  的特征,  $\hat{e}_\delta$  是与轴  $\delta$  相关的电动势, 以及, 式中,  $K$  是非线性系数, 该系数取决于与轴  $\delta$  相关的电动势  $\hat{e}_\delta$  的特征和通过如下公式和条件预定的系数  $\xi$ :

$$[0058] \quad K = 1 - \xi \cdot \text{sign}(\hat{e}_\delta) \text{ 式中 } 0 < \xi < 1 \text{ 和 } \frac{1}{1+\xi} < b < \frac{1}{1-\xi}.$$

[0059] 因此, 非线性修正器通过持续使与轴  $\delta$  相关的电动势  $e_\delta$  保持为零, 使所有无关工作点不稳定, 而接近转子的实际参照系。这样, 快速向所需工作点汇集, 同时, 转速逆转。

[0060] 所述调整装置可在所测转子位置  $\theta_m$  和估算转子位置  $\hat{\theta}$  之间实施 PI。

[0061] 有利的是, 调整装置可包括限制装置, 在检测到所述传感器出现故障时, 可限制调整装置。

[0062] 如果检测到故障, 调整装置所进行的修正会受到限制, 因为所测转子位置  $\theta_m$  很可能是错误的。

[0063] 有利的是, 所述估算装置包括初始化装置, 在检测到传感器故障之前, 采用最后一次转子位置估算值  $\hat{\theta}_0$  来初始化所估算的转子位置  $\hat{\theta}$ 。

[0064] 这可防止出现转换振荡, 当从传感器控制转换到无传感器控制时, 可使扭矩值保持恒定不变。

[0065] 另外, 本发明还涉及永磁同步电机, 所述电机包括具有上述特性的控制装置。

[0066] 另外, 本发明还涉及飞机上的执行机构, 所述执行机构包括具有上述特性的永磁同步电机。

[0067] 另外, 本发明还涉及到控制永磁同步电机的方法, 所述电机包括定子和转子, 并由逆变器提供动力, 其中, 所述控制方法包括如下步骤:

[0068] - 通过传感器测量转子的位置  $\theta_m$ , 以及

[0069] - 根据转子位置和预定参数来检测永磁同步电机的工作点,

[0070] - 测定与转子相关的估算帕克参照系  $\delta - \gamma$  中转子位置的估算值  $\hat{\theta}$ ,

[0071] - 使所述估算转子位置  $\hat{\theta}$  与所述测量转子位置  $\theta_m$  相一致,

[0072] - 检测所述传感器的故障, 以及

[0073] - 在传感器未出现故障时, 根据所测转子位置  $\theta_m$  检查永磁同步电机工作点, 相反, 在传感器出现故障时, 根据所估算转子位置  $\hat{\theta}$ , 检查永磁同步电机工作点。

[0074] 控制方法还可包括如下步骤:



[0075] - 根据所述帕克参照系内确定的数值,对估算帕克参照系  $\delta-\gamma$  中的电动势的分量  $\hat{e}_\delta$ ,  $\hat{e}_\gamma$  进行估算,所述数值包括从定子电流测量中获得的电流分量  $i_\delta$ ,  $i_\gamma$ , 对应于逆变器参照电压的定子电压分量  $v_\delta$ ,  $v_\gamma$ , 和转子的转速  $\Omega_c$ 。

[0076] - 根据电动势的所述估算分量  $\hat{e}_\delta$ ,  $\hat{e}_\gamma$  并按控制定律采用非线性修正器来估算转速  $\Omega_c$ , 所述控制定律带有整体收敛区域, 包括一个等于永磁同步电机工作设定点的非对称稳定均衡点,

[0077] - 根据转速  $\Omega_c$ , 计算所述估算转子位置  $\hat{\theta}$ 。

[0078] 控制方法还可包括如下步骤:

[0079] - 根据与轴  $\gamma$  相关的电动势估算分量  $\hat{e}_\gamma$  和取决于转子永磁铁特性的预定物理参数  $K_f$ , 按照如下公式确定转速已有估算值  $\hat{\Omega}$ :

$$[0080] \quad \hat{\Omega} = \frac{\hat{e}_\gamma}{K_f},$$

[0081] - 根据如下公式, 通过向转速的所述估算值  $\hat{\Omega}$  引入修正项来调节转速:

$$[0082] \quad \Omega_c = \frac{\hat{e}_\gamma}{K_f} - \frac{b}{K_f} \text{sign}(\hat{\Omega}) \cdot K \cdot \hat{e}_\delta$$

[0083] 式中,  $b$  是预定的工作设定值,  $\text{sign}(\hat{\Omega})$  是转速的所述估算值  $\hat{\Omega}$  的特征,  $\hat{e}_\delta$  是与轴  $\delta$  相关的电动势, 式中,  $K$  是非线性系数, 该系数取决于与轴  $\delta$  相关的电动势  $\hat{e}_\delta$  的特征和通过如下公式和条件预定的系数  $\xi$ :

$$[0084] \quad K = 1 - \xi \cdot \text{sign}(\hat{e}_\delta) \quad \text{式中 } 0 < \xi < 1 \text{ 和 } \frac{1}{1+\xi} < b < \frac{1}{1-\xi}.$$

[0085] 本发明还涉及包括了实施上述控制方法操作指令的计算机程序。

[0086] 下面阅读参照附图给出的本发明的最佳实施例, 本发明的其它特性和优点会显现出来,

## 附图说明

[0087] 图 1 为根据本发明的永磁同步电机 "PMSM" 的示意图;

[0088] 图 2 为图 1 所示控制装置实施例的示意图;

[0089] 图 3 为图 2 所示转速估算器的实施例示意图;

[0090] 图 4A 和 4B 为图 1 和图 2 所示调整装置具体实施例的示意图;

[0091] 图 5 为根据已有技术的永磁同步电机 PMSM 控制装置的示意图;

[0092] 图 6 为与永磁同步电机转子相关的帕克参照系; 以及

[0093] 图 7 为根据已有技术的无传感器永磁同步电机 PMSM 控制装置示意图。

## 具体实施方式

[0094] 图 1 为根据本发明的永磁同步电机或 "PMSM" 3 控制装置 1 的示意图。

[0095] 永磁同步电机 3 习惯上都包括采用隔离电源以星形连接的定子绕组 5, 和带有与  $p$  对 (其中, 单对在此表示为  $p = 1$ ) 电极对称构成的永磁铁 9 的转子 7。

[0096] 永磁同步电机 3 由逆变器 11 提供电源, 后者在定子绕组 5 的端子上施加电压  $v_a$ ,

$v_b, v_c$ 。根据三相模式的逆变器 - 永磁同步电机组件用方框 13 简单表示。

[0097] 控制装置 1 包括位置传感器 15、电气测量装置 17, 以及控制装置 19。

[0098] 位置传感器 15 是一种解算器 (例如, 霍耳效应传感器, 或任何其它类型的解算器), 安装在永磁同步电机 3 上, 以便对转子位置 7 测量值  $\theta_m$  进行精确采样分析。当然, 位置也可以通过测量转子转速而不是位置来间接确定。在这种情况下, 位置传感器可以包括测量转速的装置, 以及确定该位置的积分器。

[0099] 电气测量装置 17 用来测量电气反馈数据, 更确切地说, 测量永磁同步电机 3 的定子电流  $i_a, i_b, i_c$ 。

[0100] 控制装置 19 接收有关转子位置的信号, 有关电气测量装置 17 所测定子电流  $i_a, i_b, i_c$  的信号, 以及有关参考转矩  $\Gamma_{ref}$  和 / 或参考转速  $\Omega_{ref}$  的数据。

[0101] 控制装置 19 包括逆变器 - 永磁同步电机组件 13 的三相模型和帕克参照系内两相模型之间的转换接口 21。这种转换可根据转子 7 的位置将三相模型的物理量转换为两相模型, 反之则亦然。

[0102] 这样, 根据转子 9 的位置、预定参数 ( $\Gamma_{ref}$  和 / 或  $\Omega_{ref}$ )、以及电气反馈数据, 控制装置 19 就可控制或检查永磁同步电机 3 的工作点 (即, 参考转矩  $\Gamma_{ref}$  和 / 或参考转速  $\Omega_{ref}$  期望的或设定的工作点)。

[0103] 根据本发明, 控制装置还包括估算装置 23、故障检测器 25 和转换开关 27。

[0104] 估算装置 23 用来确定估算帕克参照系  $\delta - \gamma$  内转子的估算位置  $\hat{\theta}$ 。参照图 2 可更清楚地看到, 该估算可以通过对估算旋转参照系  $\delta - \gamma$  的位置  $\theta$  的修正来进行, 这样, 就可使其与转子相关的参照系 d-q 实现同步 (另见图 6)。

[0105] 故障检测器 25 用来检测传感器 15 可能出现的故障。特别是, 故障检测器 25 可以 - 例如 - 检测检测器 15 出现故障时其本身所产生或传送的故障信号。。

[0106] 开关 27 用来连接控制装置 19 至估算装置 23, 或至位置传感器 15, 这取决于故障信号 S 是否指示传感器 15 出现故障。

[0107] 更确切地说, 当故障检测器未指示位置传感器 15 任何故障时, 开关 27 保持控制装置 19 与位置传感器 15 的连接, 这样, 控制装置 19 接收转子 7 所测位置  $\theta_m$ 。相反, 当故障检测器指示位置传感器 15 在发生故障时, 开关 27 则将控制装置 19 连接至估算装置 23, 这样, 控制装置 19 接收转子 7 的估算位置  $\hat{\theta}$ 。

[0108] 这样, 一旦传感器 15 出现故障, 开关 27 边从使用传感器控制转为无传感器控制永磁同步电机 3。这样永磁同步电机 3 也就可以在降性能方式下使用。自然, 一旦位置传感器 15 修复, 永磁同步电机 3 则会再次由位置传感器 15 控制。

[0109] 值得指出的是, 图 1 和图 2-4B 也都示出了根据本发明控制方法的主要步骤。

[0110] 图 2 示出了图 1 所示控制装置的实施方式。

[0111] 如图 2 所示, 估算装置 23 包括电动势估算器 31、速度估算器 33、以及积分器 35。此外, 除了转换接口 21 外, 控制装置 19 还包括转矩 - 电流转换器 37 和电流调节器 39。

[0112] 转矩 - 电流转换器 37 将参考转矩  $\Gamma_{ref}$  值转换成估算帕克参照系  $\delta - \gamma$  中的对应参考电流  $i_{\delta ref}, i_{\gamma ref}$ 。

[0113] 此外, 转换接口 21 将电气测量装置 17 所测定子电流  $i_a, i_b, i_c$  转换成为帕克参照系  $\delta - \gamma$  中的电流分量  $i_\delta, i_\gamma$ 。

[0114] 此外,电流调节器 39 接收来自扭矩-电流变换器 37 的参考电流  $i_{\delta \text{ref}}, i_{\gamma \text{ref}}$  和来自转换接口 21 参照系  $\delta-\gamma$  中的电流分量  $i_{\delta}, i_{\gamma}$ , 以确定对应于逆变器 11 参考电压参照系  $\delta-\gamma$  中的定子电压分量  $v_{\delta}, v_{\gamma}$ 。转换接口 21 接收这些根据两相模型的定子电压分量  $v_{\delta}, v_{\gamma}$ , 并根据三相模型将其转换成逆变器 11 的参考电压  $v_a^*, v_b^*, v_c^*$ 。

[0115] 无传感器矢量控制在于估算角速度  $\Omega_c$ , 这样,  $\theta$  和  $\theta$  之间位置差  $\varphi$  就会被取消 (见图 6)。换句话说, 必须从控制定律来获得角速度  $\Omega_c$ , 保证位置误差  $\varphi$  持续保持为零 ( $2\pi$  模量)。

[0116] 然而, 假定当  $\varphi$  趋于零 ( $e_{\delta} = p\psi_f \Omega \sin \varphi$ ) 时, 轴  $\delta$  的电动势分量  $e_{\delta}$  趋于零, 持续保持零位时的位置差  $\varphi$  就可以由零位时持续保持  $e_{\delta}$  来取代。

[0117] 这种估算在于解算估算参照系  $\delta-\gamma$  中的如下电气方程:

$$[0118] \quad \dot{e}_{\delta} = -Ri_{\delta} - L \frac{di_{\delta}}{dt} - p\Omega_c Li_{\gamma} + v_{\delta}$$

$$[0119] \quad \dot{e}_{\gamma} = -Ri_{\gamma} - L \frac{di_{\gamma}}{dt} - p\Omega_c Li_{\delta} + v_{\gamma}$$

[0120] 结果, 电动势估算器 31 接收来自转换接口 21 的电流分量  $i_{\delta}, i_{\gamma}$ , 来自电流调节器 39 的定子电压分量  $v_{\delta}, v_{\gamma}$ , 和来自转速估算器 33 的转子转速  $\Omega_c$ , 以便根据这些量来对估算参照系  $\delta-\gamma$  中的电动势分量  $\hat{e}_{\delta}, \hat{e}_{\gamma}$  进行估算。

[0121] 根据电动势估算器 31 所确定的电动势估算值  $\hat{e}_{\delta}, \hat{e}_{\gamma}$ , 由转速估算器 33 来闭环估算转子的转速  $\Omega_c$ , 以及通过保持分量  $\hat{e}_{\delta}$  持续为零。显然, 转子转速  $\Omega_c$  通过预定初始值  $\Omega_{c0}$  来初始化。

[0122] 有利的是, 转速估算器 31 使用非线性修正器来根据控制定律确定转速, 这种定律带有整体收敛区域, 包括一个在李雅普诺夫概念上的非对称稳定均衡点。该均衡点等于 MSAF 3 的工作设定点。

[0123] 图 3 示出了转速估算器 33 的实施例。

[0124] 根据这个示例, 转速估算器 33 的功能图包括第一转速估算器 43、比较器 45, 第一和第二特征指示器 47 和 49、加法器 51、和非线性修正器 53。

[0125] 比较器 45 的目的是将分量  $\hat{e}_{\delta}$  与其参考分量进行比较  $e_{\delta \text{ref}} = 0$ 。第一转速比较器 43 的目的是根据估算分量  $\hat{e}_{\gamma}$  来确定转速的已有估算值  $\hat{\Omega}$ 。如果假设  $\text{sign}(\hat{\Omega}) = \text{sign}(\Omega_{\text{ref}})$ , 式中,  $\Omega_{\text{ref}}$  是设定转速, 第一特征指示器 47 的目的是指示转速的已有估算值  $\hat{\Omega}$  的特征。第二特征指示器 49 的目的是指示分量  $\hat{e}_{\delta}$  的特征。非线性修正器 53 的目的是引入非线性项目, 以便使得控制定律收敛的所有无用点变得不稳定, 或者, 防止收敛到任何无用的解决方案。最后, 加法器 51 的目的是将非线性项目加到已有估算值  $\hat{\Omega}$ , 以便确定转速  $\Omega_c$ 。

[0126] 根据转子永磁铁的特性, 第一转速估算器 43 使用如下公式计算与轴  $\gamma$  相关的电动势分量  $\hat{e}_{\gamma}$  和预定物理参数  $K_f$  之间的商:

$$[0127] \quad \hat{\Omega} = \frac{\hat{e}_{\gamma}}{K_f} \text{ 式中 } K_f = p \psi_f$$

[0128] 根据具体实施例, 非线性修正器 53 引入修正项, 该项是转速已有估算值  $\hat{\Omega}$  的特征

$\text{sign}(\hat{\Omega})$ 、预定工作参数  $b$ 、物理参数  $K_f$ 、与轴  $\delta$  相关电动势的分量  $\hat{e}_\delta$  的函数,和最后的非线性系数,该系数取决于分量  $\hat{e}_\delta$  特征和预定系数  $\xi$ ,使用如下公式:

$$[0129] \quad -\frac{b}{K_f} \text{sign}(\hat{\Omega}) K_f \hat{e}_\delta \text{ 和 } K = 1 - \xi \text{sign}(\hat{e}_\delta)。$$

[0130] 然后,加法器 51 将上述修正项加到已有估算值  $\hat{\Omega}$ ,以便使用如下公式确定转速  $\Omega_c$ :

$$[0131] \quad \Omega_c = \frac{\hat{e}_\delta}{K_f} - \frac{b}{K_f} \text{sign}(\hat{\Omega}) K_f \hat{e}_\delta$$

[0132] 应该指出的是,通过使用上述公式,对以转速  $\Omega_c$  表示的控制定律的稳定性进行分析(见 Babak Nahid-Mobarakeh 等人文章,“基于电动势估算的永磁同步电机无传感器控制定律收敛分析”),可以看出,在相空间的所有轨道  $\varphi - \Omega$  都会向如下条件的所需均衡点 ( $\varphi = 0, \Omega = \Omega_{\text{ref}}$ ) 收敛:

$$[0133] \quad 0 < \xi < 1 \text{ 和 } \frac{1}{1+\xi} < b < \frac{1}{1-\xi}。$$

[0134] 工作参数  $b$  可以设在 0 和 3 ( $0 < b \leq 3$ ) 之间,优选接近 1。

[0135] 通过使某些均衡点不稳定,上述控制定律可以使相空间内所有轨道防止向所有无用均衡点收敛,并可将相空间内的其它点远离来防止它们。特别是,这可以使得转速靠近零时电气方程上所固有的非观察性问题得以解决。

[0136] 此外,修正项对转速特征  $\text{sign}(\hat{\Omega})$  的依赖性使得相空间  $\varphi - \Omega$  的轨道向期望点收敛,不论设定转速  $\Omega_{\text{ref}}$  特征如何,允许转速反向,毫无任何问题。

[0137] 这样,在上述条件下,不论初始坐标点 ( $-\pi \leq \varphi \leq \pi, \Omega = \Omega_0$ ) 怎样,相空间  $\varphi - \Omega$  里的所有轨道都会向所需均衡点收敛。

[0138] 换句话说,即使开始时,初始位置误差约为  $\pi$ ,轨道会使用设定扭矩和转速值快速向工作点收敛。

[0139] 此外,即使开始时初始点带有特征的转速,与设定转速相反,位置误差会快速向零位收敛,从而使得永磁同步电机快速获得与设定扭矩和转速值相等的永久转速。

[0140] 当转速估算器 33 确定了转速时,积分器 35 就会对来自转速估算器 33 的转速  $\Omega_c$  进行综合,以确定估算转子位置  $\hat{\theta}$ 。

[0141] 此外,为了能在传感器控制和无传感器控制之间进行均匀而精确转换,估算装置 23 可包括持续调节所估算转子位置  $\hat{\theta}$  的装置。

[0142] 图 4A 示出了包括在估算装置 23 内的调节装置 61。调节装置 61 用来在所测转子位置  $\theta_m$  和所估算转子位置  $\hat{\theta}$  之间的差上实施 PI,以便使得所估算位置能够与所测转子位置  $\theta_m$  一致。

[0143] 为此,调节装置 61 包括可将位置传感器 15 所测转子位置  $\theta_m$  与积分器 35 估算转子位置  $\hat{\theta}$  进行快速比较的位置比较器 63,为了不使积分出现偏离的实现逆反应的 PI 滤波器或增益倍增器 65,将所估算转子位置  $\hat{\theta}$  与所测转子位置  $\theta_m$  进行同步的附加综合器 67,以及为修正  $\hat{\theta}_c$  转子位置而在附加综合器 67 输出端和所估算转子位置  $\hat{\theta}$  之间设置的第二比较器 69。

[0144] 应该注意的是,比较和逆反应持续进行,防止转子位置的估算值  $\hat{\theta}$  出现偏离,因为

在使用位置传感器 15 的同时,估算值 $\hat{\theta}$ 会处于开环状态。当检测到位置传感器 15 存在故障时,那么此时来自转速估算器 33 的最后一个估算转速值  $\Omega_e$ 就会随着控制方式的转换而注入到积分器 35 内。

[0145] 于是,如果在传感器控制和无传感器控制之间确实发生转换,最后一个所测值  $\theta_m$ 和估算值 $\hat{\theta}$ 之间的差就会非常小。

[0146] 在控制方式转换后,就不再需要逆反应了,因为位置传感器 15 给出的数值是不准确的。

[0147] 实际上,如图 4A 所示,调节装置 61 包括限制装置 71,当故障检测器 25 指示位置传感器 15 存在故障时,则会限制调节装置 61 动作。限制装置 71 非常简单,包括计算故障信号 S 积的倍增器,和发送转子位置修正量的附加积分器 67。这样,当检测到故障时,故障信号等于零 ( $S = 0$ ),因此,限制装置 71 的输出设定为零,使得转子位置的最后所测值  $\theta_m$ 被抑制或被撇弃。相反,在故障信号指示传感器无异常 ( $S = 1$ ) 时,调节装置则使用转子位置所测值  $\theta_m$ 。

[0148] 如图 4B 所示,估算装置 23 包括初始化装置 73,在检测位置传感器 15 故障前,用来通过最后估算值 $\hat{\theta}_0$ 来重新初始化所估算转子位置 $\hat{\theta}$ 。

[0149] 初始化装置 73 包括存储器,记录了仍为正确的转子位置(估算的 $\hat{\theta}$ 或修正的 $\hat{\theta}_e$ )的最后值。

[0150] 实际上,当检测到故障时,故障信号 S 启动触发器,例如,引起积分的向下的信号由最后的估算转子位置 $\hat{\theta}_0$ 重新初始化。

[0151] 为此,在传感器控制和无传感器控制之间转换的时候,两种控制方式之间瞬间出现的扭矩不会产生振动。

[0152] 应该注意的是,控制装置的不同部分可包括带有一个或多个计算机程序的处理或计算装置,当这些不同部分执行计算机程序时,处理或计算装置可通过代码指令实施本发明的控制方法。

[0153] 为此,本发明还涉及计算机程序产品,该产品可在控制装置不同部件内实施,其中,该程序包括能够实施上述本发明方法的代码指令。

[0154] 包括永磁同步电机和根据本发明控制永磁同步电机的系统可方便地用在机载系统内的执行电机上。例如,可用在压气机、通风系统、反推装置、舱门和许多其它飞机设备上。

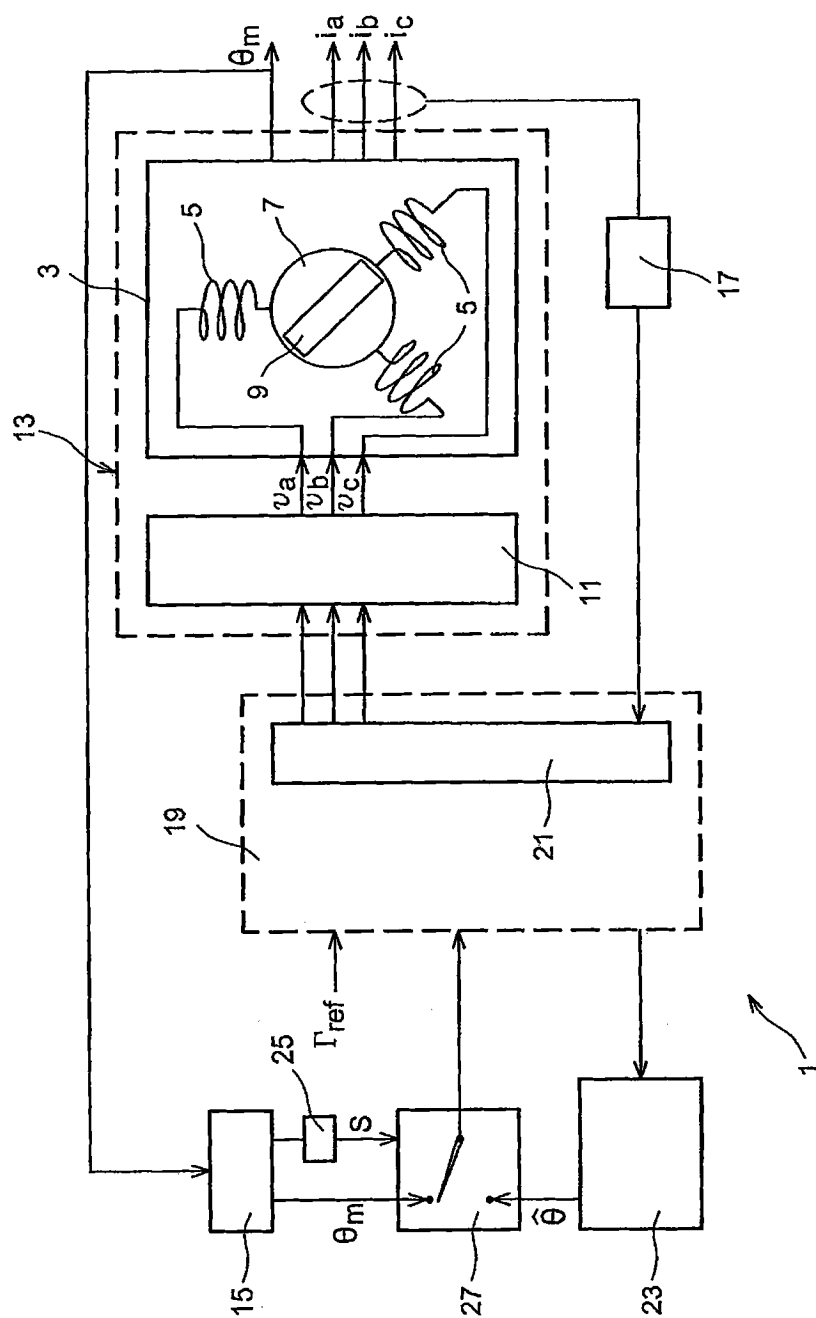


图 1

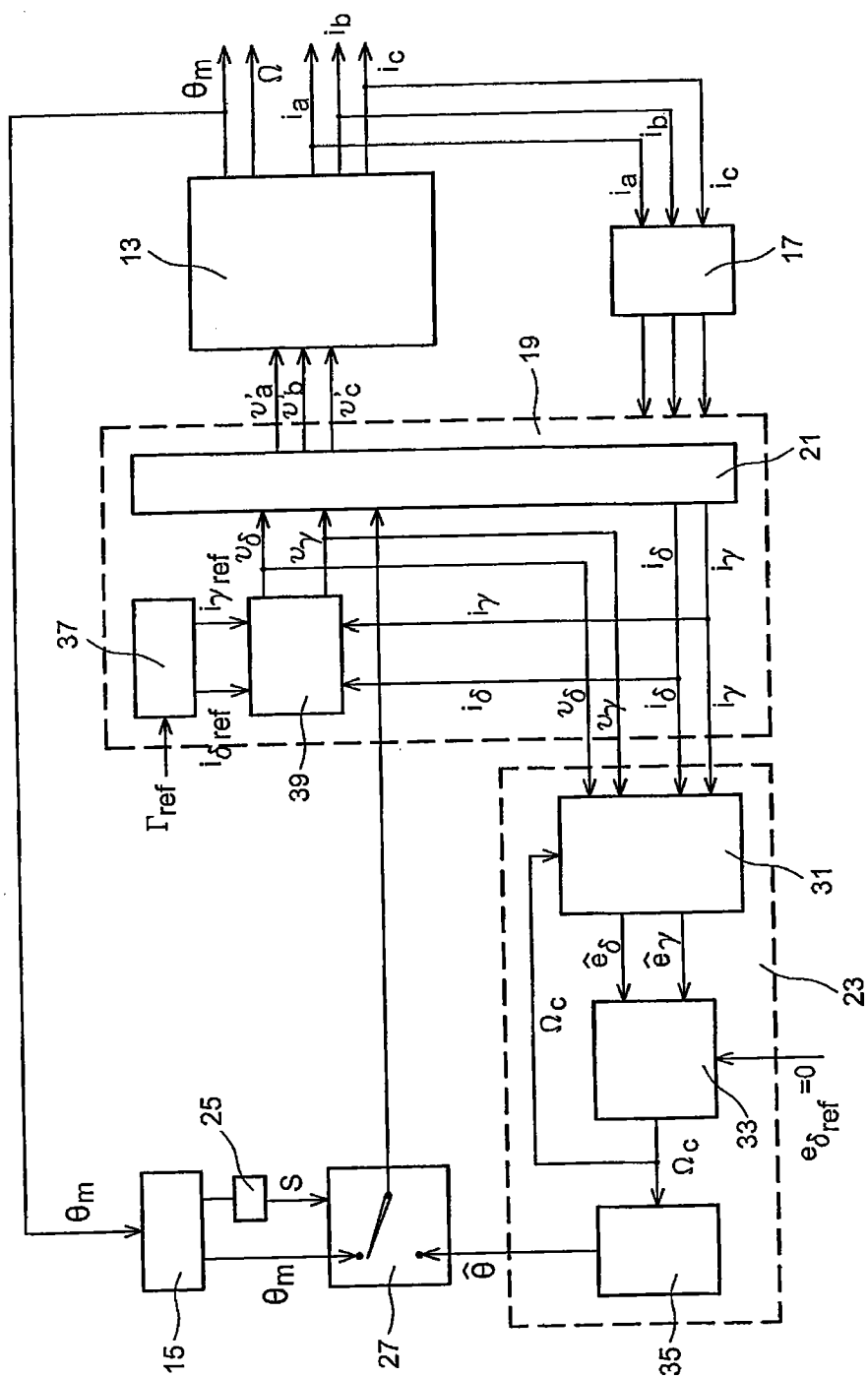


图 2

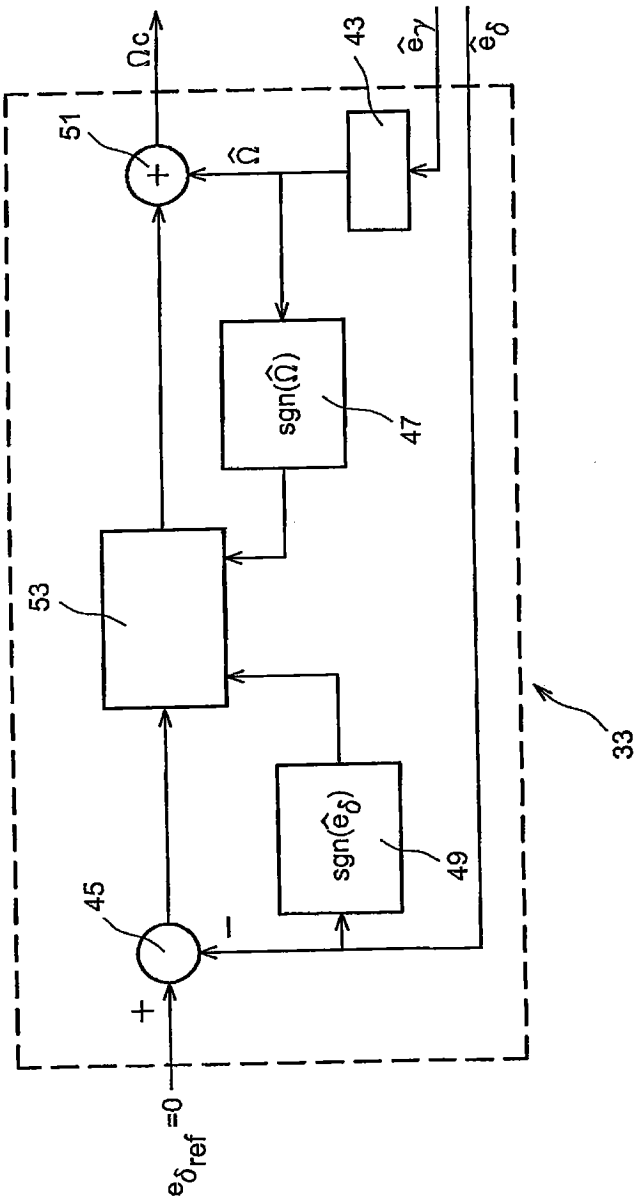


图 3



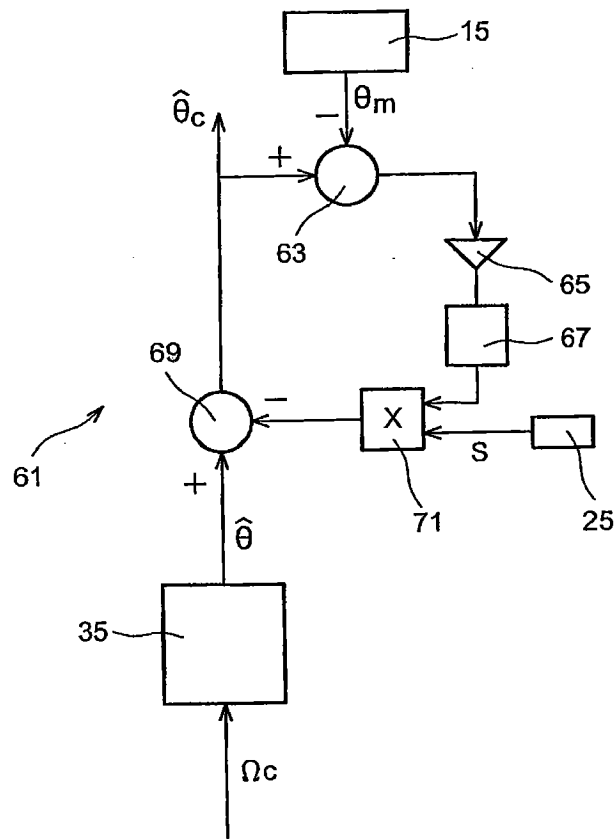


图 4A

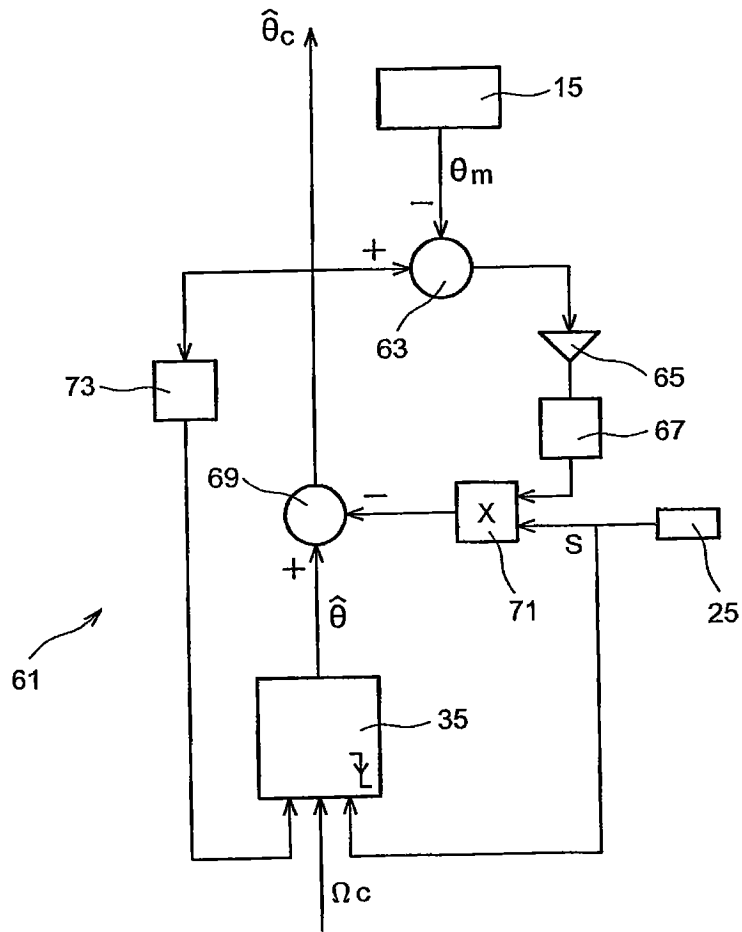


图 4B

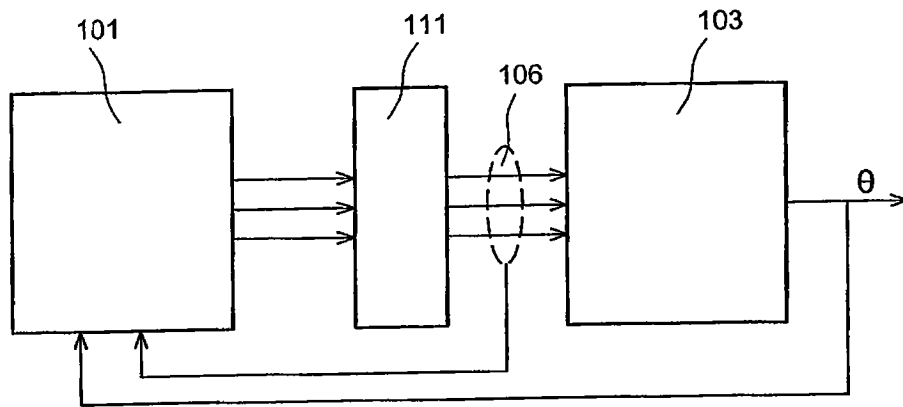


图 5

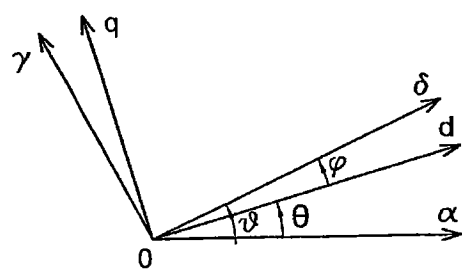


图 6

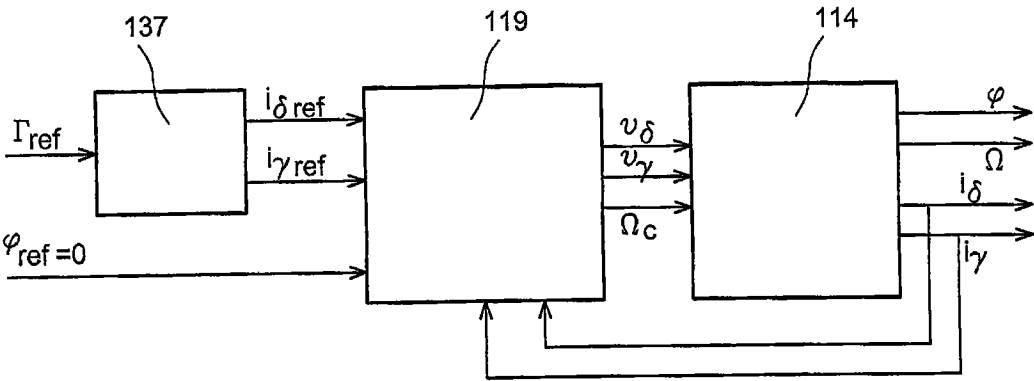


图 7