



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 115149847 B

(45) 授权公告日 2023. 02. 24

(21) 申请号 202210925980.0

(22) 申请日 2022.08.03

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 115149847 A

(43) 申请公布日 2022.10.04

(73) 专利权人 哈尔滨工业大学
地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西
大直街92号

(72) 发明人 杨贵杰 孙国栋 苏健勇 钟本诚
谭凯文

(74) 专利代理机构 哈尔滨华夏松花江知识产权
代理有限公司 23213
专利代理师 于歌

(51) Int. Cl.
H02P 6/04 (2016.01)
H02P 21/00 (2016.01)
H02P 21/13 (2006.01)
H02P 21/14 (2016.01)
H02P 21/18 (2016.01)
H02P 21/20 (2016.01)
H02P 25/022 (2016.01)

(56) 对比文件

CN 112202370 A, 2021.01.08
CN 101256414 A, 2008.09.03
CN 109889107 A, 2019.06.14
CN 113794404 A, 2021.12.14
CN 106330046 A, 2017.01.11
CN 107134964 A, 2017.09.05
US 2020007062 A1, 2020.01.02
王明义 等. 基于FPGA的FPMSM滑模观测器无
传感器控制.《微特电机》.2012, 第40卷(第3期),
Meng Shao et al.. A Method of Open
Circuit Fault Diagnosis for Five-phase
Permanent Magnet Synchronous Motor Based
on Wavelet Analysis.《2019 22nd
International Conference on Electrical
Machines and Systems (ICEMS)》.2019,
Guodong Sun et al.. A Flux-Linkage
Torque Ripple Suppression Method of Dual-
Series FPMSMs Decoupling Control Based on
Dual-Frequency Vector Modulation.
《Energies》.2014,

审查员 贾贺帅

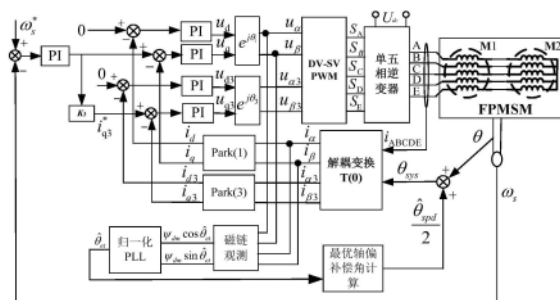
权利要求书2页 说明书5页 附图4页

(54) 发明名称

五相电机同轴串联系统的轴偏补偿方法

(57) 摘要

五相电机同轴串联系统的轴偏补偿方法, 涉
及电机控制技术领域。本发明是为了解决五相电
机的同轴串联驱动系统出现轴偏故障时, 会导致
输出效率下降以及两串联电机转矩产生偏差的
问题。本发明所述的五相电机同轴串联系统的轴
偏补偿方法, 先对五相电机同轴串联系统进行轴
偏角度检测, 确定轴偏角大小; 然后根据轴偏角
对串联系统进行轴偏补偿, 提升系统转矩输出效
率, 解决两电机转矩输出不均问题。



1. 五相电机同轴串联系统的轴偏补偿方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤一:采用五相-两相静止变换阵将五相电机同轴串联系统在自然坐标系下的五相电流 I_s 变换为静止坐标系下的 α 和 β 轴电流;

步骤二:利用磁链观测器对五相电机同轴串联系统进行观测,获得基波下 α 和 β 轴的定子绕组磁链观测值;

步骤三:通过下式计算五相电机同轴串联系统 α 和 β 轴的永磁磁链估计值:

$$\begin{bmatrix} \hat{\psi}_{d1\alpha} + \hat{\psi}_{d2\alpha} \\ \hat{\psi}_{d1\beta} + \hat{\psi}_{d2\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\psi}_{s1\alpha} + \hat{\psi}_{s2\alpha} \\ \hat{\psi}_{s1\beta} + \hat{\psi}_{s2\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_{\alpha1} + L_{\alpha2} & 0 \\ 0 & L_{\beta1} + L_{\beta2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix},$$

其中, $\hat{\psi}_{d1\alpha}$ 和 $\hat{\psi}_{d2\alpha}$ 分别为两个五相电机基波下 α 轴的永磁磁链估计值, $\hat{\psi}_{d1\beta}$ 和 $\hat{\psi}_{d2\beta}$ 分别为两个五相电机基波下 β 轴的永磁磁链估计值, $\hat{\psi}_{s1\alpha}$ 和 $\hat{\psi}_{s2\alpha}$ 分别为两个五相电机基波下 α 轴的定子绕组磁链观测值, $\hat{\psi}_{s1\beta}$ 和 $\hat{\psi}_{s2\beta}$ 分别为两个五相电机基波下 β 轴的定子绕组磁链观测值, i_{α} 和 i_{β} 分别为静止坐标系下的 α 和 β 轴电流, $L_{\alpha1}$ 和 $L_{\alpha2}$ 分别为两个五相电机基波下 α 轴的电感, $L_{\beta1}$ 和 $L_{\beta2}$ 分别为两个五相电机基波下 β 轴的电感;

步骤四:采用归一化锁相环估算五相电机同轴串联系统磁链的估计位置角 $\hat{\theta}_{et}$,

步骤五:根据五相电机同轴串联系统磁链的估计位置角 $\hat{\theta}_{et}$ 和一个五相电机的实际位置角 θ 计算轴偏角的估计值 $\hat{\theta}_{spd}$:

$$\hat{\theta}_{spd} = \arctan \left[\frac{2 \tan(\hat{\theta}_{et} - \theta)}{1 - \tan^2(\hat{\theta}_{et} - \theta)} \right];$$

步骤六:调整五相电流 I_s 使得五相电机同轴串联系统磁链的位置角 θ_{sys} 符合下式:

$$\theta_{sys} = \theta + \frac{\hat{\theta}_{spd}}{2},$$

使得五相电机同轴串联系统输出转矩最大,完成轴偏补偿。

2. 根据权利要求1所述的五相电机同轴串联系统的轴偏补偿方法,其特征在于,步骤一中根据下式获得静止坐标系下的 α 和 β 轴电流:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \cos(\alpha) & \cos(2\alpha) & \cos(3\alpha) & \cos(4\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \sin(2\alpha) & \sin(3\alpha) & \sin(4\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ i_e \end{bmatrix},$$

其中, $\alpha = 2\pi/5$, i_a 、 i_b 、 i_c 、 i_d 和 i_e 分别为五相电机a、b、c、d和e相电流。

3. 根据权利要求1所述的五相电机同轴串联系统的轴偏补偿方法,其特征在于,步骤二中磁链观测器的表达式为:

$$P \begin{bmatrix} \hat{\psi}_{s\alpha} \\ \hat{\psi}_{s\beta} \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} \hat{\psi}_{s1\alpha} + \hat{\psi}_{s2\alpha} \\ \hat{\psi}_{s1\beta} + \hat{\psi}_{s2\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_{s1} + R_{s2} & 0 \\ 0 & R_{s1} + R_{s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix},$$

其中, R_{s1} 和 R_{s2} 分别为五相电机同轴串联系统中两个电机的内阻, u_α 和 u_β 分别为基波下 α 和 β 轴的电压, $\hat{\psi}_{s\alpha}$ 和 $\hat{\psi}_{s\beta}$ 分别为基波下 α 和 β 轴的定子绕组磁链观测值, $p[\]$ 表示微分函数。

4. 根据权利要求1所述的五相电机同轴串联系统的轴偏补偿方法, 其特征在于, 步骤四中利用下式估算五相电机同轴串联系统磁链的估计位置角 $\hat{\theta}_{et}$:

$$\begin{bmatrix} \hat{\psi}_{d1\alpha} + \hat{\psi}_{d2\alpha} \\ \hat{\psi}_{d1\beta} + \hat{\psi}_{d2\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_{dm} \cos \theta + \psi_{dm} \cos(\theta + \theta_{spd}) \\ \psi_{dm} \sin \theta + \psi_{dm} \sin(\theta + \theta_{spd}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_{dm} \cos(\hat{\theta}_{et}) \\ \psi_{dm} \sin(\hat{\theta}_{et}) \end{bmatrix},$$

其中, ψ_{dm} 为永磁体磁链幅值。

5. 根据权利要求4所述的五相电机同轴串联系统的轴偏补偿方法, 其特征在于, 所述永磁体磁链幅值 ψ_{dm} 的表达式如下:

$$\psi_{dm} = \sqrt{\psi_{d1\alpha}^2 + \psi_{d1\beta}^2} = \sqrt{\psi_{d2\alpha}^2 + \psi_{d2\beta}^2}.$$

6. 根据权利要求1所述的五相电机同轴串联系统的轴偏补偿方法, 其特征在于, 五相电机同轴串联系统总输出转矩 T_e 为:

$$T_e = \frac{5}{2} q \left\{ \psi_{dm} I_s \left[\cos \theta_x + \cos(\hat{\theta}_{spd} - \theta_x) \right] \right\},$$

其中, q 为电机极对数, θ_x 为补偿角, 当输出转矩最大时 $\theta_x = \hat{\theta}_{spd} / 2$, ψ_{dm} 为永磁体磁链幅值。

五相电机同轴串联系统的轴偏补偿方法

技术领域

[0001] 本发明属于电机控制技术领域。

背景技术

[0002] 由于越来越多的大功率液压机械化设备开始电气化改造,所以大惯量执行机构的电气化驱动对电机驱动系统提出更多要求。大惯量执行机构的驱动方式多采用双机同轴串联驱动方式,以满足高转矩输出,降低大惯量动态影响,延长传动轴使用寿命等需求。但是,两同轴结构的传统三相电机缺乏故障容错的能力,无法满足在航空航天等领域的高功率密度和高可靠性需求。而多相永磁同步电机具有低转矩脉动、强容错能力和低压大功率等输出特性,更适用于高惯量传动机构的串联驱动,多相电机的同轴串联驱动对系统功率和可靠性提升具有重要意义。其中五相电机的同轴串联驱动系统不仅能输出更大的功率,容错及可靠性提升。单逆变器驱动对驱动体积和成本均具有不可替代的优势。不过,机械同轴的刚性连接是为了保证两电机位置的一致性,当装配有偏差以及连接轴老化等问题存在时,均会造成连接轴相位偏移,使两电机出现位置偏差。轴偏故障对系统转矩输出效率有重要影响,会造成两电机转矩输出不均,促使轴偏持续恶化。而严重的轴偏故障除了会导致效率下降外,还会使两电机产生相反扭矩,降低连接轴使用寿命,进而影响连接轴的可靠性,对系统运行造成安全隐患。综上所述,系统输出效率下降和两串联电机的转矩偏差是轴偏故障急需解决的问题。

发明内容

[0003] 本发明是为了解决五相电机的同轴串联驱动系统出现轴偏故障时,会导致输出效率下降以及两串联电机转矩产生偏差的问题,现提供五相电机同轴串联系统的轴偏补偿控制方法。

[0004] 五相电机同轴串联系统的轴偏补偿方法,包括以下步骤:

[0005] 步骤一:采用五相-两相静止变换阵将五相电机同轴串联系统在自然坐标系下的五相电流 I_s 变换为静止坐标系下的 α 和 β 轴电流;

[0006] 步骤二:利用磁链观测器对五相电机同轴串联系统进行观测,获得基波下 α 和 β 轴的定子绕组磁链观测值;

[0007] 步骤三:通过下式计算五相电机同轴串联系统 α 和 β 轴的永磁磁链估计值:

$$[0008] \quad \begin{bmatrix} \hat{\psi}_{d1\alpha} + \hat{\psi}_{d2\alpha} \\ \hat{\psi}_{d1\beta} + \hat{\psi}_{d2\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\psi}_{s1\alpha} + \hat{\psi}_{s2\alpha} \\ \hat{\psi}_{s1\beta} + \hat{\psi}_{s2\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_{\alpha1} + L_{\alpha2} & 0 \\ 0 & L_{\beta1} + L_{\beta2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix},$$

[0009] 其中, $\hat{\psi}_{d1\alpha}$ 和 $\hat{\psi}_{d2\alpha}$ 分别为两个五相电机基波下 α 轴的永磁磁链估计值, $\hat{\psi}_{d1\beta}$ 和 $\hat{\psi}_{d2\beta}$ 分别为两个五相电机基波下 β 轴的永磁磁链估计值, $\hat{\psi}_{s1\alpha}$ 和 $\hat{\psi}_{s2\alpha}$ 分别为两个五相电机基波下 α 轴的定子绕组磁链观测值, $\hat{\psi}_{s1\beta}$ 和 $\hat{\psi}_{s2\beta}$ 分别为两个五相电机基波下 β 轴的定子绕组磁链观测值, i_{α} 和 i_{β} 分别为静止坐标系下的 α 和 β 轴电流, $L_{\alpha1}$ 和 $L_{\alpha2}$ 分别为两个五相电机基波下 α 轴的

电感, $L_{\beta 1}$ 和 $L_{\beta 2}$ 分别为两个五相电机基波下 β 轴的电感;

[0010] 步骤四: 采用归一化锁相环估算五相电机同轴串联系统磁链的估计位置角 $\hat{\theta}_{et}$,

[0011] 步骤五: 根据五相电机同轴串联系统磁链的估计位置角 $\hat{\theta}_{et}$ 和一个五相电机的实际位置角 θ 计算轴偏角的估计值 $\hat{\theta}_{spd}$:

$$[0012] \quad \hat{\theta}_{spd} = \arctan \left[\frac{2 \tan(\hat{\theta}_{et} - \theta)}{1 - \tan^2(\hat{\theta}_{et} - \theta)} \right];$$

[0013] 步骤六: 调整五相电流 I_s 使得五相电机同轴串联系统磁链的位置角 θ_{sys} 符合下式:

$$[0014] \quad \theta_{sys} = \theta + \frac{\hat{\theta}_{spd}}{2},$$

[0015] 使得五相电机同轴串联系统输出转矩最大, 完成轴偏补偿。

[0016] 进一步的, 上述步骤一中根据下式获得静止坐标系下的 α 和 β 轴电流:

$$[0017] \quad \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \cos(\alpha) & \cos(2\alpha) & \cos(3\alpha) & \cos(4\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \sin(2\alpha) & \sin(3\alpha) & \sin(4\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ i_e \end{bmatrix},$$

[0018] 其中, $\alpha = 2\pi/5$, i_a 、 i_b 、 i_c 、 i_d 和 i_e 分别为五相电机 a、b、c、d 和 e 相电流。

[0019] 进一步的, 上述步骤二中磁链观测器的表达式为:

$$[0020] \quad p \begin{bmatrix} \hat{\psi}_{s\alpha} \\ \hat{\psi}_{s\beta} \end{bmatrix} = p \begin{bmatrix} \hat{\psi}_{s1\alpha} + \hat{\psi}_{s2\alpha} \\ \hat{\psi}_{s1\beta} + \hat{\psi}_{s2\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_{s1} + R_{s2} & 0 \\ 0 & R_{s1} + R_{s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix},$$

[0021] 其中, R_{s1} 和 R_{s2} 分别为五相电机同轴串联系统中两个电机的内阻, u_α 和 u_β 分别为基波下 α 和 β 轴的电压, $\hat{\psi}_{s\alpha}$ 和 $\hat{\psi}_{s\beta}$ 分别为基波下 α 和 β 轴的定子绕组磁链观测值, $p[\]$ 表示微分函数。

[0022] 进一步的, 上述步骤四中利用下式估算五相电机同轴串联系统磁链的估计位置角

$$\hat{\theta}_{et}: \begin{bmatrix} \hat{\psi}_{d1\alpha} + \hat{\psi}_{d2\alpha} \\ \hat{\psi}_{d1\beta} + \hat{\psi}_{d2\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_{dm} \cos \theta + \psi_{dm} \cos(\theta + \theta_{spd}) \\ \psi_{dm} \sin \theta + \psi_{dm} \sin(\theta + \theta_{spd}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_{dm} \cos(\hat{\theta}_{et}) \\ \psi_{dm} \sin(\hat{\theta}_{et}) \end{bmatrix},$$

[0023] 其中, ψ_{dm} 为永磁体磁链幅值。

[0024] 进一步的, 上述永磁体磁链幅值 ψ_{dm} 的表达式如下:

$$[0025] \quad \psi_{dm} = \sqrt{\psi_{d1\alpha}^2 + \psi_{d1\beta}^2} = \sqrt{\psi_{d2\alpha}^2 + \psi_{d2\beta}^2}.$$

[0026] 进一步的, 上述五相电机同轴串联系统总输出转矩 T_e 为:

$$[0027] \quad T_e = \frac{5}{2} q \left\{ \psi_{dm} I_s \left[\cos \theta_x + \cos(\hat{\theta}_{spd} - \theta_x) \right] \right\},$$

[0028] 其中, q 为电机极对数, θ_x 为补偿角, 当输出转矩最大时 $\theta_x = \hat{\theta}_{spd}/2$ 。

[0029] 通过以上方法, 能够使五相电机的同轴串联驱动系统在输出更大功率的同时, 容错及可靠性也得到提升。具体的, 本发明的优势在于:

- [0030] 1) 在无位置辨识的情况下既可用于轴偏诊断又可进行轴偏补偿。
- [0031] 2) 通过重新定位电流矢量到最优轴偏补偿角,最大程度提高轴偏时系统的输出转矩,提高系统的转矩输出效率。
- [0032] 3) 解决两电机转矩输出不均问题,避免轴偏故障持续加剧,延长连接和传动轴的使寿命,也避免了轴偏严重故障时相反转矩引起的安全问题。
- [0033] 4) 降低了同轴装配难度,增加了同轴串联系统对轴偏故障的容错能力,即使在正负轴偏角30度以内,串联电机的转矩输出效率均在97%以上,使系统保持优良的运行性能。
- [0034] 综上所述,本发明提出一种五相电机同轴串联系统的轴偏补偿方法,能够提高轴偏故障时系统的转矩输出效率,解决轴偏引起的电机转矩不均问题,延长连接轴使用寿命。对系统的输出效率和可靠性提升有着重要意义。

附图说明

- [0035] 图1为五相电机同轴串联系统的结构图,其中,(a)表示机械结构,(b)表示电气结构;
- [0036] 图2为五相电机同轴串联系统FOC控制框图;
- [0037] 图3为归一化正交锁相环位置检测框图;
- [0038] 图4为两个五相电机的空间综合矢量轴偏示意图;
- [0039] 图5为轴偏补偿重定向电流的综合矢量示意图;
- [0040] 图6为最优补偿角选取示意图;
- [0041] 图7为五相电机同轴串联转矩输出效率最优轴偏补偿控制框图。

具体实施方式

[0042] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有作出创造性劳动的前提下所获得的所有其它实施例,都属于本发明保护的范围。需要说明的是,在不冲突的情况下,本发明中的实施例及实施例中的特征可以相互组合。

[0043] 具体实施方式一:由于五相电机同轴串联系统对同轴相位同步要求较高,但是轴偏问题又无法避免。为此,本实施所采用的方案中总共包含两大部分手段来应对:

[0044] 第一,对五相电机同轴串联系统进行轴偏角度检测,确定轴偏角大小;

[0045] 第二,根据轴偏角对串联系统进行轴偏补偿,提升系统转矩输出效率,解决两电机转矩输出不均问题。具体参照图1至7来说明本实施方式。

[0046] 图1为五相电机同轴串联系统的结构图。两个五相电机同轴连接,共享同一位置;两电机同相串联,单逆变器供电以减少驱动体积和成本,简化控制难度,基于FOC的控制策略如图2所示。五相电机同轴串联系统的变压方程为:

$$[0047] \quad U_s = (R_{s1} + R_{s2}) I_s + p(\psi_{s1} + \psi_{s2}),$$

[0048] 其中, U_s 为逆变器输出电压, R_{s1} 和 R_{s2} 分别为五相电机同轴串联系统中两个电机的内阻, ψ_{s1} 和 ψ_{s2} 分别为两个五相电机的基波磁链, $p[\]$ 表示微分函数。

[0049] 基于以上所述的五相电机同轴串联系统的轴偏补偿方法,包括以下步骤:

[0050] 步骤一:采用五相-两相静止变换阵将五相电机同轴串联系统在自然坐标系下的五相电流 I_s 变换为静止坐标系下的 α 和 β 轴电流 i_α 和 i_β :

$$[0051] \quad \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \cos(\alpha) & \cos(2\alpha) & \cos(3\alpha) & \cos(4\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \sin(2\alpha) & \sin(3\alpha) & \sin(4\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ i_e \end{bmatrix},$$

[0052] 其中, $\alpha=2\pi/5$, i_a 、 i_b 、 i_c 、 i_d 和 i_e 分别为五相电机a、b、c、d和e相电流。

[0053] 步骤二:利用磁链观测器对五相电机同轴串联系统进行观测,所述磁链观测器的表达式为:

$$[0054] \quad p \begin{bmatrix} \hat{\psi}_{s\alpha} \\ \hat{\psi}_{s\beta} \end{bmatrix} = p \begin{bmatrix} \hat{\psi}_{s1\alpha} + \hat{\psi}_{s2\alpha} \\ \hat{\psi}_{s1\beta} + \hat{\psi}_{s2\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_{s1} + R_{s2} & 0 \\ 0 & R_{s1} + R_{s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix},$$

[0055] 其中, R_{s1} 和 R_{s2} 分别为五相电机同轴串联系统中两个电机的内阻, u_α 和 u_β 分别为基波下 α 和 β 轴的电压, $p[\]$ 表示微分函数。

[0056] 获得基波下 α 和 β 轴的定子绕组磁链观测值 $\hat{\psi}_{s\alpha}$ 和 $\hat{\psi}_{s\beta}$ 。

[0057] 步骤三:通过下式计算五相电机同轴串联系统 α 和 β 轴的永磁磁链估计值:

$$[0058] \quad \begin{bmatrix} \hat{\psi}_{d1\alpha} + \hat{\psi}_{d2\alpha} \\ \hat{\psi}_{d1\beta} + \hat{\psi}_{d2\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\psi}_{s1\alpha} + \hat{\psi}_{s2\alpha} \\ \hat{\psi}_{s1\beta} + \hat{\psi}_{s2\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_{\alpha1} + L_{\alpha2} & 0 \\ 0 & L_{\beta1} + L_{\beta2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix},$$

[0059] 其中, $\hat{\psi}_{d1\alpha}$ 和 $\hat{\psi}_{d2\alpha}$ 分别为两个五相电机基波下 α 轴的永磁磁链估计值, $\hat{\psi}_{d1\beta}$ 和 $\hat{\psi}_{d2\beta}$ 分别为两个五相电机基波下 β 轴的永磁磁链估计值, $\hat{\psi}_{s1\alpha}$ 和 $\hat{\psi}_{s2\alpha}$ 分别为两个五相电机基波下 α 轴的定子绕组磁链观测值, $\hat{\psi}_{s1\beta}$ 和 $\hat{\psi}_{s2\beta}$ 分别为两个五相电机基波下 β 轴的定子绕组磁链观测值, $L_{\alpha1}$ 和 $L_{\alpha2}$ 分别为两个五相电机基波下 α 轴的电感, $L_{\beta1}$ 和 $L_{\beta2}$ 分别为两个五相电机基波下 β 轴的电感。

[0060] 步骤四:当五相电机同轴串联系统发生轴偏故障时,两个五相电机的空间运行状态均发生偏移,如图4所示。五相电机同轴串联系统中在电机1上设置传感器,获得一个五相电机的实际位置角 θ 。

[0061] 则根据五相电机永磁磁链与电机d轴重合的性质,如图3所示,采用归一化锁相环估算五相电机同轴串联系统磁链的估计位置角 $\hat{\theta}_{et}$:

$$[0062] \quad \begin{bmatrix} \hat{\psi}_{d1\alpha} + \hat{\psi}_{d2\alpha} \\ \hat{\psi}_{d1\beta} + \hat{\psi}_{d2\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_{dm} \cos \theta + \psi_{dm} \cos(\theta + \theta_{spd}) \\ \psi_{dm} \sin \theta + \psi_{dm} \sin(\theta + \theta_{spd}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_{dm} \cos(\hat{\theta}_{et}) \\ \psi_{dm} \sin(\hat{\theta}_{et}) \end{bmatrix},$$

[0063] 其中, ψ_{dm} 为永磁体磁链幅值, $\psi_{dm} = \sqrt{\psi_{d1\alpha}^2 + \psi_{d1\beta}^2} = \sqrt{\psi_{d2\alpha}^2 + \psi_{d2\beta}^2}$ 。

[0064] 步骤五:根据五相电机同轴串联系统磁链的估计位置角 $\hat{\theta}_{et}$ 和一个五相电机的实际位置角 θ 计算轴偏角的估计值 $\hat{\theta}_{spd}$:

$$[0065] \quad \hat{\theta}_{spd} = \arctan \left[\frac{2 \tan(\hat{\theta}_{et} - \theta)}{1 - \tan(\hat{\theta}_{et} - \theta)^2} \right].$$

[0066] 至此,完成了五相电机同轴串联系统进行轴偏角度检测,此时,轴偏故障使电机2的位置角度为 $\theta + \hat{\theta}_{spd}$ 。接下来对五相电机同轴串联系统的轴偏进行补偿。

[0067] 步骤六:如图5所示,调整五相电流 I_s 使得五相电机同轴串联系统磁链的位置角 θ_{sys} 符合下式:

$$[0068] \quad \theta_{sys} = \theta + \frac{\hat{\theta}_{spd}}{2},$$

[0069] 使得五相电机同轴串联系统输出转矩最大,完成轴偏补偿。

[0070] 此时,五相电机同轴串联系统总输出转矩 T_e 为:

$$[0071] \quad T_e = \frac{5}{2} q \left\{ \psi_{dm} I_s \left[\cos \theta_x + \cos(\hat{\theta}_{spd} - \theta_x) \right] \right\},$$

[0072] 其中, q 为电机极对数, θ_x 为补偿角,当输出转矩最大时 $\theta_x = \hat{\theta}_{spd} / 2$, ψ_{dm} 为永磁体磁链幅值。

[0073] 两个五相电机的输出转矩相等:

$$[0074] \quad T_{e1} = T_{e2} = \frac{5}{2} q \left[\psi_{dm} I_s \cos(\hat{\theta}_{spd} / 2) \right].$$

[0075] 因此将系统综合电流矢量 I_s 重新定向到轴偏最优补偿角位置 θ_{sys} ,可提升系统的输出转矩,使两电机的输出转矩相等。实现五相电机同轴串联系统轴偏补偿控制方法,其整体控制框如图7所示。

[0076] 在本实施方式中,若五相电机同轴串联系统仅在一台电机机上安装了位置传感器,则轴偏补偿需要对轴偏角度进行估计,然后对系统进行如上轴偏补偿。但当同轴系统两电机各安装了一个位置传感器时,轴偏补偿控制方法则不需要对轴偏角进行估计,可直接得到轴偏最优补偿角为 $\frac{\theta + \theta_2}{2}$ (θ_2 为电机2的位置角),实现轴偏补偿控制方法。

[0077] 虽然在本文中参照了特定的实施方式来描述本发明,但是应该理解的是,这些实施例仅仅是本发明的原理和应用的示例。因此应该理解的是,可以对示例性的实施例进行许多修改,并且可以设计出其他的布置,只要不偏离所附权利要求所限定的本发明的精神和范围。应该理解的是,可以通过不同于原始权利要求所描述的方式来结合不同的从属权利要求和本文中所述的特征。还可以理解的是,结合单独实施例所描述的特征可以使用在其它所述实施例中。

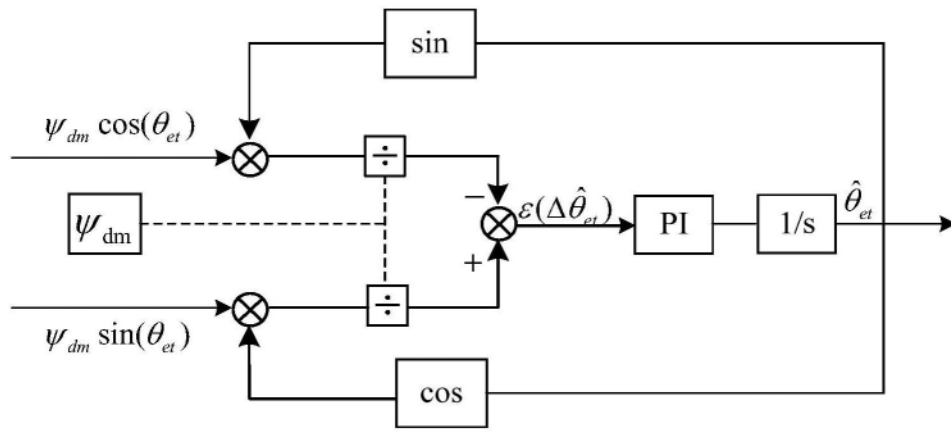


图3

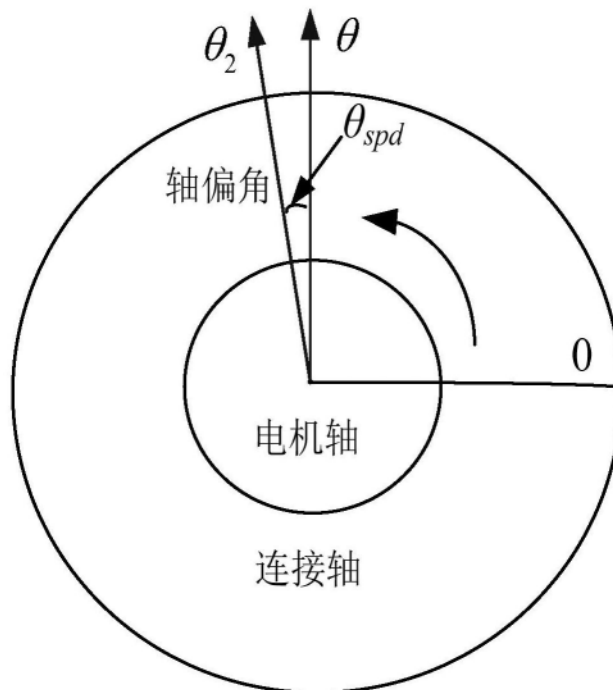


图4

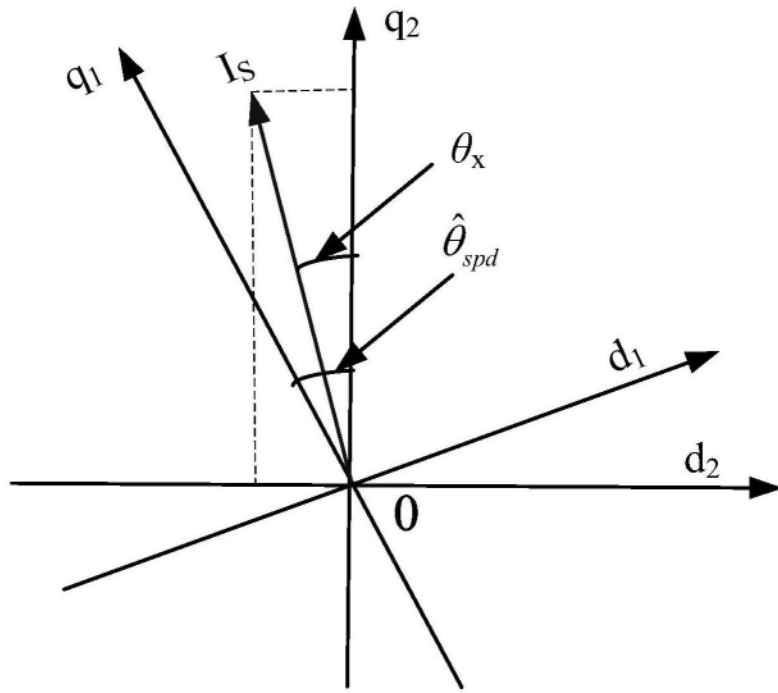


图5

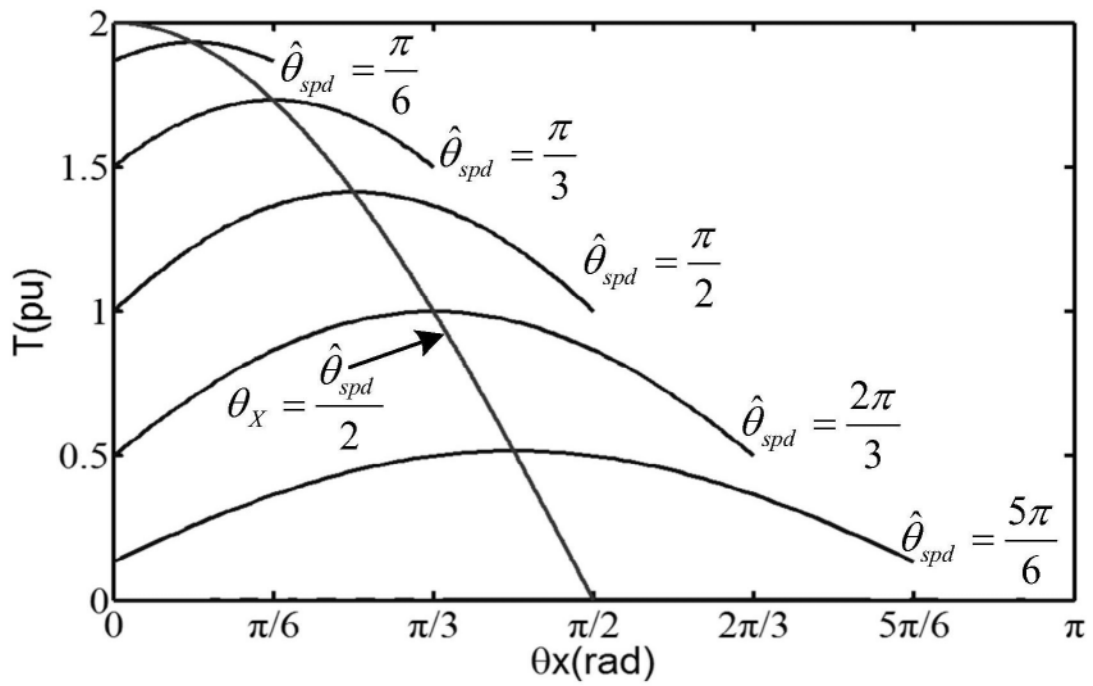


图6

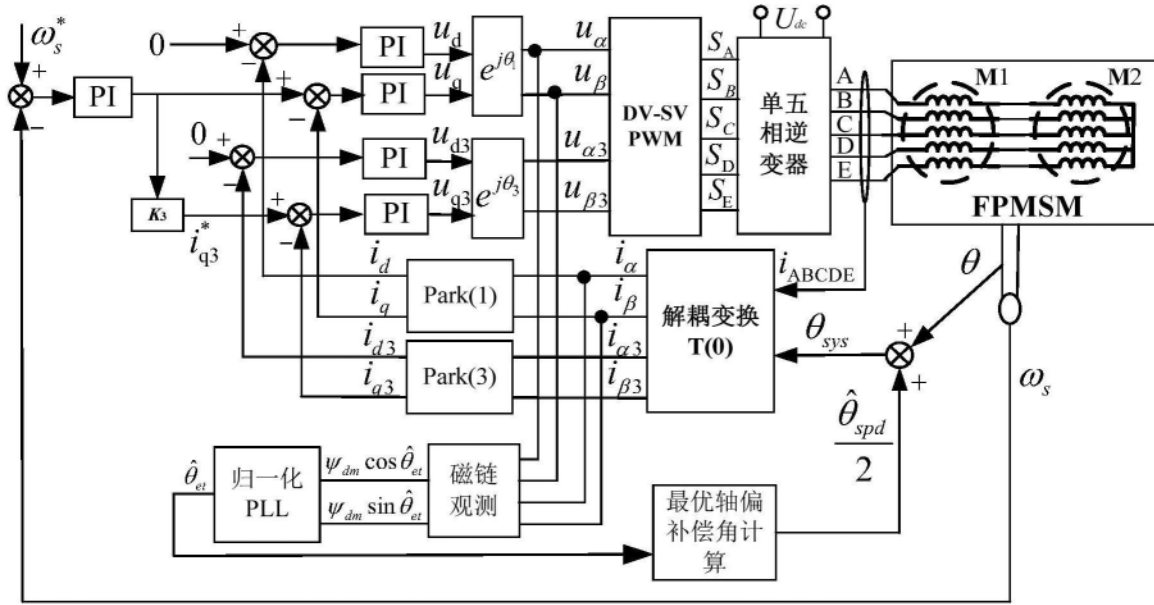


图7