



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 109586651 B

(45) 授权公告日 2021.02.26

(21) 申请号 201811380508.3

(22) 申请日 2018.11.20

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 109586651 A

(43) 申请公布日 2019.04.05

(73) 专利权人 上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司

地址 200063 上海市普陀区武宁路505号7号楼206室

专利权人 上海电科电机科技有限公司
上海电器科学研究所(集团)有限公司

(72) 发明人 王建辉 姚丙雷 韦福东 顾卫东

(74) 专利代理机构 上海申汇专利代理有限公司
31001

代理人 翁若莹 柏子冀

(51) Int.Cl.

H02P 29/60 (2016.01)

审查员 邓一辰

权利要求书3页 说明书6页

(54) 发明名称

一种永磁同步电机转子永磁体温度的在线监测方法

(57) 摘要

现有的永磁同步电机的转子温度检测方法中假设定子和转子温度相等与实际定子和转子有一定温差的原理和实际均不符,从而现有方法测量的转子温度不准确。为了解决上述技术问题,本发明公开了一种永磁同步电机转子永磁体温度的在线监测方法,其用于对运行的永磁同步电机的转子永磁体温度进行在线监测,以避免配置温度传感器对电机转子永磁温度监测带来的成本增加和可靠性降低。

1. 一种永磁同步电机转子永磁体温度的在线监测方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1、根据永磁体材料固有的剩余磁感应强度温度系数 K_{br} 、常温 t_0 时永磁体的剩余磁感应强度 B_{r0} 和矫顽力 H_{c0} ,得到永磁体在温度 t_1 下的剩余磁感应强度 $B_r(t_1)$ 和矫顽力 $H_c(t_1)$:

$$B_r(t_1) = [1 - (t_1 - t_0) K_{br}] \cdot B_{r0};$$

$$H_c(t_1) = [1 - (t_1 - t_0) K_{br}] \cdot H_{c0};$$

其中,剩余磁感应强度温度系数 K_{br} 为永磁体温度每升高 1°C 时剩余磁感应强度降低的比例;

步骤2、建立包含由 $B_r(t_1)$ 、 $H_c(t_1)$ 确定特性的永磁体材料的电磁计算模型,依据该电磁计算模型计算得到包含该永磁体材料的永磁同步电机在额定转速下的X相的空载反电势基波幅值 $E_0(t_1)$,从而得到温度 t_1 和空载反电势基波幅值 $E_0(t_1)$ 的关系,其中,X相为电机U、V、W相中的任一确定相;

步骤3、根据永磁体材料固有的剩余磁感应强度温度系数 K_{br} 、常温 t_0 时永磁体的剩余磁感应强度 B_{r0} 和矫顽力 H_{c0} ,得到永磁体在温度 t_2 下的剩余磁感应强度 $B_r(t_2)$ 和矫顽力 $H_c(t_2)$:

$$B_r(t_2) = [1 - (t_2 - t_0) K_{br}] \cdot B_{r0};$$

$$H_c(t_2) = [1 - (t_2 - t_0) K_{br}] \cdot H_{c0};$$

步骤4、建立包含由 $B_r(t_2)$ 、 $H_c(t_2)$ 确定特性的永磁体材料的电磁计算模型,利用该电磁计算模型计算得到包含该永磁体材料的永磁同步电机在额定转速下X相的空载反电势基波幅值 $E_0(t_2)$,从而得到温度 t_2 和空载反电势基波幅值 $E_0(t_2)$ 的关系;

步骤5、计算得到系数 K_E :

$$K_E = \frac{E_0(t_1) - E_0(t_2)}{t_2 - t_1};$$

步骤6、在永磁同步电机完全冷态下,测量并记录当前的环境温度,并将当前环境温度作为温度 t_3 ,将所述永磁同步电机空载拖动至额定转速,迅速测量永磁同步电机的反电势 $E_0(t_3)$ 的波形,并获得该波形的X相电压基波幅值 $E(t_3)$ 和相角 $a(t_3)$;

波形测量并记录的起始零点为转子位置传感器获取的转子经过某一确定的空间位置点的时刻,转子位置传感器采用霍尔位置传感器或光电编码式位置传感器或旋转变压器位置传感器;

步骤7、在永磁同步电机完全冷态下,测量并记录定子绕组线电阻,再根据绕组型式计算相电阻 $R_1(t_3)$;

步骤8、永磁同步电机运行于额定负载状态,即电机运行在额定电压、额定转速和额定负载转矩下,在线实时测量永磁同步电机的输入电压 $U_1(t_4)$ 、输入电流 $I_1(t_4)$ 的波形和定子实时温度 t_4 ,则有:

在温度 t_4 下的X相相电阻为 $R_1(t_4)$: $R_1(t_4) = (1 + K_c(t_4 - t_3)) R_1(t_3)$,式中, K_c 为绕组导线的温度系数;

波形测量并记录的起始零点为转子位置传感器获取的转子经过步骤6相同的空间位置点的时刻,转子位置传感器采用步骤6相同位置传感器;

在温度 t_4 下的X相相电势波形为 $E_1(t_4)$: $E_1(t_4) = U_1(t_4) - I_1(t_4) R_1(t_4)$;

把X相相电势波形 $E_1(t_4)$ 通过傅里叶变换得到X相电压基波幅值 $E(t_4)$ 和相角 $a(t_4)$,X相电流基波幅值 $I(t_4)$ 和相角 $b(t_4)$;

计算得到X相电压的功率角 $a_1(t_4)$,即电压超前于q轴的夹角:

$$a_1(t_4) = a(t_4) - a(t_3);$$

计算得到X相电流的内功率因数角 $b_1(t_4)$,即电流超前于q轴的夹角:

$$b_1(t_4) = b(t_4) - a(t_3);$$

步骤9、将永磁同步电机的输入电压改变为额定电压的0.9~1.1倍范围内的某一值且不同于额定电压值,保持额定转速和额定负载,在线实时测量其输入电压 $U_1(t_5)$ 、输入电流 $I_1(t_5)$ 的波形和定子实时温度 t_5 ,通过下面公式计算得到温度 t_5 下的X相相电阻 $R_1(t_5)$:

$$R_1(t_5) = (1 + K_c(t_5 - t_3)) R_1(t_3);$$

波形测量并记录的起始零点为转子位置传感器获取的转子经过步骤6相同的空间位置点的时刻,转子位置传感器采用步骤6相同位置传感器;

计算得到温度 t_5 下的X相相电势波形 $E_1(t_5)$:

$$E_1(t_5) = U_1(t_5) - I_1(t_5) R_1(t_5);$$

X相相电势波形 $E_1(t_5)$ 通过傅里叶变换得到X相电压基波幅值 $E(t_5)$ 和相角 $a(t_5)$,X相电流基波幅值 $I(t_5)$ 和相角 $b(t_5)$;

计算得到X相电压的功率角 $a_1(t_5)$,即电压超前于q轴的夹角:

$$a_1(t_5) = a(t_5) - a(t_3);$$

计算得到X相电流的内功率因数角 $b_1(t_5)$,即电流超前于q轴的夹角:

$$b_1(t_5) = b(t_5) - a(t_3);$$

步骤10、通过下式计算得到直轴同步电抗 X_d :

$X_d = A_1/A_2$,式中:

$$A_1 = E(t_4) \cos(a_1(t_4)) - E(t_5) \cos(a_1(t_5));$$

$$A_2 = I(t_5) \sin(b_1(t_5)) - I(t_4) \sin(b_1(t_4));$$

步骤11、永磁同步电机实时运行时,在线实时测量其输入电压 $E_1(t_6)$ 、输入电流 $I_1(t_6)$ 的波形和定子实时温度 t_6 ,通过下面公式计算得到X相相电阻 $R_1(t_6)$:

$$R_1(t_6) = (1 + K_c(t_6 - t_3)) R_1(t_3);$$

波形测量并记录的起始零点为转子位置传感器获取的转子经过步骤6相同的空间位置点的时刻,转子位置传感器采用步骤6相同位置传感器;

计算得到X相相电势波形 $E_1(t_6)$:

$$E_1(t_6) = U_1(t_6) - I_1(t_6) R(t_6);$$

X相相电势波形 $E_1(t_6)$ 通过傅里叶变换得到X相电压基波幅值 $E(t_6)$ 和相角 $a(t_6)$,X相电流基波幅值 $I(t_6)$ 和相角 $b(t_6)$;

计算得到X相电压的功率角 $a_1(t_6)$,即电压超前于q轴的夹角:

$$a_1(t_6) = a(t_6) - a(t_3);$$

计算得到X相电流的内功率因数角 $b_1(t_6)$,即电流超前于q轴的夹角:

$$b_1(t_6) = b(t_6) - a(t_3);$$

计算得到其负载时的励磁电动势 $E_0(t_6)$:

$$E_0(t_6) = E(t_6) \cos(a_1(t_6)) + I(t_6) \sin(a_1(t_6)) X_d;$$

计算得到转子永磁体上的温度 t_6 :

$$t_6 = \frac{E(t_3) - E_0(t_6)}{K_E} + t_3。$$

2. 如权利要求1所述的一种永磁同步电机转子永磁体温度的在线监测方法,其特征在于,步骤1及步骤3中,常温 t_0 为永磁体出厂时给出的磁性能测定温度值,为15℃或20℃或23℃或25℃。

3. 如权利要求1所述的一种永磁同步电机转子永磁体温度的在线监测方法,其特征在于,步骤1中,温度 t_1 取为电机测试时的环境温度或环境温度上下偏移20%范围内的温度值;

步骤3中,温度 t_2 取为电机额定负载试验时的定子绕组温度或定子绕组温度上下偏移20%范围内的温度值,且 t_2 不等于 t_1 。

4. 如权利要求1所述的一种永磁同步电机转子永磁体温度的在线监测方法,其特征在于,步骤7中,若定子绕组为星型接法,则所述相电阻 $R_1(t_3)$ 为绕组线线电阻的一半;若定子绕组为三角形接法,则所述相电阻 $R_1(t_3)$ 为绕组线线电阻的1.5倍。

5. 如权利要求1所述的一种永磁同步电机转子永磁体温度的在线监测方法,其特征在于,步骤8中,若绕组为铜线,则 $K_c \approx 0.004^\circ\text{C}^{-1}$ 。

6. 如权利要求1所述的一种永磁同步电机转子永磁体温度的在线监测方法,其特征在于,步骤2及步骤4中,所述电磁计算模型为有限元电磁场计算模型。

7. 如权利要求1所述的一种永磁同步电机转子永磁体温度的在线监测方法,其特征在于,步骤2及步骤4中,所述电磁计算模型为基于等效电路和等效磁路模型的电机设计计算程序。

一种永磁同步电机转子永磁体温度的在线监测方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种永磁同步电机的转子永磁体温度检测方法,属于电机技术领域。

背景技术

[0002] 永磁同步电动机转子采用永磁体励磁。铝镍钴、铁氧体、钕铁硼等永磁体的剩余磁感应强度和矫顽力随着温度的提高而减小。这种由于温度升高而导致的磁性能的损失可以分为可逆损失和不可逆损失。可逆损失随着温度降低到原来的值,其剩余磁感应强度和矫顽力也会恢复到原来的值。不可逆损失则指温度恢复后磁性能不能恢复到原有值的部分,其又可以分为不可恢复损失和可恢复损失。不可恢复损失是指永磁体重新充磁也不能复原的损失,可恢复损失是指永磁体重新充磁后能复原的损失。永磁体的温度特性还可以用居里温度和最高工作温度来表示。在工作温度之下的一定温度范围内,通过稳磁处理后,当永磁体工作在该温度下线性的回复线上时,其工作点的磁感应强度和温度是可逆的近似线性关系,即温度升高,磁感应强度降低;温度降低,磁感应强度升高;温度升高的比例和磁感应强度降低的比例之间是近似的线性关系。当温度升高到一定值,上述的这种近似的线性关系会破坏,并产生不可逆的磁感应强度损失,继而永久性地使电机性能发生改变。由于转子温度的变化是永磁体性能变化的原因,因此有必要了解转子上永磁体的温度。

[0003] 永磁同步电机转子温度升高主要由定子发热通过气隙传到转子以及转子自身的发热所引起。转子发热源主要是转子铁芯损耗和永磁体上的涡流损耗。由于转子位于定子内部,转子的温度有可能会高于定子。定子温度可以通过埋置在定子上的温度传感器或者通过电阻法测量。因为转子的旋转,转子温度很难通过普通的传感器测量,而是需要电刷引出或者能够无线传输信号的变送器来测量。在大部分的应用场合,这种测量是不经济的和不现实的。

[0004] 发明专利(CN104158463B)提出了一种永磁同步电机的转子温度检测方法和系统,通过获取定子的电流和电压以及温度特性方程计算得到转子温度。该方法在获取温度特性方程时假设整台电机为等温体,即定子和转子为相同温度。该假设与实际定子和转子温度有一定温差的原理和实际均不符,从而该方法具有测量的转子温度不准确。

发明内容

[0005] 本发明的目的是:提供一种对运行的永磁同步电机的转子永磁体温度进行在线监测的方法,以避免配置旋转部件上的温度传感器对电机转子永磁体温度监测带来的成本增加和可靠性降低。

[0006] 为了达到上述目的,本发明的技术方案是提供了一种永磁同步电机转子永磁体温度的在线监测方法,其特征在于,包括以下步骤:

[0007] 步骤1、根据永磁体材料固有的剩余磁感应强度温度系数 K_{br} 、常温 t_0 时永磁的剩余磁感应强度 B_{r0} 和矫顽力 H_{c0} ,得到永磁体在温度 t_1 下的剩余磁感应强度 $B_r(t_1)$ 和矫顽力 $H_c(t_1)$:

[0008] $B_r(t_1) = [1 - (t_1 - t_0) K_{br}] \cdot B_{r0}$;

[0009] $H_c(t_1) = [1 - (t_1 - t_0) K_{br}] \cdot H_{c0}$;

[0010] 其中,剩余磁感应强度温度系数 K_{br} 为永磁体温度每升高 1°C 时剩余磁感应强度降低的比例。

[0011] 步骤2、建立包含由 $B_r(t_1)$ 、 $H_c(t_1)$ 确定特性的永磁体材料的电磁计算模型,依据该电磁计算模型计算得到包含该永磁材料的永磁同步电机在额定转速下的X相的空载反电势基波幅值 $E_0(t_1)$,从而得到温度 t_1 和空载反电势基波幅值 $E_0(t_1)$ 的关系,其中,X相为电机U、V、W相中的任一确定相;

[0012] 步骤3、根据永磁体材料固有的剩余磁感应强度温度系数 K_{br} 、常温 t_0 时永磁的剩余磁感应强度 B_{r0} 和矫顽力 H_{c0} ,得到永磁体在温度 t_2 下的剩余磁感应强度 $B_r(t_2)$ 和矫顽力 $H_c(t_2)$;

[0013] $B_r(t_2) = [1 - (t_2 - t_0) K_{br}] \cdot B_{r0}$;

[0014] $H_c(t_2) = [1 - (t_2 - t_0) K_{br}] \cdot H_{c0}$;

[0015] 步骤4、建立包含由 $B_r(t_2)$ 、 $H_c(t_2)$ 确定特性的永磁体材料的电磁计算模型,利用该电磁计算模型计算得到包含该永磁材料的永磁同步电机在额定转速下X相的空载反电势基波幅值 $E_0(t_2)$,从而得到温度 t_2 和空载反电势 $E_0(t_2)$ 的关系;

[0016] 步骤5、计算得到系数 K_E :

[0017]
$$K_E = \frac{E_0(t_1) - E_0(t_2)}{t_2 - t_1}$$
;

[0018] 步骤6、在永磁同步电机完全冷态下,测量并记录当前的环境温度,并将当前环境温度作为温度 t_3 ,将所述永磁同步电机空载拖动至额定转速,迅速测量永磁同步电机的反电势 $E_0(t_3)$ 的波形,并获得该波形的X相电压基波幅值 $E(t_3)$ 和相角 $a(t_3)$;

[0019] 波形测量并记录的起始零点为转子位置传感器获取的转子经过某一确定的空间位置点的时刻;

[0020] 步骤7、在永磁同步电机完全冷态下,测量并记录定子绕组线电阻,再根据绕组型式计算相电阻 $R_1(t_3)$;

[0021] 步骤8、永磁同步电动机运行于额定负载状态,即电机运行在额定电压、额定转速和额定负载转矩下,在线实时测量永磁同步电动机的输入电压 $U_1(t_4)$ 、输入电流 $I_1(t_4)$ 的波形和定子实时温度 t_4 ,则有:

[0022] 在温度 t_4 下的X相相电阻为 $R_1(t_4)$: $R_1(t_4) = (1 + K_c(t_4 - t_3)) R_1(t_3)$,式中, K_c 为绕组导线的温度系数;

[0023] 波形测量并记录的起始零点为转子位置传感器获取的转子经过步骤6相同的空间位置点的时刻;

[0024] 在温度 t_4 下的X相相电势波形为 $E_1(t_4)$: $E_1(t_4) = U_1(t_4) - I_1(t_4) R_1(t_4)$;

[0025] 把X相相电势波形 $E_1(t_4)$ 通过傅里叶变换得到X相电压基波幅值 $E(t_4)$ 和相角 $a(t_4)$,X相电流基波幅值 $I(t_4)$ 和相角 $b(t_4)$;

[0026] 计算得到X相电压的功率角 $a_1(t_4)$,即电压超前于q轴的夹角;

[0027] $a_1(t_4) = a(t_4) - a(t_3)$;

[0028] 计算得到X相电流的内功率因数角 $b_1(t_4)$,即电流超前于q轴的夹角;

[0029] $b_1(t_4) = b(t_4) - a(t_3)$;

[0030] 步骤9、将永磁同步电机的输入电压改变为额定电压的0.9~1.1倍范围内的某一值且不同于额定电压值,保持额定转速和额定转矩负载,在线实时测量其输入电压 $U_1(t_5)$ 、输入电流 $I_1(t_5)$ 的波形和定子实时温度 t_5 ,通过下面公式计算得到温度 t_5 下的X相相电阻 $R_1(t_5)$:

[0031] $R_1(t_5) = (1 + K_c(t_5 - t_3)) R_1(t_3)$;

[0032] 波形测量并记录的起始零点为转子位置传感器获取的转子经过步骤6相同的空间位置点的时刻;

[0033] 计算得到温度 t_5 下的X相相电势波形 $E_1(t_5)$:

[0034] $E_1(t_5) = U_1(t_5) - I_1(t_5) R_1(t_5)$;

[0035] X相相电势波形 $E_1(t_5)$ 通过傅里叶变换得到X相电压基波幅值 $E(t_5)$ 和相角 $a(t_5)$,X相电流基波幅值 $I(t_5)$ 和相角 $b(t_5)$;

[0036] 计算得到X相电压的功率角 $a_1(t_5)$,即电压超前于q轴的夹角:

[0037] $a_1(t_5) = a(t_5) - a(t_3)$;

[0038] 计算得到X相电流的内功率因数角 $b_1(t_5)$,即电流超前于q轴的夹角:

[0039] $b_1(t_5) = b(t_5) - a(t_3)$;

[0040] 步骤10、通过下式计算得到直轴同步电抗 X_d :

[0041] $X_d = A_1 / A_2$,式中:

[0042] $A_1 = E(t_5) \cos(a_1(t_4)) - E(t_4) \cos(a_1(t_5))$;

[0043] $A_2 = I(t_5) \sin(b_1(t_5)) - I(t_4) \sin(b_1(t_4))$;

[0044] 步骤11、永磁同步电动机实时运行时,在线实时测量其输入电压 $E_1(t_6)$ 、输入电流 $I_1(t_6)$ 的波形和定子实时温度 t_6 ,通过下面公式计算得到X相相电阻 $R_1(t_6)$:

[0045] $R_1(t_6) = (1 + K_c(t_6 - t_3)) R_1(t_3)$;

[0046] 波形测量并记录的起始零点为转子位置传感器获取的转子经过步骤6相同的空间位置点的时刻;

[0047] 计算得到X相相电势波形 $E_1(t_6)$:

[0048] $E_1(t_6) = U_1(t_6) - I_1(t_6) R(t_6)$;

[0049] X相相电势波形 $E_1(t_6)$ 通过傅里叶变换得到X相电压基波幅值 $E(t_6)$ 和相角 $a(t_6)$,X相电流基波幅值 $I(t_6)$ 和相角 $b(t_6)$;

[0050] 计算得到X相电压的功率角 $a_1(t_6)$,即电压超前于q轴的夹角:

[0051] $a_1(t_6) = a(t_6) - a(t_3)$;

[0052] 计算得到X相电流的内功率因数角 $b_1(t_6)$,即电流超前于q轴的夹角:

[0053] $b_1(t_6) = b(t_6) - a(t_3)$;

[0054] 计算得到其负载时的励磁电动势 $E_0(t_6)$:

[0055] $E_0(t_6) = E(t_6) \cos(a_1(t_6)) + I(t_6) \sin(a_1(t_6)) X_d$;

[0056] 计算得到转子永磁体上的温度 t_6 :

[0057] $t_6 = \frac{E(t_3) - E_0(t_6)}{K_E} + t_3$ 。

[0058] 优选地,步骤1及步骤3中,常温 t_0 为永磁体出厂时给出的磁性能测定温度值,为15

℃或20℃或23℃或25℃。

[0059] 优选地,步骤1中,温度 t_1 取为电机测试时的环境温度或环境温度上下偏移20%范围内的温度值;

[0060] 步骤3中,温度 t_2 取为电机额定负载试验时的定子绕组温度或定子绕组温度上下偏移20%范围内的温度值,且 t_2 不等于 t_1 。

[0061] 优选地,步骤7中,若定子绕组为星型接法,则所述相电阻 $R_1(t_3)$ 为线线电阻的一半;若定子绕组为三角形接法,则所述相电阻 $R_1(t_3)$ 为线线电阻的1.5倍。

[0062] 优选地,步骤8中,若绕组为铜线,则 $K_c \approx 0.004^\circ\text{C}^{-1}$ 。

[0063] 优选地,步骤2及步骤4中,所述电磁计算模型为有限元电磁场计算模型。

[0064] 优选地,步骤2及步骤4中,所述电磁计算模型为基于等效电路和等效磁路模型的电机设计计算程序。

[0065] 优选地,步骤6及步骤8及步骤9及步骤11中的转子位置传感器采用霍尔位置传感器或光电编码式位置传感器或旋转变压器位置传感器。

[0066] 本发明提供一种永磁同步电机的转子永磁体温度在线监测方法,用于对运行的永磁同步电机的转子永磁体温度进行在线监测,以避免配置温度传感器对电机转子永磁温度监测带来的成本增加和可靠性降低。

具体实施方式

[0067] 下面结合具体实施例,进一步阐述本发明。应理解,这些实施例仅用于说明本发明而不适用于限制本发明的范围。此外应理解,在阅读了本发明讲授的内容之后,本领域技术人员可以对本发明作各种改动或修改,这些等价形式同样落于本申请所附权利要求书所限定的范围。

[0068] 本发明提供一种永磁同步电机转子永磁体温度的在线监测方法包括以下步骤:

[0069] 步骤1、根据永磁体材料固有的剩余磁感应强度温度系数 K_{br} 、常温20℃时永磁的剩余磁感应强度 B_{r20} 和矫顽力 H_{c20} ,得到永磁体在温度 t_1 下的剩余磁感应强度 $B_r(t_1)$ 和矫顽力 $H_c(t_1)$:

$$[0070] \quad B_r(t_1) = [1 - (t_1 - 20) K_{br}] \cdot B_{r20};$$

$$[0071] \quad H_c(t_1) = [1 - (t_1 - 20) K_{br}] \cdot H_{c20};$$

[0072] 其中,剩余磁感应强度温度系数 K_{br} 为永磁体温度每升高1℃时剩余磁感应强度降低的比例;温度 t_1 取为电机测试时的环境温度或环境温度上下偏移20%范围内的温度值;

[0073] 步骤2、建立包含由 $B_r(t_1)$ 、 $H_c(t_1)$ 确定特性的永磁体材料的电磁计算模型(电磁计算模型为有限元电磁场计算模型,为基于等效电路和等效磁路模型的电机设计计算程序,下同),依据该电磁计算模型计算并采用傅里叶变换得到包含该永磁材料的永磁同步电机在额定转速下的X相的空载反电势基波幅值 $E_0(t_1)$,从而得到温度 t_1 和空载反电势 $E_0(t_1)$ 的关系,其中,X相为电机U、V、W相中的任一确定相;

[0074] 步骤3、根据永磁体材料固有的剩余磁感应强度温度系数 K_{br} 、20℃时永磁的剩余磁感应强度 B_{r20} 和矫顽力 H_{c20} ,得到永磁体在温度 t_2 下的剩余磁感应强度 $B_r(t_2)$ 和矫顽力 $H_c(t_2)$:

$$[0075] \quad B_r(t_2) = [1 - (t_2 - 20) K_{br}] \cdot B_{r20};$$

[0076] $H_c(t_2) = [1 - (t_2 - 20) K_{br}] \cdot H_{c20}$;

[0077] 温度 t_2 取为电机额定负载试验时的定子绕组温度或定子绕组温度上下偏移20%范围内的温度值,且 t_2 不等于 t_1 ;

[0078] 步骤4、建立包含由 $B_r(t_2)$ 、 $H_c(t_2)$ 确定特性的永磁体材料的电磁计算模型,利用该电磁计算模型计算得到包含该永磁材料的永磁同步电机在额定转速下X相的空载反电势基波幅值 $E_0(t_2)$,从而得到温度 t_2 和空载反电势 $E_0(t_2)$ 的关系;

[0079] 步骤5、计算得到系数 K_E :

$$[0080] \quad K_E = \frac{E_0(t_1) - E_0(t_2)}{t_2 - t_1};$$

[0081] 步骤6、在永磁同步电机完全冷态下,测量并记录当前的环境温度,并将当前环境温度作为温度 t_3 ,将所述永磁同步电机空载拖动至额定转速,迅速测量永磁同步电机的反电势 $E_0(t_3)$ 的波形,并获得该波形的X相电压基波幅值 $E(t_3)$ 和相角 $a(t_3)$;

[0082] 波形测量并记录的起始零点为转子位置传感器获取的转子经过某一确定的空间位置点的时刻,转子位置传感器采用霍尔位置传感器或光电编码式位置传感器或旋转变压器位置传感器。

[0083] 步骤7、在永磁同步电机完全冷态下,测量并记录定子绕组线电阻,再根据绕组型式计算相电阻 $R_1(t_3)$,若定子绕组为星型接法,则所述相电阻 $R_1(t_3)$ 为线电阻的一半;若定子绕组为三角形接法,则所述相电阻 $R_1(t_3)$ 为线电阻的1.5倍;

[0084] 步骤8、永磁同步电动机运行于额定负载状态,即电机运行在额定电压、额定转速和额定负载转矩下,在线实时测量永磁同步电动机的输入电压 $U_1(t_4)$ 、输入电流 $I_1(t_4)$ 的波形和定子实时温度 t_4 ,则有:

[0085] 在温度 t_4 下的X相相电阻为 $R_1(t_4)$: $R_1(t_4) = (1 + K_{cu}(t_4 - t_3)) R_1(t_3)$,式中, K_{cu} 为铜线的温度系数, $K_{cu} \approx 0.004^\circ\text{C}^{-1}$;

[0086] 波形测量并记录的起始零点为转子位置传感器获取的转子经过步骤6相同的空间位置点的时刻,转子位置传感器采用步骤6相同位置传感器。

[0087] 在温度 t_4 下的X相相电势波形为 $E_1(t_4)$: $E_1(t_4) = U_1(t_4) - I_1(t_4) R_1(t_4)$;

[0088] 把X相相电势波形 $E_1(t_4)$ 通过傅里叶变换得到X相电压基波幅值 $E(t_4)$ 和相角 $a(t_4)$,X相电流基波幅值 $I(t_4)$ 和相角 $b(t_4)$;

[0089] 计算得到X相电压的功率角 $a_1(t_4)$,即电压超前于q轴的夹角:

$$[0090] \quad a_1(t_4) = a(t_4) - a(t_3);$$

[0091] 计算得到X相电流的内功率因数角 $b_1(t_4)$,即电流超前于q轴的夹角:

$$[0092] \quad b_1(t_4) = b(t_4) - a(t_3);$$

[0093] 步骤9、将永磁同步电机的输入电压改变为额定电压的0.9~1.1倍范围内的某一值且不同于额定电压值,保持额定转速和额定转矩负载,在线实时测量其输入电压 $U_1(t_5)$ 、输入电流 $I_1(t_5)$ 的波形和定子实时温度 t_5 ,通过下面公式计算得到温度 t_5 下的X相相电阻 $R_1(t_5)$:

$$[0094] \quad R_1(t_5) = (1 + K_{cu}(t_5 - t_3)) R_1(t_3);$$

[0095] 波形测量并记录的起始零点为转子位置传感器获取的转子经过步骤6相同的空间位置点的时刻,转子位置传感器采用步骤6相同位置传感器。

- [0096] 计算得到温度 t_5 下的X相相电势波形 $E_1(t_5)$ ：
- [0097] $E_1(t_5) = U_1(t_5) - I_1(t_5)R_1(t_5)$ ；
- [0098] X相相电势波形 $E_1(t_5)$ 通过傅里叶变换得到X相电压基波幅值 $E(t_5)$ 和相角 $a(t_5)$ ，X相电流基波幅值 $I(t_5)$ 和相角 $b(t_5)$ ；
- [0099] 计算得到X相电压的功率角 $a_1(t_5)$ ，即电压超前于q轴的夹角：
- [0100] $a_1(t_5) = a(t_5) - a(t_3)$ ；
- [0101] 计算得到X相电流的内功率因数角 $b_1(t_5)$ ，即电流超前于q轴的夹角：
- [0102] $b_1(t_5) = b(t_5) - a(t_3)$ ；
- [0103] 步骤10、通过下式计算得到直轴同步电抗 X_d ：
- [0104] $X_d = A_1/A_2$ ，式中：
- [0105] $A_1 = E(t_5) \cos(a_1(t_4)) - E(t_4) \cos(a_1(t_5))$ ；
- [0106] $A_2 = I(t_5) \sin(b_1(t_5)) - I(t_4) \sin(b_1(t_4))$ ；
- [0107] 步骤11、永磁同步电动机实时运行时，测量其在线实时测量其输入电压 $E_1(t_6)$ 、输入电流 $I_1(t_6)$ 的波形和定子实时温度 t_6 ，通过下面公式计算得到X相相电阻 $R_1(t_6)$ ：
- [0108] $R_1(t_6) = (1 + K_{cu}(t_6 - t_3))R_1(t_3)$ ；
- [0109] 波形测量并记录的起始零点为转子位置传感器获取的转子经过步骤6相同的空间位置点的时刻，转子位置传感器采用步骤6相同位置传感器。
- [0110] 计算得到X相相电势波形 $E_1(t_6)$ ：
- [0111] $E_1(t_6) = U_1(t_6) - I_1(t_6)R(t_6)$ ；
- [0112] X相相电势波形 $E_1(t_6)$ 通过傅里叶变换得到X相电压基波幅值 $E(t_6)$ 和相角 $a(t_6)$ ，X相电流基波幅值 $I(t_6)$ 和相角 $b(t_6)$ ；
- [0113] 计算得到X相电压的功率角 $a_1(t_6)$ ，即电压超前于q轴的夹角：
- [0114] $a_1(t_6) = a(t_6) - a(t_3)$ ；
- [0115] 计算得到X相电流的内功率因数角 $b_1(t_6)$ ，即电流超前于q轴的夹角：
- [0116] $b_1(t_6) = b(t_6) - a(t_3)$ ；
- [0117] 计算得到其负载时的励磁电动势 $E_0(t_6)$ ：
- [0118] $E_0(t_6) = E(t_6) \cos(a_1(t_6)) + I(t_6) \sin(a_1(t_6))X_d$ ；
- [0119] 计算得到转子永磁体上的温度 t_6 ：
- [0120] $t_6 = \frac{E(t_3) - E_0(t_6)}{K_E} + t_3$ 。