



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 109936318 B

(45) 授权公告日 2020.09.25

(21) 申请号 201910333145.6

(51) Int.Cl.

(22) 申请日 2019.04.24

H02P 21/02 (2006.01)

H02P 21/30 (2016.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 109936318 A

审查员 嵇恒

(43) 申请公布日 2019.06.25

(66) 本国优先权数据  
201810450290.8 2018.05.11 CN

(73) 专利权人 北京理工大学  
地址 100081 北京市海淀区中关村南大街5号

(72) 发明人 张承宁 冯艳丽

(74) 专利代理机构 北京市诚辉律师事务所  
11430

代理人 范盈

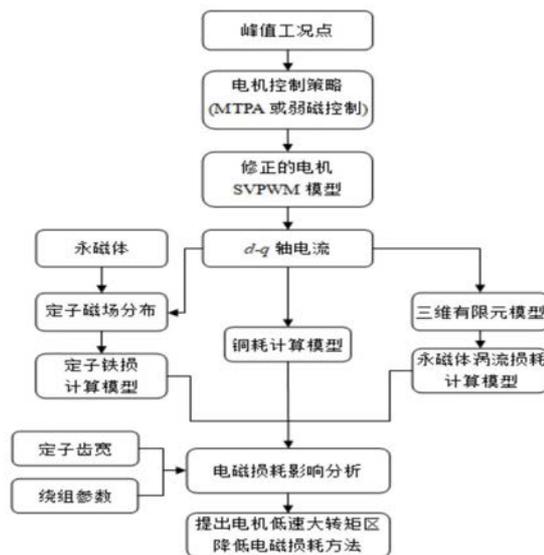
权利要求书2页 说明书5页 附图4页

(54) 发明名称

一种降低电机电磁损耗的优化方法

(57) 摘要

本发明提供了一种降低电机电磁损耗的优化方法,其通过考虑磁饱和效应下的SVPWM控制模型,建立电机电磁损耗的计算模型,从而得到了电机低速大转矩区内降低电磁损耗的优化方法,为电机峰值扭矩的提高提供了理论依据,实现了现有技术中所不具备的诸多效果。



1. 一种降低电机电磁损耗的优化方法,其特征在于:具体包括以下步骤:

步骤一、获取电机在不同电流下的dq轴磁链数据,根据dq轴磁链与电流关系建立考虑磁饱和和效应的电机电压、磁链和电磁转矩方程;所述的dq轴磁链与电流具有以下拟合关系:

$$\begin{cases} \varphi_d(i_d, i_q) = \varphi_0 + \frac{K_{Ld}(i_d + I_0)}{1 + K_{sd}|i_d + I_0| + K_{sqd}|i_q|} \\ \varphi_q(i_d, i_q) = \frac{K_{Lq}i_q}{1 + K_{sdq}|i_d + I_0| + K_{sq}|i_q|} \end{cases}$$

其中,  $\varphi_d$ 、 $\varphi_q$ 分别为d、q轴磁链,  $K_{Ld}$ 、 $K_{sd}$ 为考虑磁饱和效应下d轴总磁链的曲线形状系数,  $K_{sqd}$ 为q轴电流对d轴总磁链的交叉耦合影响系数,  $K_{Lq}$ 、 $K_{sq}$ 为考虑磁饱和效应下q轴总磁链的曲线形状系数,  $K_{sdq}$ 为d轴电流对q轴总磁链的交叉耦合影响系数,  $\varphi_0$ 为不同q轴电流下d轴磁链的固定值,  $I_0$ 为固定d轴磁链所对应的d轴电流,  $i_d$ 、 $i_q$ 分别为d、q轴电流;

步骤二、根据步骤一所建立的所述方程建立非线性磁链下的电机SVPWM控制模型,得到电机在低速大转矩工况下的相电流;

步骤三、基于所述步骤二中得到的所述相电流,建立电机在SVPWM控制下考虑磁饱和和效应的电磁损耗计算模型;

步骤四、利用所述步骤三中所建立的电磁损耗计算模型,对电机定子齿宽和导线并绕根数对所述低速大转矩工况下电磁损耗的影响进行分析,实施降低所述电磁损耗的优化策略。

2. 如权利要求1所述的方法,其特征在于:所述步骤一中所获取的dq轴磁链数据基于冻结磁导率法对电机不同电流下dq轴磁链进行非线性仿真得到。

3. 如权利要求2所述的方法,其特征在于:所述步骤一中所建立的考虑磁饱和和效应的电机电压、磁链和电磁转矩方程,具体包括:

电压方程:

$$\begin{cases} v_d = -\omega\varphi_q(i_d, i_q) + R_s i_d \\ v_q = \omega\varphi_d(i_d, i_q) + R_s i_q \end{cases}$$

磁链方程:

$$\begin{cases} \varphi_d(i_d, i_q) = \varphi_0 + \frac{K_{Ld}(i_d + I_0)}{1 + K_{sd}|i_d + I_0| + K_{sqd}|i_q|} \\ \varphi_q(i_d, i_q) = \frac{K_{Lq}i_q}{1 + K_{sdq}|i_d + I_0| + K_{sq}|i_q|} \end{cases}$$

电磁转矩方程:

$$T_e = \frac{3}{2} p [\varphi_d(i_d, i_q) i_q - \varphi_q(i_d, i_q) i_d]$$

式中,  $\omega$ 为电角速度,  $v_d$ 、 $v_q$ 分别为d、q轴电压,  $R_s$ 为相电阻,  $p$ 为极对数。

4. 如权利要求3所述的方法,其特征在于:所述步骤二中的电机SVPWM控制模型中,根据工况分别采用最大转矩电流比控制和弱磁控制,基于所述磁链方程可得到电机定子dq轴电流为:

$$\begin{cases} i_d(\varphi_d, \varphi_q) = -I_0 + \frac{(\varphi_d - \varphi_0)[K_{Lq} + (K_{sdq} - K_{sq})\varphi_q]}{(K_{Ld} - K_{sd}|\varphi_d - \varphi_0|)(K_{Lq} - \varphi_q K_{sq}) - \varphi_q|\varphi_d - \varphi_0|K_{sqd}K_{sdq}} \\ i_q(\varphi_d, \varphi_q) = \frac{\varphi_q[K_{Ld} - (K_{sd} - K_{sqd})|\varphi_d - \varphi_0|]}{(K_{Ld} - K_{sd}|\varphi_d - \varphi_0|)(K_{Lq} - \varphi_q K_{sq}) - \varphi_q|\varphi_d - \varphi_0|K_{sqd}K_{sdq}} \end{cases}$$

根据dq轴实际电压和实际转速得出电机的工作状态,获得电机定子铁损分析所需的不同工作点下定子相电流。

5.如权利要求4所述的方法,其特征在于:所述步骤三中建立所述电磁损耗计算模型,具体包括:

绕组铜耗基于电机各次谐波电流计算:

$$P_{cu} = m \sum_{k=1}^n I_k^2 R_{dc}$$

其中,m为电机相数, $I_k$ 为第k次谐波电流的有效值, $R_{dc}$ 为绕组相电阻;

根据电机的几何结构和尺寸建立电机的有限元模型,将电机定子划分为多个剖分单元,经有限元仿真得到永磁体和相电流共同激励下定子各剖分单元的径切向磁通密度,利用电机的分段变系数铁损计算模型得到电机的定子铁损如下:

$$\begin{cases} P_{Fe} = L_a \int_s (P_h + P_e + P_{ecx}) \rho ds = L_a \rho \sum_{i=1}^{N_s} (P_h^{(i)} + P_e^{(i)} + P_{ecx}^{(i)}) \Delta_s^{(i)} \\ P_h = \sum_{k=1}^N k_r k_h k_f \left[ B_{nk}^\alpha (n_{1k} B_{nk}^{\beta_{1k}}) \right] \\ P_e = \sum_{k=1}^N k_e k^2 f^2 \left[ B_{nk}^2 (1 + n_{2k} B_{nk}^{\beta_{2k}}) \right] \\ P_{ecx} = \sum_{k=1}^N k_{ecx} k^{1.5} f^{1.5} B_{nk}^{1.5} \end{cases}$$

其中, $P_{Fe}$ 为定子铁心损耗, $P_h$ 为磁滞损耗, $P_e$ 为涡流损耗, $P_{ecx}$ 为附加损耗, $k_h$ 、 $\alpha$ 为磁滞损耗系数, $k_e$ 为涡流损耗系数, $k_{ecx}$ 为附加损耗系数, $f$ 为电机频率, $k_r$ 为旋转磁化损耗系数, $B_{nk}$ 为第k次磁通密度谐波幅值, $n_{1k} B_{nk}^{\beta_{1k}}$ 为磁滞损耗附加磁通密度低次项, $n_{2k} B_{nk}^{\beta_{2k}}$ 为涡流损耗附加磁通密度高次项, $L_a$ 为定子轴向长度, $\rho$ 为定子硅钢片密度, $P_h^{(i)}$ 、 $P_e^{(i)}$ 、 $P_{ecx}^{(i)}$ 分别为第i个定子单元的磁滞、涡流和附加损耗密度, $\Delta_s^{(i)}$ 为第i个单元的面积, $N_s$ 为剖分单元的数量;转子铁损参照上述定子铁损的计算方法;

根据电机低速大转矩工况点下的相电流,通过三维时步有限元方法对永磁体涡流损耗进行精确计算:

$$P_{mag} = \iiint \frac{J^2}{\sigma} dV$$

其中,J为电流密度, $\sigma$ 为电导率,V为永磁体块的体积。

6.如权利要求1所述的方法,其特征在于:所述步骤四中在低速大转矩工况下电磁损耗进行优化包括适当减小齿宽,增大定子槽内的导线并联根数。

## 一种降低电机电磁损耗的优化方法

### 技术领域

[0001] 本申请涉及电机优化设计领域,尤其涉及一种降低电机电磁损耗的优化方法。

### 背景技术

[0002] 电机的峰值转矩直接影响电机的加速能力,对电机动力性能具有至关重要的作用。电机电磁损耗的产生与电机内部电磁场的相互作用密切相关,是制约电机峰值转矩的一个重要因素。电机电磁损耗主要包括绕组铜耗、定子铁损和转子涡流损耗,由于转子铁损中的涡流损耗远远大于磁滞损耗,将转子铁损和永磁体涡流损耗合称为转子涡流损耗。

[0003] 目前,SVPWM控制在电机控制技术中得到广泛应用。电机控制产生大量的电流谐波,使得电磁场谐波成分增加,电磁损耗增大。相比于传统工频电机,车用电机的宽调速范围使得电机控制方式对铁损的影响加深,导致电机SVPWM控制下的电磁损耗计算很有必要,且电机定子的磁饱和效应引起电磁参数非线性变化,尤其是在低速大转矩区,磁饱和效应更严重,使得电机在SVPWM控制过程中产生的电流谐波发生变化,进而影响电机产生的电磁损耗。同时电机低速大转矩区的电磁损耗较高,导致电机的温升问题突出,限制电机峰值转矩的提升,而目前电磁损耗的优化主要是针对额定工况,尚未有针对电机低速大转矩区内电磁损耗优化方面的研究出现。

[0004] 因此,如何在考虑磁饱和效应下电机SVPWM控制模型的基础上,提出一种降低电机低速大转矩区内电磁损耗的优化方法,为电机峰值转矩的提高提供理论依据,是本领域中亟待解决的问题。

### 发明内容

[0005] 针对上述本领域中存在的技术问题,本发明提供了一种降低电机电磁损耗的优化方法,具体包括以下步骤:

[0006] 步骤一、获取电机在不同电流下的dq轴磁链数据,根据dq轴磁链与电流关系建立考虑磁饱和效应的电机电压、磁链和电磁转矩方程。

[0007] 步骤二、根据步骤所建立的所述方程建立非线性磁链下的电机SVPWM控制模型,得到电机在低速大转矩工况下的相电流。

[0008] 步骤三、基于所述步骤二中得到的所述相电流,建立电机在SVPWM控制下考虑磁饱和效应的电磁损耗计算模型。

[0009] 步骤四、利用所述步骤三中所建立的电磁损耗计算模型,对电机定子齿宽和导线并绕根数对所述低速大转矩工况下电磁损耗的影响进行分析,实施降低所述电磁损耗的优化策略。

[0010] 进一步地,所述步骤一中所获取的dq轴磁链数据基于冻结磁导率法对电机不同电流下dq轴磁链进行非线性仿真得到。

[0011] 进一步地,所述步骤一中所所述的dq轴磁链与电流具有以下拟合关系:

$$[0012] \quad \begin{cases} \varphi_d(i_d, i_q) = \varphi_0 + \frac{K_{Ld}(i_d + I_0)}{1 + K_{sd}|i_d + I_0| + K_{sqd}|i_q|} \\ \varphi_q(i_d, i_q) = \frac{K_{Lq}i_q}{1 + K_{sdq}|i_d + I_0| + K_{sq}|i_q|} \end{cases}$$

[0013] 其中,  $\varphi_d$ 、 $\varphi_q$  分别为d、q轴磁链,  $K_{Ld}$ 、 $K_{sd}$  为考虑磁饱和效应下d轴总磁链的曲线形状系数,  $K_{sqd}$  为q轴电流对d轴总磁链的交叉耦合影响系数,  $K_{Lq}$ 、 $K_{sq}$  为考虑磁饱和效应下q轴总磁链的曲线形状系数,  $K_{sdq}$  为d轴电流对q轴总磁链的交叉耦合影响系数,  $\varphi_0$  为不同q轴电流下d轴磁链的固定值,  $I_0$  为固定d轴磁链所对应的d轴电流,  $i_d$ 、 $i_q$  分别为d、q轴电流。

[0014] 进一步地, 所述步骤一中所建立的考虑磁饱和效应的电机电压、磁链和电磁转矩方程, 具体包括:

[0015] 电压方程:

$$[0016] \quad \begin{cases} v_d = -\omega\varphi_q(i_d, i_q) + R_s i_d \\ v_q = \omega\varphi_d(i_d, i_q) + R_s i_q \end{cases}$$

[0017] 磁链方程:

$$[0018] \quad \begin{cases} \varphi_d(i_d, i_q) = \varphi_0 + \frac{K_{Ld}(i_d + I_0)}{1 + K_{sd}|i_d + I_0| + K_{sqd}|i_q|} \\ \varphi_q(i_d, i_q) = \frac{K_{Lq}i_q}{1 + K_{sdq}|i_d + I_0| + K_{sq}|i_q|} \end{cases}$$

[0019] 电磁转矩方程:

$$[0020] \quad T_e = \frac{3}{2} p [\varphi_d(i_d, i_q) i_q - \varphi_q(i_d, i_q) i_d]$$

[0021] 式中,  $\omega$  为电角速度,  $v_d$ 、 $v_q$  分别为d、q轴电压,  $R_s$  为相电阻,  $p$  为极对数。

[0022] 进一步地, 所述步骤二中的电机SVPWM控制模型中, 根据工况分别采用最大转矩电流比控制和弱磁控制, 根据所述磁链方程可得到电机定子dq轴电流为:

$$[0023] \quad \begin{cases} i_d(\varphi_d, \varphi_q) = -I_0 + \frac{(\varphi_d - \varphi_0)[K_{Lq} + (K_{sdq} - K_{sq})\varphi_q]}{(K_{Ld} - K_{sd}|\varphi_d - \varphi_0|)(K_{Lq} - \varphi_q K_{sq}) - \varphi_q|\varphi_d - \varphi_0|K_{sqd}K_{sdq}} \\ i_q(\varphi_d, \varphi_q) = \frac{\varphi_q[K_{Ld} - (K_{sd} - K_{sqd})\varphi_d - \varphi_0]}{(K_{Ld} - K_{sd}|\varphi_d - \varphi_0|)(K_{Lq} - \varphi_q K_{sq}) - \varphi_q|\varphi_d - \varphi_0|K_{sqd}K_{sdq}} \end{cases}$$

[0024] 电机SVPWM系统主要包括控制模块和电机模块两部分, 电机控制模块通过转速指令值、实际转速和dq轴电流计算得到电机dq轴电压的指令值, 经SVPWM调制得到逆变器IGBT开关的控制信号。电机模块利用其机械和电气特性, 根据dq轴实际电压和实际转速得出电机的工作状态, 获得电机定子铁损分析所需的不同工作点下定子相电流。

[0025] 进一步地, 所述步骤三中建立所述电磁损耗计算模型, 具体包括:

[0026] 绕组铜耗基于电机各次谐波电流计算:

$$[0027] \quad P_{cu} = m \sum_{k=1}^n I_k^2 R_{dc}$$

[0028] 其中,  $m$  为电机相数,  $I_k$  为第  $k$  次谐波电流的有效值,  $R_{dc}$  为绕组相电阻;

[0029] 根据电机的几何结构和尺寸建立电机的有限元模型, 将电机定子划分为  $N$  个剖分单元, 经有限元仿真得到永磁体和相电流共同激励下定子各剖分单元的径切向磁通密度, 利用电机的分段变系数铁损计算模型得到电机的定子铁损, 同时转子铁损的计算方法参照定子铁损计算方法。定子铁损的计算模型如下:

$$[0030] \quad \begin{cases} P_{Fe} = L_a \int_s (P_h + P_e + P_{ecx}) \rho ds = L_a \rho \sum_{i=1}^{N_s} (P_h^{(i)} + P_e^{(i)} + P_{ecx}^{(i)}) \Delta_s^{(i)} \\ P_h = \sum_{k=1}^N k_r k_h k_f \left[ B_{nk}^\alpha \left( n_{1k} B_{nk}^{\beta_{1k}} \right) \right] \\ P_e = \sum_{k=1}^N k_e k^2 f^2 \left[ B_{nk}^2 \left( 1 + n_{2k} B_{nk}^{\beta_{2k}} \right) \right] \\ P_{ecx} = \sum_{k=1}^N k_{ecx} k^{1.5} f^{1.5} B_{nk}^{1.5} \end{cases}$$

[0031] 其中,  $P_{Fe}$  为定子铁心损耗,  $P_h$  为磁滞损耗,  $P_e$  为涡流损耗,  $P_{ecx}$  为附加损耗,  $k_h$ 、 $\alpha$  为磁滞损耗系数,  $k_e$  为涡流损耗系数,  $k_{ecx}$  为附加损耗系数,  $k_h$ 、 $k_e$ 、 $k_{ecx}$ 、 $\alpha$  均为经典损耗分离模型的损耗系数, 可通过实测的损耗数据拟合得到,  $f$  为电机频率,  $k_r$  为旋转磁化损耗系数,  $B_{nk}$  为第  $k$  次磁通密度谐波幅值,  $n_{1k} B_{nk}^{\beta_{1k}}$  为磁滞损耗附加磁通密度低次项,  $n_{2k} B_{nk}^{\beta_{2k}}$  为涡流损耗附加磁通密度高次项,  $n_{1k}$ 、 $\beta_{1k}$ 、 $n_{2k}$ 、 $\beta_{2k}$  为附加损耗系数, 可通过实测不同频率下的正交损耗数据拟合得到,  $L_a$  为定子轴向长度,  $\rho$  为定子硅钢片密度,  $P_h^{(i)}$ 、 $P_e^{(i)}$ 、 $P_{ecx}^{(i)}$  分别为第  $i$  个定子单元的磁滞、涡流和附加损耗密度,  $\Delta_s^{(i)}$  为第  $i$  个单元的面积,  $N_s$  为剖分单元的数量。

[0032] 根据电机低速大转矩工况点下的相电流, 通过三维时步有限元方法对永磁体涡流损耗进行精确计算:

$$[0033] \quad P_{mag} = \iiint \frac{J^2}{\sigma} dV$$

[0034] 其中,  $J$  为电流密度,  $\sigma$  为电导率,  $V$  为永磁体块的体积。

[0035] 进一步地, 所述步骤四中低速大转矩工况下电磁损耗进行优化包括适当减小齿宽, 增大定子槽内的导线并联根数。

[0036] 本发明所提供的上述方法, 通过考虑磁饱和效应下的 SVPWM 控制模型, 建立电机电磁损耗的计算模型, 从而得到了电机低速大转矩区内降低电磁损耗的优化方法, 为电机峰值转矩的提高提供了理论依据, 实现了现有技术中所不具备的诸多效果。

## 附图说明

[0037] 图1是本发明所提供方法的流程图

[0038] 图2是电机 dq 轴总磁链随 dq 轴电流的变化关系

[0039] 图3是电机考虑磁饱和效应下 SVPWM 控制模型中的电机修正模块

[0040] 图4是内置式永磁同步电机的定子结构图

[0041] 图5是内置式永磁同步电机不同齿宽结构在峰值工况点的相电流分布

[0042] 图6是内置式永磁同步电机不同齿宽下优化前的电磁损耗分布

[0043] 图7是内置式永磁同步电机不同齿宽下优化后的电磁损耗分布

## 具体实施方式

[0044] 下面结合附图对本发明所提供的一种降低电机低速大转矩区内电磁损耗的优化方法,做出进一步详尽的阐释。

[0045] 如图1所示,本发明所提供的方法具体包括以下步骤:

[0046] 步骤一、获取电机在不同电流下的dq轴磁链数据,根据dq轴磁链与电流关系建立考虑磁饱和效应的电机电压、磁链和电磁转矩方程。

[0047] 步骤二、根据步骤所建立的所述方程建立非线性磁链下的电机SVPWM控制模型,得到电机在低速大转矩工况下的相电流。

[0048] 步骤三、基于所述步骤二中得到的所述相电流,建立电机在SVPWM控制下考虑磁饱和和效应的电磁损耗计算模型。

[0049] 步骤四、利用所述步骤三中所建立的电磁损耗计算模型,对电机定子齿宽和导线并绕根数对所述低速大转矩工况下电磁损耗的影响进行分析,实施降低所述电磁损耗的优化策略。

[0050] 在本申请的一个优选实施例中,所述dq轴磁链数据可基于冻结磁导率法对电机不同电流下dq轴磁链进行非线性仿真得到,磁链与电流间的拟合关系如表1和图2所示。

[0051] 表1

	参数	值	参数	值
	$I_0$	600A	$\varphi_0$	0.02607Wb
[0052]	$K_{Ld}$	$1.8 \times 10^{-4}$	$K_{Lq}$	$5.1 \times 10^{-4}$
	$K_{sd}$	$7.06 \times 10^{-6}$	$K_{sq}$	$1.22 \times 10^{-3}$
	$K_{sdq}$	$1.84 \times 10^{-4}$	$K_{sqd}$	$2 \times 10^{-4}$

[0053] 将电机考虑磁饱和效应的SVPWM控制模型中电机模块修正为如图3所示,控制策略保持不变。根据该SVPWM模型得到电机在低速大转矩工况点的定子相电流。

[0054] 在本申请的一个优选实施例中,以一台370kW内置式永磁同步电机为研究对象,电机的定子结构如图4所示,以峰值工况点(1000rpm,1660Nm)为例研究定子齿宽和绕组参数对电机相电流、电磁场及电磁损耗的影响。在分析齿宽时,将齿宽的大小设置为4~10mm,保证电机轭高 $h_j$ 不变,且定子底部和顶部齿宽比例 $b_{t1}/b_{t2}$ 不变。基于以上原则,可得到电机不同齿宽下的定子槽参数。然后根据该SVPWM控制模型得到不同齿宽电机在峰值工况点的相电流,如图5所示。电机的电感、磁链参数随着齿宽的变化而变化,导致不同齿宽电机在峰值工况点的相电流相差较大。在保证绕组参数不变的情况下,齿宽越小,同一峰值工作点下需要的相电流越大。

[0055] 根据不同齿宽电机在峰值工作点下的相电流,利用电磁损耗计算模型中关于各损耗的公式,分别计算得到电机不同齿宽下的电磁损耗,如图6所示。由图看出,电机总损耗均随齿宽的减小而增加,其中铜耗在总损耗中占有很大比例,且齿宽较小时,较高的相电流导致电机的铜耗较大,而定子铁损和转子涡流损耗在同一负载工况下的变化幅度不大。同时,齿宽较小时,槽满率降低,此时可以有足够的定子槽空间对绕组参数进行优化,实现铜耗的降低,从而实现电机电磁损耗的降低。

[0056] 为研究绕组参数对电机电磁损耗的影响,通过改变导线并绕根数实现绕组参数在

定子槽的优化,在分析过程中,保证电机的绕组匝数和线径不变,忽略相电阻上的电压降以及导线并绕根数变化对感应电动势的影响。绕组导线并绕根数的改变对相电流不产生影响,但导线并绕根数的变化改变了绕组的截面积,与相电阻呈反比关系,随着导线并绕根数的增加,相电阻相应减小。因此,导线并绕根数的变化能够改变绕组的铜耗,但对定子铁损和转子涡流损耗的影响可以忽略,进而影响电机总损耗的大小。假设导线的并绕根数为 $N_{t1}$ ,相电阻为 $R$ ,定子槽满率为 $S_{f1}$ ,现将导线并绕根数改变为 $N_{t2}$ ,则此时定子相电阻 $R' = (N_{t1}/N_{t2})R$ ,槽满率 $S_{f2} = (N_{t2}/N_{t1})S_{f1}$ ,电机的绕组铜耗可表示为:

$$[0057] \quad P_{cu} = \frac{3}{2}(i_d^2 + i_q^2) \cdot \left(\frac{N_{t1}}{N_{t2}}\right) R = \frac{3}{2}(i_d^2 + i_q^2) \cdot \left(\frac{S_{f1}}{S_{f2}}\right) R$$

[0058] 根据上式可得到电机不同定子槽满率下的绕组铜耗随齿宽的变化曲线,在此基础上,得到电机不同槽满率下的总损耗随齿宽的变化曲线,如图7所示。针对内外径一定的电机,适当减小定子齿宽,定子槽内有足够的空间可以增加电机的导线并绕根数,使得相电阻减小,绕组铜耗降低,导致电机在低速大转矩区的总损耗降低。在同一定子槽内,增加导线并绕根数使得槽满率增加,相电阻减小,电机的铜耗和总损耗减小,但为了方便嵌线,定子槽满率不宜过大。在同一定子槽满率下,定子齿宽影响电机峰值工作点下的损耗。随着齿宽的减小,较大的定子槽空间使得导线并绕根数增加,相电阻减小,导致铜耗降低,但过小的齿宽,相电流太大使得铜耗相对较大,导致电机的总损耗随齿宽的减小先减小后增加。因此,适当的减小定子齿宽,增加绕组的导线并绕根数,可降低电机在低速大转矩区的铜耗及总损耗。

[0059] 尽管已经示出和描述了本发明的实施例,对于本领域的普通技术人员而言,可以理解在不脱离本发明的原理和精神的情况下可以对这些实施例进行多种变化、修改、替换和变型,本发明的范围由所附权利要求及其等同物限定。

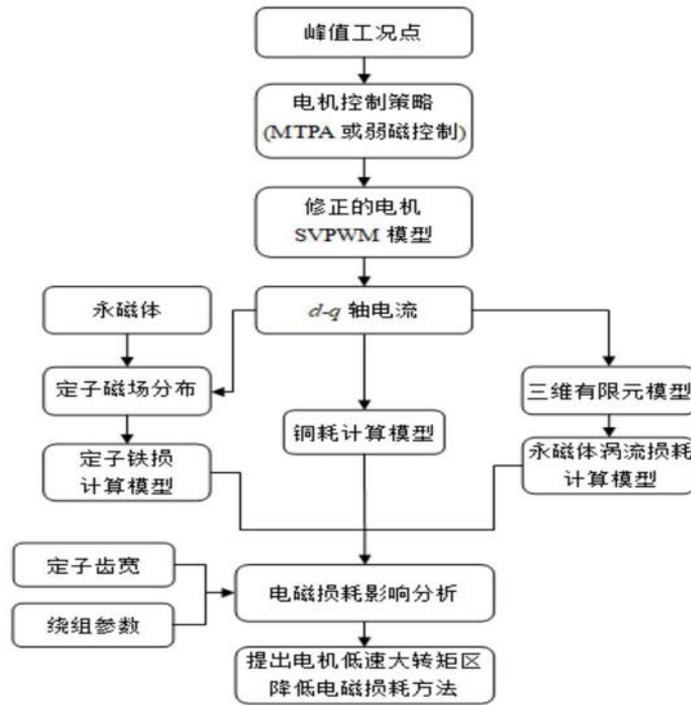


图1

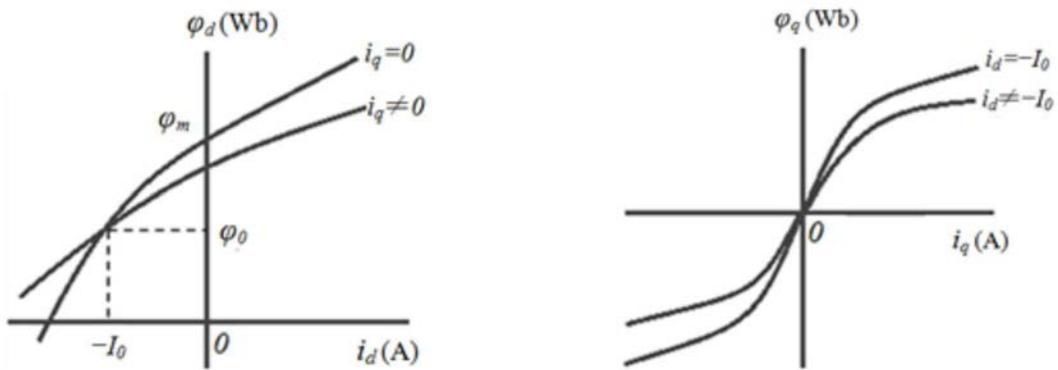


图2

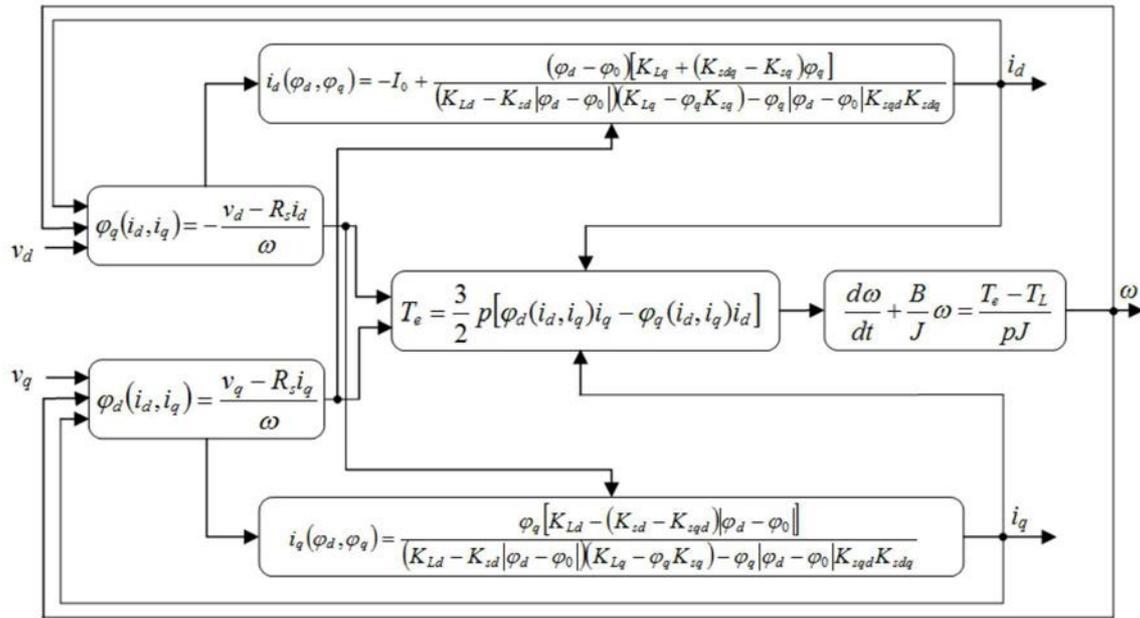


图3

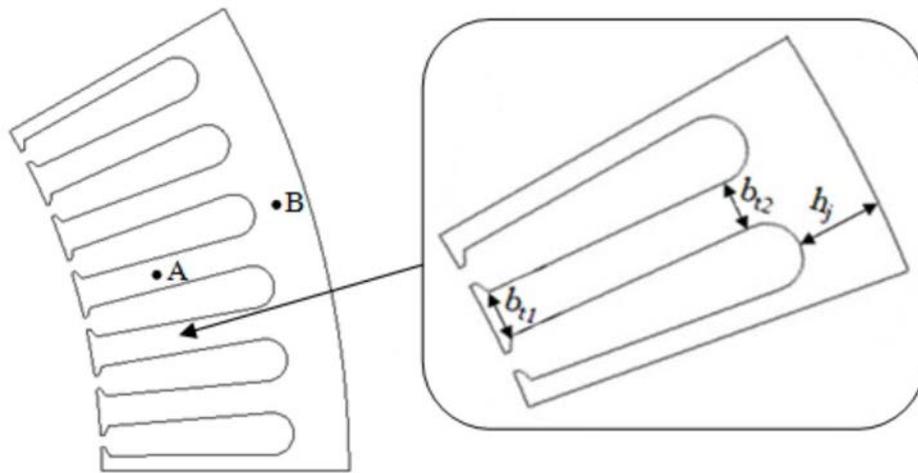


图4

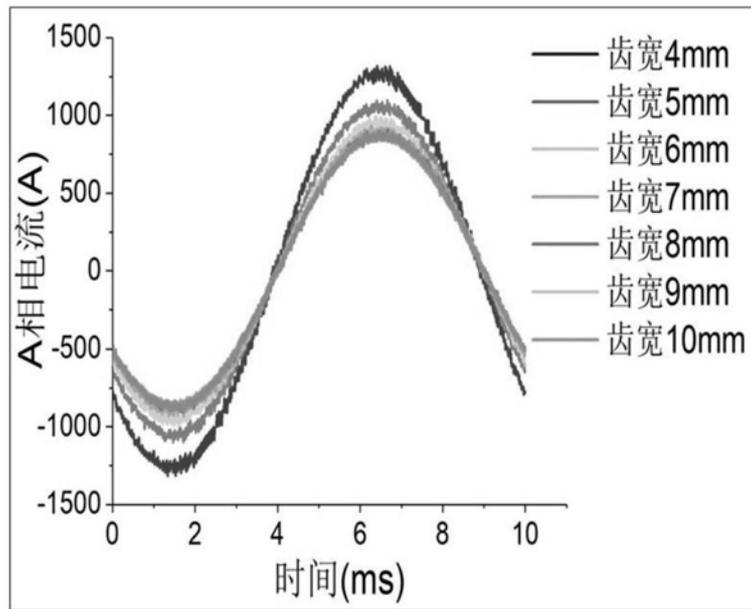


图5

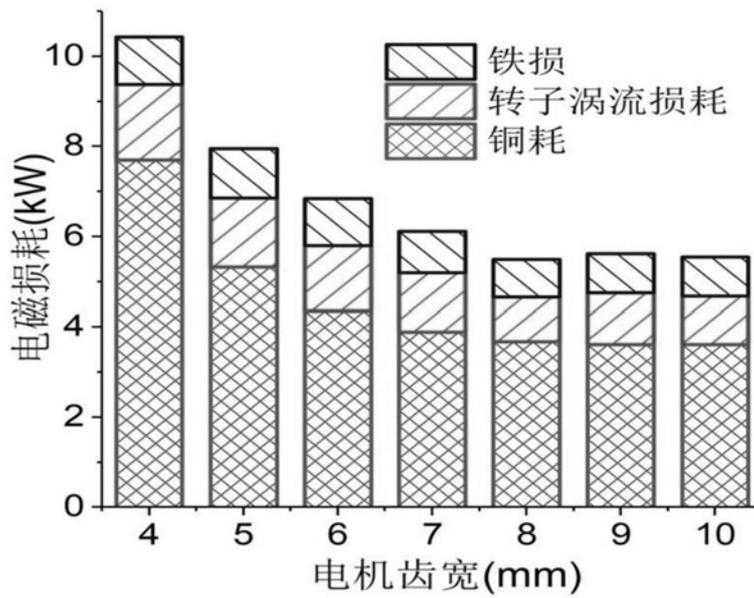


图6

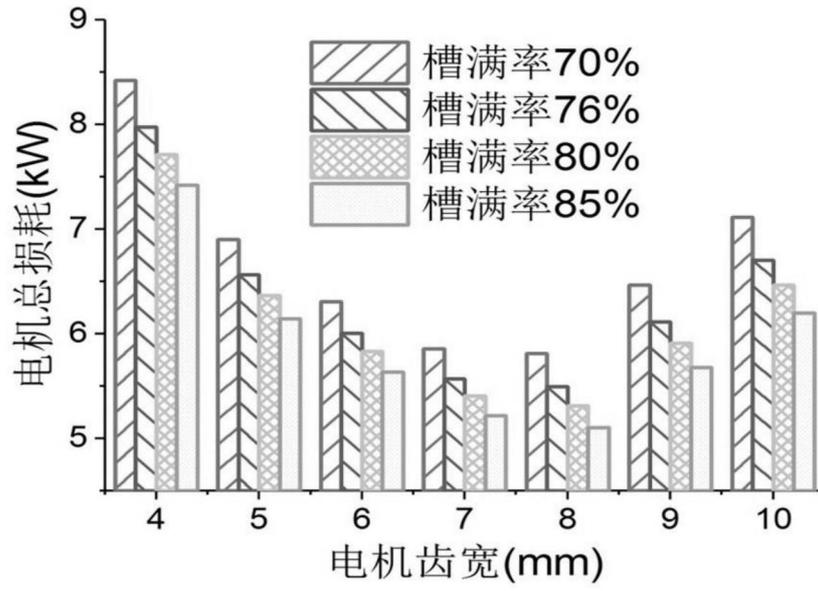


图7