

基于在线参数辨识的永磁同步电机最小损耗控制方法

田茂壮¹, 杨福广^{1,2*}, 党政¹, 刘 栋¹

¹山东交通学院轨道交通学院, 山东 济南

²山东省交通运输行业轨道交通安全技术与装备重点实验室, 山东 济南

收稿日期: 2026年7月27日; 录用日期: 2026年8月20日; 发布日期: 2026年8月28日

摘 要

针对永磁同步电机运行过程中定子电阻、电感及永磁磁链等参数随温升、磁饱和和工况变化发生偏移, 进而影响最小损耗控制精度的问题, 提出一种基于在线参数辨识的永磁同步电机最小损耗控制方法。首先, 在dq坐标系下建立考虑铜损和铁损的永磁同步电机数学模型, 并以总损耗最小为目标, 将最优电流分配问题转化为满足转矩约束的极值求解问题, 推导得到最优d轴电流的求解条件。随后, 设计候选解求解、可行域筛选和损耗评价相结合的最优电流计算方法, 以获得不同工况下的d、q轴电流参考值。针对电机参数变化对损耗模型准确性的影响, 引入递推最小二乘法对定子电阻、d/q轴电感和永磁磁链进行在线辨识, 并结合电压激励注入和死区电压补偿对辨识过程进行辅助处理。仿真结果表明, 所提方法能够根据参数辨识结果实时修正最优电流给定, 提高损耗模型与电机实际运行状态的一致性, 为永磁同步电机高效率控制提供了一种可行方法。

关键词

永磁同步电机, 最小损耗控制, 在线参数辨识, 递推最小二乘法

Minimum Loss Control Method for Permanent Magnet Synchronous Motors Based on Online Parameter Identification

Maozhuang Tian¹, Fuguang Yang^{1,2*}, Zheng Dang¹, Dong Liu¹

¹School of Rail Transit, Shandong Jiaotong University, Jinan Shandong

²Key Laboratory of Rail Transit Safety Technology and Equipment in Shandong Transportation Industry, Jinan Shandong

Received: July 27, 2026; accepted: August 20, 2026; published: August 28, 2026

*通讯作者。

文章引用: 田茂壮, 杨福广, 党政, 刘栋. 基于在线参数辨识的永磁同步电机最小损耗控制方法[J]. 机械工程与技术, 2026, 15(4): 471-485. DOI: 10.12677/met.2026.154045

Abstract

To address the problem that variations in stator resistance, inductance, and permanent magnet flux linkage caused by temperature rise, magnetic saturation, and operating conditions may reduce the accuracy of minimum-loss control for permanent magnet synchronous motors, a minimum-loss control method based on online parameter identification is proposed. First, a mathematical model of the permanent magnet synchronous motor considering copper loss and iron loss is established in the dq reference frame. With the minimization of total loss as the objective, the optimal current allocation problem is transformed into an extremum problem under the torque constraint, and the solution condition for the optimal d-axis current is derived. Then, an optimal current calculation method combining candidate solution solving, feasible region screening, and loss evaluation is designed to obtain the d- and q-axis current references under different operating conditions. To reduce the influence of parameter variations on the accuracy of the loss model, the recursive least squares method is introduced to identify the stator resistance, d/q-axis inductances, and permanent magnet flux linkage online. In addition, voltage excitation injection and dead-time voltage compensation are used as auxiliary processing measures in the identification process. Simulation results show that the proposed method can update the optimal current references according to the identified parameters in real time, improve the consistency between the loss model and the actual operating state of the motor, and provide a feasible approach for high-efficiency control of permanent magnet synchronous motors.

Keywords

Permanent Magnet Synchronous Motor, Minimum-Loss Control, Online Parameter Identification, Recursive Least Squares

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)具有功率密度高、效率高、调速性能好和运行可靠性高等优点,已广泛应用于电动汽车、工业机器人、数控机床及航空航天等高性能电驱动场合。随着电机驱动系统对能效水平、续航能力和运行经济性的要求不断提高,仅依靠传统矢量控制实现转矩和转速跟踪已难以满足高效率运行需求[1]。因此,在保证动态性能和稳态控制精度的基础上,进一步降低电机运行损耗、提高系统效率,成为永磁同步电机控制领域的重要研究方向。

永磁同步电机运行损耗主要包括定子铜损、铁损、机械损耗和杂散损耗等。其中,铜损与定子电流幅值密切相关,铁损则与磁链幅值、转速及电机磁场变化有关。在低速大转矩工况下,铜损通常占比较高;而在中高速或轻载高速工况下,铁损对总损耗的影响逐渐增强[1]。传统 $i_d = 0$ 控制和最大转矩电流比(MTPA)控制主要侧重于转矩输出能力或单位电流转矩最大化,未必能够在全工况下获得最小总损耗。针对这一问题,已有研究提出最大效率电流控制、最小损耗控制和基于损耗模型的效率优化控制方法,通过建立铜损、铁损等损耗模型,并在满足转矩约束的条件下优化 d、q 轴电流分配,以提高电机运行效率[1][2]。

目前,永磁同步电机效率优化控制方法大体可分为基于损耗模型的方法和基于搜索寻优的方法。基

于损耗模型的方法通常根据电机数学模型和损耗表达式直接求解最优电流,具有物理意义明确、响应速度较快和便于工程实现等优点。有研究在考虑铜损和铁损的基础上提出最大效率电流控制策略,使电流分配由单纯追求转矩输出转向兼顾损耗最小;也有研究基于等效铁损模型,将最小损耗问题转化为电流变量的极值求解问题,并通过近似计算或解析推导降低在线计算复杂度。近年来,针对传统 $i_d = 0$ 控制和 MTPA 控制未充分考虑铜损、铁损及参数变化的问题,研究进一步提出了基于损耗角优化的最小损耗控制方法,以改善不同运行工况下的效率优化效果。基于搜索寻优的方法则不完全依赖精确损耗模型,而是通过模糊搜索、黄金分割搜索、粒子群优化等算法在线寻找效率较高或损耗较低的电流工作点。该方法对模型误差具有一定适应能力,但通常需要一定搜索时间,且搜索过程中可能引起电流或转矩波动[3];当电机工况频繁变化时,搜索过程的实时性和稳定性也会受到影响。已有研究采用改进粒子群优化算法对传统搜索控制进行优化,以提高非稳态工况下的效率寻优能力,但算法参数、收敛速度和在线计算量仍是其工程应用中需要关注的问题。综上可知,现有最小损耗控制方法已经能够在一定程度上降低永磁同步电机运行损耗,但其控制效果往往依赖于电机参数和损耗模型的准确性。实际运行过程中,定子电阻会随温升发生变化,d/q轴电感会受磁饱和影响而偏移,永磁体磁链也可能随温度和运行状态发生变化[4]。若控制系统仍采用固定参数进行损耗计算和最优电流求解,则所得电流参考值可能偏离当前真实最小损耗工作点[5],从而降低效率优化效果。因此,将在线参数辨识引入最小损耗控制,使损耗模型和最优电流计算能够根据电机实际运行状态进行修正,是提高 PMSM 高效率控制鲁棒性和适应性的重要途径。

基于上述分析,本文提出一种基于在线参数辨识的永磁同步电机最小损耗控制方法。首先,在 dq 坐标系下建立考虑铜损和铁损的永磁同步电机数学模型,并以总损耗最小为目标推导最优电流分配条件;其次,针对最优性方程可能存在多个候选解的问题,设计候选解求解、可行域筛选和损耗评价相结合的最优电流计算方法;然后,引入在线参数辨识思想,对影响损耗模型和转矩模型精度的关键电机参数进行实时更新;最后,将辨识参数用于损耗模型修正和最优电流给定更新,并通过仿真验证所提方法的可行性。

2. 考虑铁损的永磁同步电机数学模型

考虑铁损的永磁同步电机模型搭建永磁同步电机损耗来源有绕组铜损、铁损(铁心损耗、转子涡流损耗及附加损耗)和机械损耗,由于机械损耗随转速和负载的变化而不断变化,不可控,因此本文仅考虑可控部分的铜损和铁损,用等效铁损电阻的发热来表示铁心损耗和转子涡流损耗。图 1 为 dq 坐标系下考虑铁损和铜损的 PMSM 等效电路图[6],其中 R_s 表示定子绕组电阻, R_{fe} 为等效铁损电阻,永磁同步电机输入电流经坐标变换后的 dq 轴电流 i_d 、 i_q ,由铁损电流 i_{dfe} 、 i_{qfe} 和转矩电流 i_{dt} 、 i_{qt} 组成, ψ_f 为转子永磁体磁链, U_d 、 U_q 为定子电压 d、q 轴分量, L_d 、 L_q 为定子绕组 d、q 轴电感, ω 为转子电角速度。

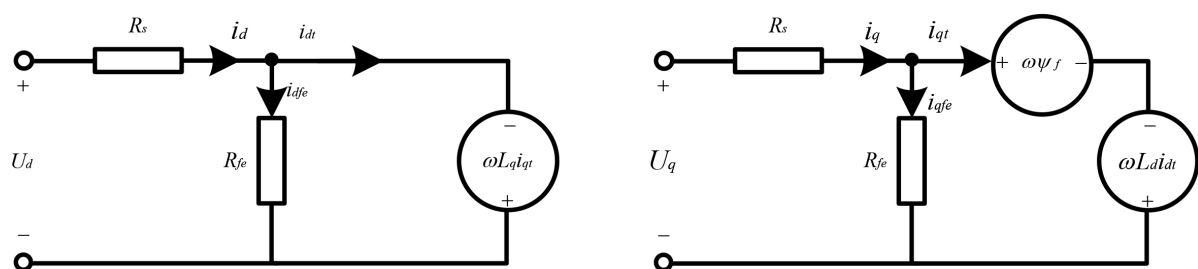


Figure 1. Equivalent circuit diagram of PMSM considering iron loss and copper loss in the dq coordinate system

图 1. dq 坐标系下考虑铁损和铜损的 PMSM 等效电路图

根据图 1 所示的 dq 轴等效电路, 可得永磁同步电机的电压方程为:

$$\begin{aligned} U_d &= R_s i_d - \omega L_q i_{qt} + L_d \frac{di_d}{dt} \\ U_q &= R_s i_q + \omega L_d i_{dt} + L_q \frac{di_{qt}}{dt} + \omega \psi_f \end{aligned} \quad (1)$$

转矩方程为:

$$T_e = \frac{3}{2} p_n [\psi_f i_{qt} + (L_d - L_q) i_{dt} i_{qt}] \quad (2)$$

永磁同步电机机械运动方程为:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_L - B\omega_r \quad (3)$$

式中, J 表示电机转动惯量; T_L 表示电机负载转矩; B 表示电机粘滞摩擦系数。

在 dq 坐标系电机模型下, 电机铜损可以由经过 R_s 电阻的发热来表示, 表达式如下:

$$P_{cu} = R_s (i_d^2 + i_q^2) = R \left[(i_{dt} + i_{dfe})^2 + (i_{qt} + i_{qfe})^2 \right] \quad (4)$$

铁损可以由下式表示:

$$P_{fe} = R_{fe} (i_{dfe}^2 + i_{qfe}^2) = \frac{\omega_e^2}{R_{fe}} \left[(L_q i_{qt})^2 + (L_d i_{dt} + \psi_f)^2 \right] \quad (5)$$

根据经典铁耗理论, 电机铁耗与磁密幅值即磁化频率密切相关[7][8]。在永磁同步电机 dq 坐标系中, d、q 轴磁链可用于表征主磁通水平, 而稳态反电势或端电压幅值与点角速度及磁链幅值近似成正比。已有研究表明, 铁耗可以通过基于磁链幅值与转速的简化模型进行近似描述, 并有效用于控制与优化问题中。因此为降低在线优化计算的复杂度, 适用于最优电流求解, 本文采用如下铁耗等效模型:

$$P_{fe} = k_{fe} \cdot \omega_e^2 \cdot (\psi_d^2 + \psi_q^2) \quad (6)$$

其中 k_{fe} 为铁耗等效系数, ω_e 为电角速度, ψ_d 、 ψ_q 分别为 d、q 轴磁链。该模型从能量角度刻画铁耗与磁链幅值及转速之间的关系, 在保证物理一致性的同时避免了基于有限元或分离磁滞涡流模型的高计算复杂度问题[7], 从而更适用于在线最优电流求解问题[9]。

故最小损耗控制的问题是一个约束优化问题, 该问题将转矩和转速作为既定项寻找损耗最小时的交直流轴电流 i_d 、 i_q 工作点。结合损耗的产生, 排除了转速、转矩和电机固有参数的影响, 在永磁同步电机运行产生的四种损耗中, 铜损和铁损在总损耗中的占比较大, 铜损取决于通过定子的电流大小, 铁损由磁链(对应电压大小)决定。杂散损耗虽然同样受到子绕组电流大小的影响, 但是它与机械损耗在总损耗中的占比较小, 因此本文在研究中选择忽略该损耗。

由此, 本文研究的损耗表达式为:

$$P_L = P_{cu} + P_{fe} = R_s (i_d^2 + i_q^2) + k_{fe} \cdot \omega_e^2 \cdot (\psi_d^2 + \psi_q^2) \quad (7)$$

3. 最小损耗控制下的最优电流分配方法

3.1. 基于损耗函数的最优性条件推导

根据永磁同步电机考虑铁损的数学模型, 电机总损耗可表示为式(7), 因此最小损耗控制问题即可以转化为在满足式(2)的条件下求式(7)极值问题。

先把 i_q 表示成 i_d 的函数, 定义

$$K_t = \frac{3}{2} p_n, \quad \Delta L = L_d - L_q \quad (8)$$

则转矩方程写成

$$T_e = K_t (\psi_f + \Delta L i_d) i_q \quad (9)$$

所以

$$i_q = \frac{T_e}{K_t (\psi_f + \Delta L i_d)} \quad (10)$$

再定义

$$A = \psi_f + \Delta L i_d \quad (11)$$

则有

$$i_q = \frac{T_e}{K_t A} \quad (12)$$

将损耗, 即式(7)写成单变量 i_d 的形式

$$P_{loss}(i_d) = \frac{3}{2} R_s \left(i_d^2 + \frac{T_e^2}{K_t^2 A^2} \right) + k_{fe} \omega_e^2 \left[(L_d i_d + \psi_f)^2 + L_q^2 \frac{T_e^2}{K_t^2 A^2} \right] \quad (13)$$

并定义

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{3}{2} R_s \\ C_2 &= k_{fe} \omega_e^2 \\ B &= \frac{T_e^2}{K_t^2} \end{aligned} \quad (14)$$

则

$$P_{loss}(i_d) = C_1 i_d^2 + C_2 (L_d i_d + \psi_f)^2 + (C_1 + C_2 L_q^2) \frac{B}{A^2} \quad (15)$$

式(15)对 i_d 求导得:

$$\frac{dP_{loss}}{di_d} = 2C_1 i_d + 2C_2 L_d (L_d i_d + \psi_f) - 2\Delta L (C_1 + C_2 L_q^2) \frac{B}{A^3} \quad (16)$$

令(16)式等于 0, 整理得:

$$C_1 i_d + C_2 L_d (L_d i_d + \psi_f) - \Delta L (C_1 + C_2 L_q^2) \frac{B}{A^3} = 0 \quad (17)$$

式(17)即为最优电流 i_d 的解析式, 通过解析得到 i_d 后, i_q 可由式(12)求解得到。

3.2. 最优电流求解算法设计与实现

在前述推导中, 最小损耗控制问题已经转化为关于 i_d 的单变量极值求解问题[7]。令式(16)左侧为零, 并进一步整理得到式(17)。(17)式给出了最优 i_d 的必要条件, 但由于该方程通常为高阶非线性方程, 且在

不同转矩、转速及参数条件下可能存在多个实数根[2]，因此不能简单地将某一个根直接作为最优解。

为保证所求电流指令满足电机实际运行约束，本文采用“候选解求解-可行域筛选-损耗评价-最优解选择”的方法进行最优电流计算。其基本思想是：首先根据式(17)求得所有 i_d 候选解；然后根据转矩约束计算对应的 i_q ；再结合电流幅值限制剔除不可行解；最后将可行解代入总损耗函数，选取损耗最小的一组电流作为最优电流指令。

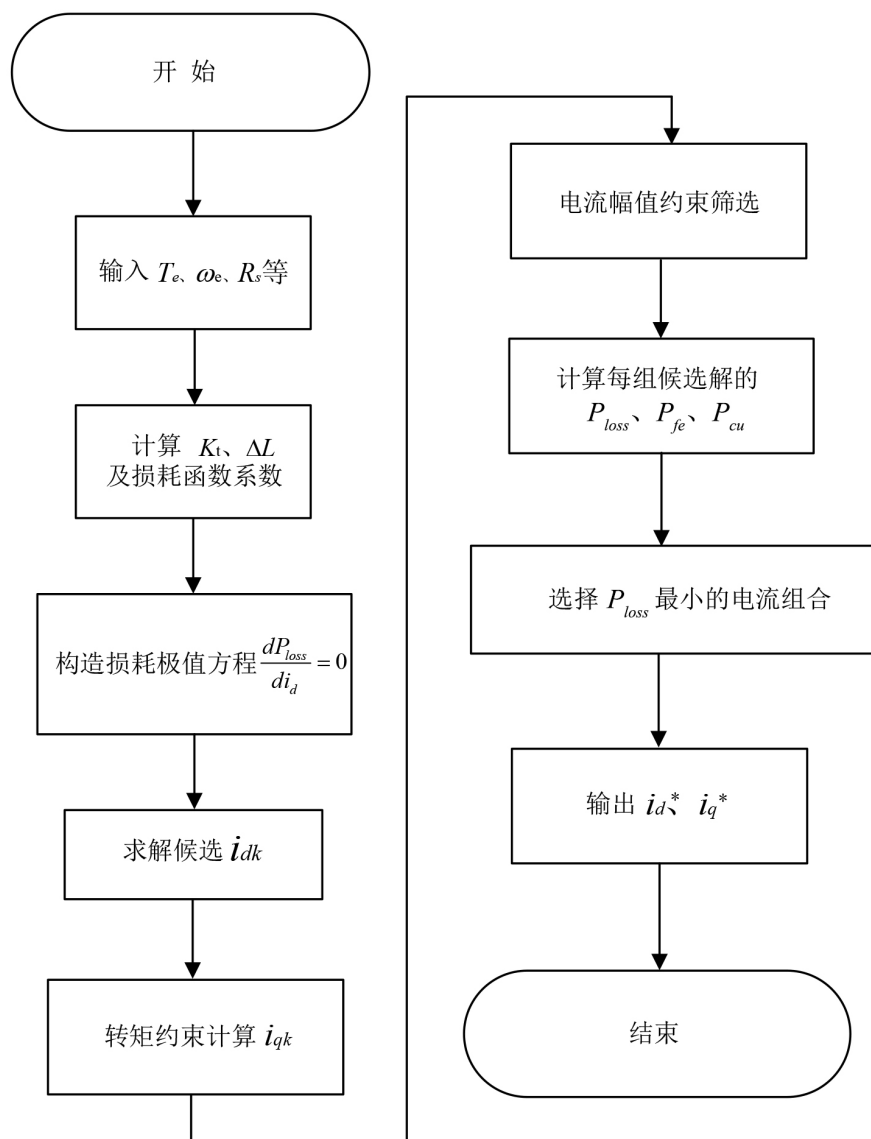


Figure 2. Optimal current solution algorithm flowchart

图 2. 最优电流求解算法流程图

具体而言，设式(17)求得的候选解集合为：

$$S_d = \{i_{d1}, i_{d2}, \dots, i_{dn}\}$$

对于每一个候选解 i_{dk} ，由转矩方程可得对应的 i_{qk} ：

$$i_{qk} = \frac{T_e}{K_t [\psi_f + (L_d - L_q) i_{dk}]}$$

其中:

$$K_t = \frac{3}{2} p_n$$

随后根据电流约束判断该组解是否可行:

$$i_{dk}^2 + i_{qk}^2 \leq I_{\max}^2$$

若满足上述约束, 则将该组电流代入总损耗函数:

$$P_{\text{loss},k} = P_{\text{cu},k} + P_{\text{fe},k}$$

最终, 从全部可行解中选择总损耗最小的一组作为最优电流指令:

$$(i_d^*, i_q^*) = \arg \min_{(i_{dk}, i_{qk})} P_{\text{loss},k}$$

该方法既降低了计算复杂度, 同时能够处理式(17)可能存在多个候选解的情况, 适合在永磁同步电机最小损耗控制中实现。图2为算法流程图。

图2给出了本文最优电流求解算法的工程实现流程。首先根据当前转矩指令、电角速度及电机参数构造最优性方程, 并通过求根获得候选d轴电流。随后, 利用转矩约束计算对应的q轴电流, 并结合电流幅值限制对候选解进行筛选。对于满足约束的候选电流组合, 进一步计算其对应的铜耗、铁耗及总损耗, 最终选取总损耗最小的一组作为最优电流参考值。

4. 永磁同步电机在线参数辨识方法

上述最优电流求解过程依赖于 R_s 、 L_d 、 L_q 、 ψ_f 等电机参数。当电机运行状态发生变化时, 定子电阻、永磁磁链和电感参数可能随温升、磁饱和及负载工况发生偏移[1]。若仍采用固定参数进行最优电流计算, 则可能导致损耗模型与实际运行状态不一致, 从而使最优电流解偏离真实最小损耗点。针对这一问题将引入基于递推最小二乘法的参数辨识[10], 对关键电机参数进行实时估计, 并将辨识结果用于最优电流求解过程。

4.1. 辨识模型的构建

RLS作为一种在线辨识方法, 根据输入的新数据对估计值进行修正。其基本思想是: 新估计值 $\hat{\theta}(k)$ = 旧估计值 $\hat{\theta}(k-1)$ + 修正量 $\Delta(k)$ 。设 k 时刻的最小二乘法估计为:

$$\hat{\theta}(k) = (\phi^T(k)\phi(k))^{-1} \phi^T(k)Y(k) \quad (18)$$

式中, $\phi(k) = \frac{\phi(k-1)}{\phi^T(k)}$; $Y(k) = \frac{Y(k-1)}{y^T(k)}$ 。

令 $P^{-1}(k) = P^{-1}(k-1) - \phi(k)\phi^T(k)$, 由式(18)得

$$\hat{\theta}(k-1) = P(k-1)\phi^T(k-1)Y(k-1) \quad (19)$$

由式(18)和式(19)可得

$$\begin{aligned} \phi^T(k-1)Y(k-1) &= P^{-1}(k-1)\hat{\theta}(k-1) \\ &= [P^{-1}(k) - \phi(k)\phi^T(k)]\hat{\theta}(k-1) \end{aligned} \quad (20)$$

且 k 时刻的估计值为:

$$\begin{aligned}\hat{\theta}(k) &= P(k)\phi_k^T Y_k \\ &= \hat{\theta}(k-1) + P(k)\phi(k)[y(k) - \phi^T(k)\hat{\theta}(k-1)]\end{aligned}\quad (21)$$

为降低旧数据在辨识过程中的权重, 现在 RLS 辨识算法中加入遗忘因子[11], 递推方程为:

$$\begin{cases} P(k) = \frac{1}{\lambda} [I - K(k)\phi^T(k)]P(k-1) \\ K(k) = \frac{\phi(k)P(k-1)}{\lambda + \phi_N^T(k)\phi(k)P(k-1)} \\ \hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)[y(k) - \phi^T(k)\hat{\theta}(k-1)] \end{cases}\quad (22)$$

其中, $\hat{\theta}(k)$ 、 $\hat{\theta}(k-1)$ 为第 k 次和第 $k-1$ 次参数辨识结果; $P(k)$ 和 $K(k)$ 分别为协方差矩阵和增益矩阵; $y(k)$ 与 $\phi^T(k)$ 为输入变量矩阵; λ 为遗忘因子。

根据式(1)建立的永磁同步电机 dq 坐标系模型进行非线性微分方程重构为线性回归形式:

$$y(k) = \phi(k)\theta \quad (23)$$

其中输出向量定义为:

$$y(k) = \begin{bmatrix} u_d(k) \\ u_q(k) \end{bmatrix} \quad (24)$$

待估计参数向量为:

$$\theta = [R_s \quad L_d \quad L_q \quad \psi_f]^T \quad (25)$$

回归矩阵根据系统状态构造为:

$$\phi(k) = \begin{bmatrix} i_d(k) & \dot{i}_d(k) & -\omega_e(k)i_q(k) & 0 \\ i_q(k) & \omega_e(k)i_d(k) & \dot{i}_q(k) & \omega_e(k) \end{bmatrix} \quad (26)$$

此方式将电机参数辨识问题转化为标准的时变线性参数估计问题, 为递推最小二乘算法的实现提供了数学基础。

4.2. 可辨识性退化问题分析

在永磁同步电机的在线参数辨识过程中, 前文已将 dq 轴电压方程重构为线性回归形式, 并基于递推最小二乘算法实现参数估计。从理论上讲, 该模型能够实现对定子电阻、d/q 轴电感以及磁链的联合辨识。然而在实际运行环境中, 由于系统输入激励不足以及逆变器非理想特性影响, 回归模型往往难以满足参数唯一可辨识条件[12], 从而导致估计结果出现漂移或收敛不稳定的问题, 具体问题分析以及解决方案如下。

首先, 理想模型虽然有 4 个待辨识参数, 但实际稳态运行时, 回归矩阵不一定提供 4 个独立方向的信息。如式(26)得到的回归矩阵, 在稳态运行时, 有:

$$\dot{i}_d = 0, \quad \dot{i}_q = 0$$

则回归矩阵退化为:

$$\varphi(k) = \begin{bmatrix} i_d & 0 & -\omega_e i_q & 0 \\ i_q & \omega_e i_d & 0 & \omega_e \end{bmatrix}$$

即电机长期处于稳态或近稳态运行, i_d 、 i_q 变化缓慢, $\dot{i}_d$ 、 $\dot{i}_q$ 接近于零, 回归矩阵中与 L_d 、 L_q 相关的列向量信息量下降; 同时在恒转速、恒转矩条件下, i_d 、 i_q 与 ω_e 之间呈现较强相关性, 使得有限时间内的回归矩阵难以保持满秩[13]。

其次, 逆变器死区电压也会导致辨识失准问题[14], 死区电压使实际施加在电机端的电压偏离控制器给定电压, 若直接将参考电压作为辨识模型的输出量, 会导致 RLS 使用的 u_d 、 u_q 与实际端电压不一致, 即:

$$u_{dq} = u_{dq}^* - u_{dq}^{dead}$$

其中 u_{dq} 是 RLS 使用的电压, u_{dq}^* 是控制器给定电压, u_{dq}^{dead} 是由逆变器死区时间引起的死区电压。

需要说明的是, 实际逆变器还可能受到开关管导通压降、PWM 更新延迟等因素影响。为突出本文研究重点并降低在线辨识模型复杂度, 后续主要针对死区电压这一主要偏差来源展开。

4.3. 参数辨识结果与分析

针对上节提到的信息矩阵欠秩以及逆变器存在死区电压的问题, 分别从电压激励注入和死区电压补偿两个方面对参数辨识模型进行改进。

首先, 针对稳态运行时系统激励不足的问题, 本文在电压指令端叠加小幅值正弦激励信号 $u_{inj} = 2\sin(500t)$, 以增强电流响应的动态变化, 使回归矩阵在有限时间内能够提供更充分的参数信息, 同时因为将激励信号叠加在 d 轴电压通道中, 减小了激励信号对转矩输出造成的扰动。

其次针对逆变器死区电压导致的辨识失准问题, 在 SVPWM 模块内部引入死区电压补偿环节, 逆变器死区效应本质上会使桥臂输出电压相对于理想调制电压产生偏差, 该偏差与直流母线电压、死区时间、开关周期等因素有关[14][15], 设直流母线电压为 U_{dc} , 死区时间为 T_d , 开关周期为 T_s , 则死区电压等效幅值可表示为:

$$U_{dead} = U_{dc} \times \frac{T_d}{T_s}$$

则每项的死区电压为:

$$U_{adead} = U_{dead} \times \text{sign}(i_a)$$

$$U_{bdead} = U_{dead} \times \text{sign}(i_b)$$

$$U_{cdead} = U_{dead} \times \text{sign}(i_c)$$

三相死区电压经 Clark 变换以及 Park 变换后得到 dq 坐标系下的死区电压分量。为了减小该偏差对参数辨识结果的影响, 本文在 SVPWM 模块内部根据三相电流方向计算死区补偿电压, 并将补偿量直接通过反馈叠加至调制电压指令中。

在上述改进方法基础上, 搭建了考虑电压激励和死区补偿的永磁同步电机参数辨识仿真模型。仿真中, 电机转速给定为 1000 r/min, 负载为 2 N·m, 电压激励叠加于电流环输出后的 d 轴电压指令端, 激励幅值为 2、励角频率为 500 rad/s。SVPWM 模块中设置死区时间为 2 μ s, 直流母线电压为 311 V。待辨识参数为定子电阻 R_s 、d 轴电感 L_d 、q 轴电感 L_q 和永磁体磁链 ψ_f , 考虑到电机运行过程中的参数变化情况, 设置各参数在 0.2 s 时真实值开始变化, 变化时间为 1s, 变化幅度为 10%, 其中 R_s 上升 10%、 L_d 、 L_q 、 ψ_f 均下降 10%。在 Matlab/Simulink 中进行仿真得到的结果如下:

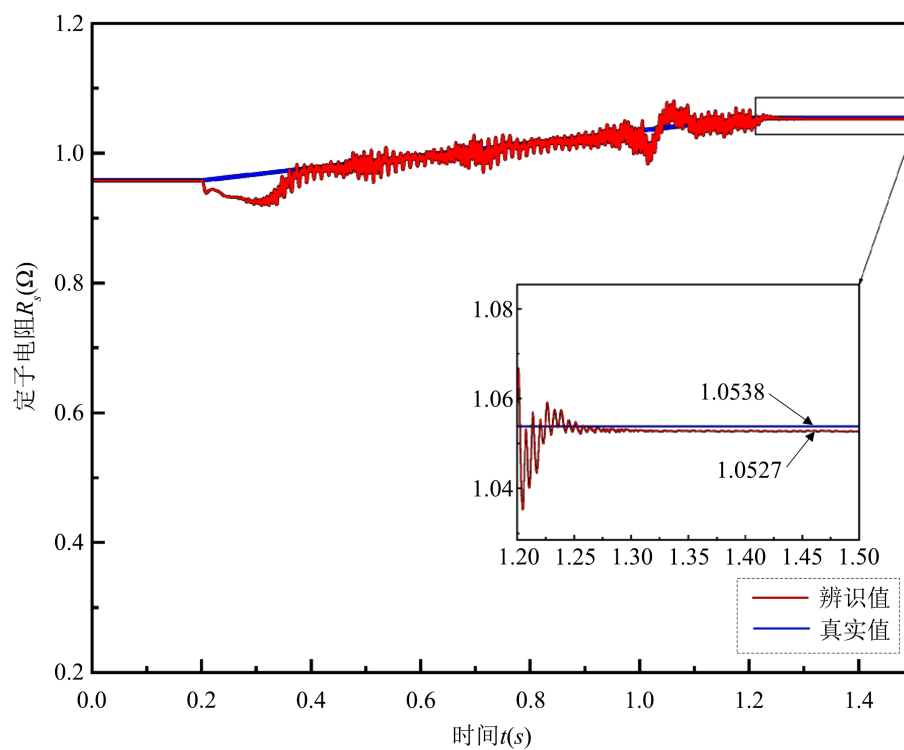


Figure 3. Stator resistance R_s identification waveform diagram

图 3. 定子电阻 R_s 辨识波形图

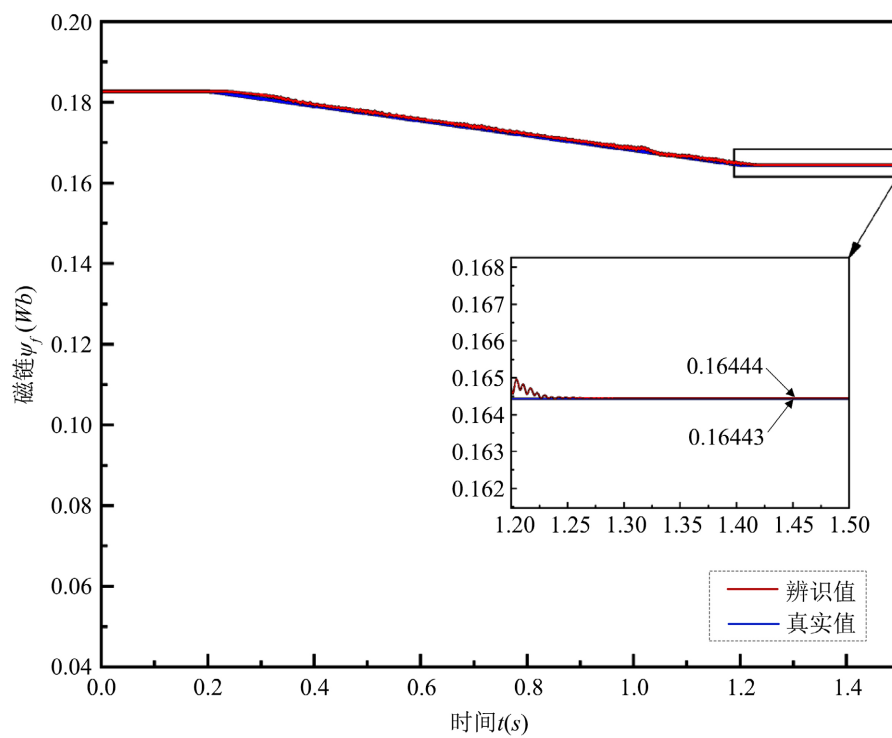


Figure 4. Flux linkage ψ_f identification waveform diagram

图 4. 磁链 ψ_f 辨识波形图

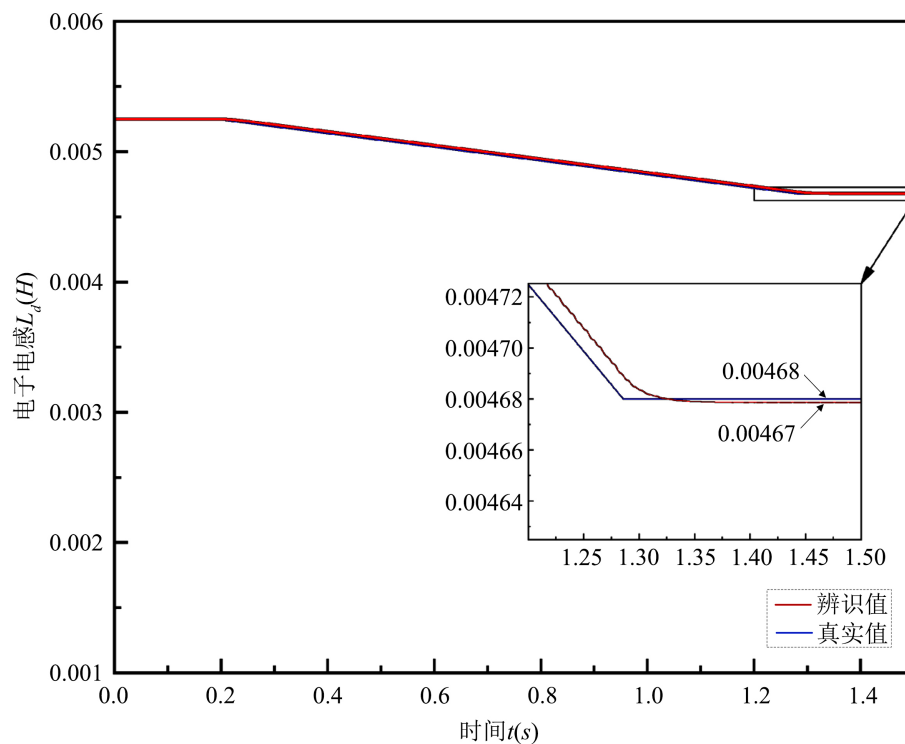


Figure 5. Stator inductance L_d identification waveform

图 5. 定子电感 L_d 辨识波形图

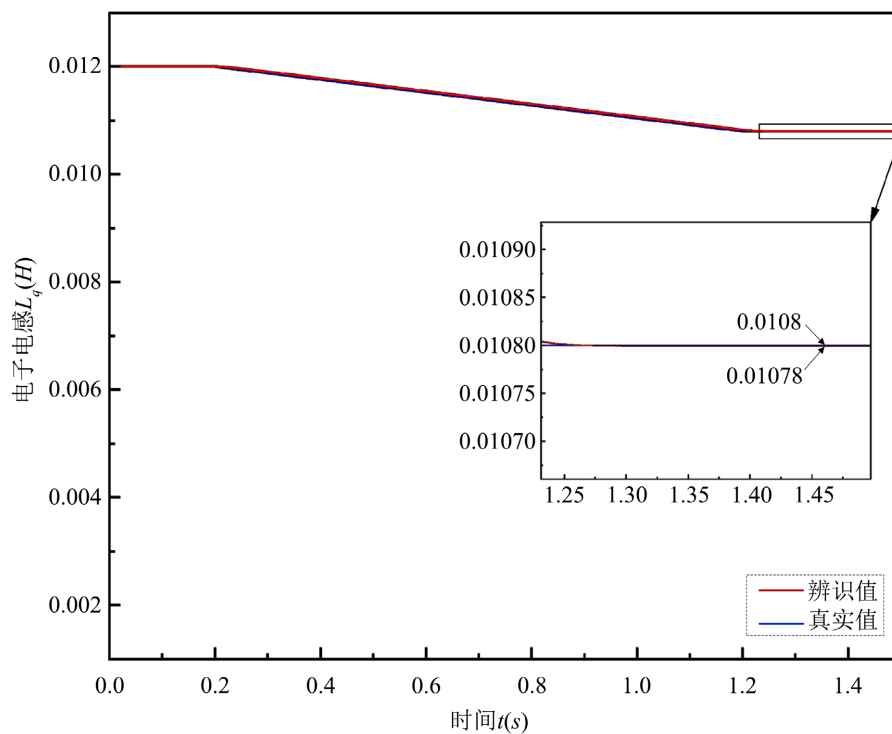


Figure 6. Stator inductance L_q identification waveform

图 6. 定子电感 L_q 辨识波形图

图 3~6 给出了四个参数的辨识仿真波形其中, 蓝色曲线表示参数真实值, 红色曲线表示 RLS 在线辨识值。各参数辨识结果如表 1 所示。

Table 1. The results of the four-parameter RLS online identification

表 1. 四参数 RLS 在线辨识结果

辨识参数	变化前真实值	变化后真实值	稳态辨识值	相对误差%
$R_s(\Omega)$	0.958	1.0538	1.0527	0.1
$\psi_f(\text{Wb})$	0.1827	0.16443	0.16444	0.01
$L_d(\text{H})$	0.00525	0.00468	0.00467	0.21
$L_q(\text{H})$	0.012	0.0108	0.01078	0.19

综上, 针对稳态激励不足和逆变器死区电压导致的辨识失准问题, 分别采用 d 轴电压激励注入和 SVPWM 内部死区补偿方法进行改进。仿真结果表明, 改进后的 RLS 在线辨识方法能够实现对 R_s 、 L_d 、 L_q 和 ψ_f 的有效估计。参数辨识值在暂态过程中虽存在一定波动, 但均能够在有限时间内收敛到真实值附近且稳态误差较小, 并为后续最优电流计算提供较为准确的参数基础。

5. 基于在线参数辨识的永磁同步电机最小损耗控制

5.1. 总体结构

前文已建立考虑铜损和铁损的永磁同步电机损耗模型，并推导了固定参数条件下的最优电流分配方法。然而在实际运行过程中，定子电阻、 d/q 轴电感以及永磁体磁链会随温升、磁饱和和运行工况变化而发生偏移。若最小损耗控制仍采用固定参数，则损耗模型与电机实际状态不一致，进而导致最优电流指令偏离真实最小损耗点。

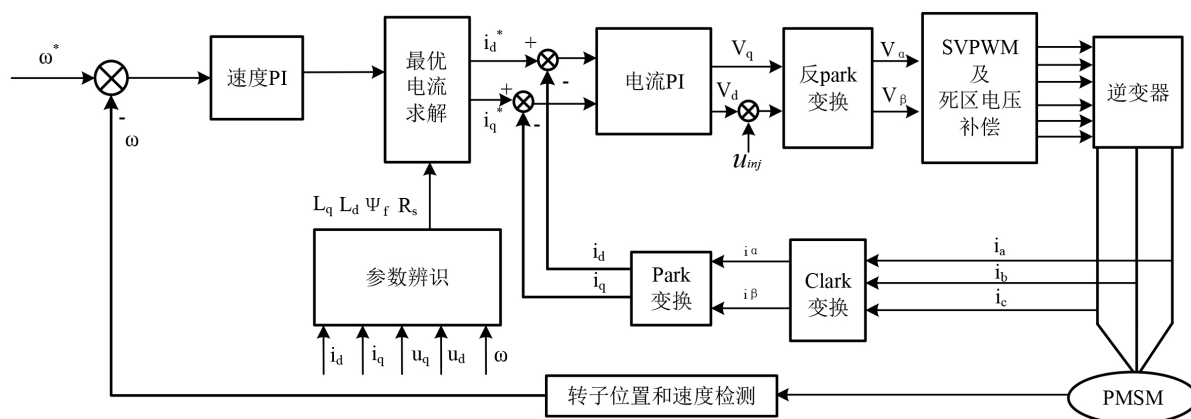


Figure 7. Block diagram of the minimum loss control system based on online parameter identification

图 7. 基于在线参数辨识的最小损耗控制系统结构图

为解决上述问题, 本文将 **RLS** 在线参数辨识模块引入最小损耗控制系统中。在每一个控制周期内, 参数辨识与最小损耗控制的融合过程如下: 首先, 采集电机运行过程中的电压、电流和转速信号, 并结合死区补偿后的电压信息构造参数辨识模型; 其次, 利用 **RLS** 算法得到当前时刻的电机参数估计值; 然

后,将辨识参数代入损耗模型,对铜损和铁损计算进行修正;最后,在满足给定转矩、电流幅值和电压输出能力约束的条件下,重新计算当前工况下的最优电流参考值 i_d^* 和 i_q^* 。通过上述过程,最小损耗控制器能够根据电机参数变化动态调整电流分配,使电流工作点尽可能接近实际最小损耗点,系统结构见图7。

5.2. 仿真结果与分析

为验证基于在线参数辨识的最小损耗控制方法的有效性,本文在Matlab/Simulink中搭建永磁同步电机矢量控制仿真模型,并分别对传统 $i_d=0$ 控制、固定参数最小损耗控制和基于在线参数辨识的最小损耗控制进行对比分析。三种控制方法采用相同的电机参数、转速给定、负载条件和电流环控制参数。其中,固定参数最小损耗控制始终采用电机初始参数计算最优电流;本文方法则将RLS在线辨识得到的参数实时用于损耗模型修正和最优电流求解。

Table 2. Simulation parameters of PMSM
表 2. 永磁同步电机仿真参数

参数	数值
极对数 P_n	4
定子电阻 R_s/Ω	0.958
d 轴电感 L_d/H	5.25e-3
q 轴电感 L_q/H	12e-3
永磁体磁链 ψ_f/Wb	0.1827
铁耗等效系数 k_{fe}	0.02

仿真条件设置如下:电机转速给定为1000 r/min,负载转矩为2 N·m,电机初始参数见表2。为模拟电机实际运行过程中温升、磁饱和和永磁体磁链衰减对参数的影响,在0.2 s后设置电机参数开始变化,变化持续时间为1 s。其中,定子电阻增大10%,d轴电感、q轴电感和永磁体磁链分别下降10%。该工况能够反映固定参数最小损耗控制在参数失配条件下可能出现的最优电流偏差问题。在上述仿真条件得到的结果如表3所示。

Table 3. Comparison of loss results of different methods
表 3. 不同方法的损耗结果对比

	i_{dref}/A	i_{qref}/A	P_{fe}/W	P_{cu}/W	P_{loss}/W
$i_d=0$ (参数为真实值)	0	2.613	120.59	9.81	130.40
最小损耗控制(参数为真实值)	-2.44	2.37	104.00	16.60	120.60
$i_d=0$ (参数变化后)	0	2.865	98.24	12.98	111.21
最小损耗控制(参数已变但未更新)	-2.44	2.37	87.44	29.80	117.24
在线参数辨识最小损耗控制	-1.94	2.73	87.70	17.70	105.40

由表 3 可知, 在参数未变化时, 对比 $i_d = 0$ 的控制策略, 最小损耗控制将电流由 $i_d = 0$ 、 $i_q = 2.613$ A 调整为 $i_d = -2.44$ A、 $i_q = 2.37$ A, 总损耗由 130.40 W 降低至 120.60 W, 降低约 7.52%。其中铁耗由 120.59 W 降低至 104.00 W, 说明最小损耗控制能够通过引入负 d 轴电流削弱等效磁链, 从而降低铁耗并实现总损耗下降。

当电机参数发生变化后, 若最小损耗控制参数未能及时更新, 仍采用原最优电流指令, 则总损耗为 117.24 W, 相比参数变化后的 $i_d = 0$ 控制反而增加约 5.42%, 说明参数失配会导致最优电流分配偏离当前实际最小损耗点。采用在线参数辨识后, 控制器将电流指令由 $i_d = -2.44$ A、 $i_q = 2.37$ A 调整为 $i_d = -1.94$ A、 $i_q = 2.73$ A, 总损耗降低至 105.40 W。与参数未更新的最小损耗控制相比, 总损耗降低约 10.10%; 与参数变化后的 $i_d = 0$ 控制相比, 总损耗降低约 5.22%。

6. 结论

本文针对永磁同步电机运行过程中参数变化导致最小损耗控制精度下降的问题, 提出了一种结合在线参数辨识的最小损耗控制方法。首先建立了考虑铜损和铁损的永磁同步电机 dq 轴数学模型, 并以总损耗最小为目标推导了最优 d、q 轴电流分配条件。在此基础上, 设计了候选解求解、可行域筛选和损耗评价相结合的最优电流求解方法。针对定子电阻、电感和永磁磁链随工况变化产生漂移的问题, 引入递推最小二乘法进行在线参数辨识, 并通过电压激励注入和死区电压补偿进行辅助处理。仿真结果表明, 所提方法能够有效跟踪电机关键参数变化, 并根据辨识结果实时修正最优电流给定, 从而提高损耗模型的准确性和电流分配的合理性, 为永磁同步电机的最小损耗控制提供了一种可行方案。

参考文献

- [1] Liu, J., Li, R., Liu, X., Cheng, J., Zheng, J. and Tan, B. (2024) Loss Minimization Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM) Based on Approximate Calculation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, **239**, 2361-2372. <https://doi.org/10.1177/09544070241244498>
- [2] Chen, Q., Hu, J., Lin, T., Fu, S. and Ren, H. (2025) Improved Loss Minimisation Control for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Loss Angle Optimisation. *IET Electric Power Applications*, **19**, e12541. <https://doi.org/10.1049/elp2.12541>
- [3] Chen, Z., Li, W., Shu, X., Shen, J., Zhang, Y. and Shen, S. (2021) Operation Efficiency Optimization for Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Improved Particle Swarm Optimization. *IEEE Access*, **9**, 777-788. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3047257>
- [4] 刘少博, 王高林, 王奇维, 等. 永磁同步电机参数在线辨识方法研究综述[J]. 东北电力大学学报, 2024, 44(3): 1-10, 130.
- [5] 王玉彬, 刘瀚文. 改进虚拟方波信号注入的内置式永磁同步电机最大转矩电流比控制策略[J]. 电工技术学报, 2025, 40(20): 6474-6486.
- [6] Dianov, A., Tinazzi, F., Calligaro, S. and Bolognani, S. (2022) Review and Classification of MTPA Control Algorithms for Synchronous Motors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **37**, 3990-4007. <https://doi.org/10.1109/tpe.2021.3123062>
- [7] Jung, B., Lee, J., Choi, J. and Kim, Y. (2026) Analytical Loss Minimization Control for IPMSM Using Linearized Torque and Loss Modeling. *IEEE Access*, **14**, 2224-2235. <https://doi.org/10.1109/access.2025.3596059>
- [8] Nabeshima, Y. and Hanamoto, T. (2024) Maximum Torque per Ampere Control Implemented Hardware System for Synchronous Reluctance Motor. 2024 27th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Fukuoka, 26-29 November 2024, 1905-1910. <https://doi.org/10.23919/icems60997.2024.10920925>
- [9] Ba, X., Sun, X., Gong, Z., Guo, Y., Zhang, C. and Zhu, J. (2023) A Generalized Per-Phase Equivalent Circuit Model of the PMSM with Predictable Core Loss. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **28**, 1512-1521. <https://doi.org/10.1109/tmech.2022.3227271>
- [10] Zhu, Z.Q., Liang, D. and Liu, K. (2021) Online Parameter Estimation for Permanent Magnet Synchronous Machines: An Overview. *IEEE Access*, **9**, 59059-59084. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3072959>
- [11] Yu, Y., Huang, X., Li, Z., Wu, M., Shi, T., Cao, Y., et al. (2022) Full Parameter Estimation for Permanent Magnet

-
- Synchronous Motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **69**, 4376-4386. <https://doi.org/10.1109/tie.2021.3078391>
- [12] Liu, S., Wang, Q., Wang, G., Li, B., Ding, D., Zhang, G., *et al.* (2023) Virtual-Axis Injection Based Online Parameter Identification of PMSM Considering Cross Coupling and Saturation Effects. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **38**, 5791-5802. <https://doi.org/10.1109/tpe.2023.3236031>
- [13] Yu, K. and Wang, Z. (2024) Online Decoupled Multi-Parameter Identification of Dual Three-Phase IPMSM under Position-Offset and HF Signal Injection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **71**, 3429-3440. <https://doi.org/10.1109/tie.2023.3273256>
- [14] 陈慧琴, 刘小俊. 基于准谐振滤波器的永磁同步电机死区补偿方法研究[J]. 电工技术, 2024(9): 43-47.
- [15] Liu, J. and Chen, H. (2024) Dead-Time Compensation for PMSM with Phase Shift of Impedance Considered Based on Adaptive Linear Neuron Method. *IET Electric Power Applications*, **18**, 1122-1130. <https://doi.org/10.1049/elp2.12463>