

# 考虑效率最大化的新型感应电机转子磁链给定\*

韦汉培<sup>1,2</sup>, 朱保鹏, 魏海峰<sup>1,2</sup>, 张懿,<sup>1</sup>

(1. 江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212003;

2. 江苏开璇智能科技有限公司, 江苏 苏州 215000)

**摘要:** 为提高感应电机(IM)运行效率,在考虑铁损数学模型的基础上,给出了高低转速工况下的电压电流约束条件,将保证损耗最小的最优转子磁链给定转化为在约束条件下的目标函数求最小值问题。通过定义广义 Lagrange 函数,结合 Kuhn-Tucker 定理分别求解出恒转矩区和恒功率区约束条件下的最优转子磁链给定,保证 IM 在整个工作范围内的效率最大化。试验结果验证了该方法的有效性。

**关键词:** 感应电机; 电压电流约束; 最优转子磁链给定; 效率最大化

中图分类号: TM 346 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)02-0081-05

## New Rotor Flux Reference of Induction Motor Considering Efficiency Maximization \*

WEI Hanpei<sup>1,2</sup>, ZHU Baopeng, WEI Haifeng<sup>1,2</sup>, ZHANG Yi<sup>1</sup>

(1. College of Electronics and Information Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China;

2. Jiangsu Kai Xuan Intelligent Technology Co., Ltd., Suzhou 215000, China)

**Abstract:** In order to improved the efficiency of induction motor (IM), on the basis of considering the iron loss mathematical model, voltage and current constraints at high and low speed conditions were given. The given of the optimal rotor flux linkage to ensure the smallest loss was transformed into the minimization of the objective function under constraint conditions. The generalized Lagrange function was defined, and the Kuhn-Tucker theorem was used to solve the optimal rotor flux linkage under constant torque region and constant power region, then IM efficiency was maximized in the entire working range. Simulation results verified the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** induction motor (IM); voltage and current constraints; given of optimal rotor flux linkage; efficiency maximization

## 0 引言

通常在感应电机(Induction Motor, IM)进行匹配时,为留有较为安全的裕量,往往选择容量较大的电机与之进行匹配,从而造成实际运行中电机过多地运行在轻载工况下。IM 的运行效率与其负载休戚相关,轻载工况下运行效率较低,因此对于长期处于轻载状态下的 IM 往往具有较大的节能空间。如何提高 IM 的运行效率引起国内外电机控制领域学者的广泛关注。

在降低 IM 损耗方面,主要有 3 个研究方向:(1)在电机设计方面,优化设计方案,开发节能型电机<sup>[1-2]</sup>;(2)在驱动器方面,进一步优化 PWM 控制,采用软开关技术降低功率模块损耗<sup>[3-4]</sup>;(3)在 IM 运行效率方面,优化控制策略,在输出功率不变的前提下,尽可能减小输入功率。如基于损耗模型的效率优化控制<sup>[5]</sup>、最小定子电流控制<sup>[6]</sup>及输入功率最小化在线搜索控制<sup>[7]</sup>等。Robert D Lorenz 等人<sup>[8]</sup>最早证明合理给定不同工况下的磁链水平有助于提高电机运行效率。文献

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61503161);江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2016073-01)

作者简介: 韦汉培(1992—),男,硕士研究生,研究方向为电机驱动控制。

魏海峰(1981—),男,博士,副教授,研究方向为电机驱动控制以及复杂控制系统。

[9]考虑到 IM 定转子铜耗和铁损,减小磁链搜索范围,改进黄金分割在线搜索,明显提高电机运行效率。文献[10]通过调节不同工况下的磁链水平来平衡感应电机的铁损和铜耗,达到能量消耗最小化。文献[11]结合无源性控制原理与端口受控 Hamilton 系统理论研究了考虑铁损的 IM 系统建模和控制问题,将 Hamilton 函数作为 Lyapunov 存储函数,提高系统稳定性。文献[12]将基于损耗模型的效率优化与直接转矩控制相结合,给定不同负载工况下的最优定子磁链,实现 IM 直接转矩控制下的效率最大化。文献[13]针对不同工况下转子磁链受参数扰动的问题,给出一种基于二叉树型分层神经网络的逐层预测模型,结合新型趋近律滑模变结构控制策略,保证不同工况下的效率最优。文献[14]针对效率寻优速度慢的问题,采用模糊技术以及前馈补偿方法提高搜索速度。A Amin 等人<sup>[15]</sup>使用粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 算法来评估最佳转子磁通水平,通过评估在任何工作点的最佳转子磁链获得电机的最大效率,同时改善了电磁转矩稳定性,保证了快速的动态响应。Masood Hajian 等人<sup>[16]</sup>提出新型基于模型的损耗最小化方法,将其与 IM 驱动器的逆向直接转矩控制相结合,同时引入用于效率优化的改进最优磁链搜索方法,在静止参考系中实现转子磁链和电磁转矩的快速跟踪。

本文给出 IM 高低转速工况下的电压电流约束条件,在此约束条件下求取总损耗目标函数最优值。通过定义广义 Lagrange 函数,结合 Kuhn-Tucker 定理分别求解出恒转矩区和恒功率区约束条件下的最优转子磁链给定,达到电机总损耗最小化的目的。试验结果显示该优化方法可以有效降低 IM 可控损耗。

### 1 电压电流约束条件

IM 运行过程可分为基速以下的恒转矩区域和基速以上的恒功率区域,其在运行过程中会受到电压及电流的约束。电压、电流受逆变器的输出电压等级及输出能力约束:

$$\begin{cases} u_{ds}^2 + u_{qs}^2 \leq u_{\max}^2 \\ i_{ds}^2 + i_{qs}^2 \leq i_{\max}^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u_{ds}$ 、 $u_{qs}$ ——电机定子电压在  $d$ 、 $q$  上的分量;

$i_{ds}$ 、 $i_{qs}$ ——定子电流在  $d$ 、 $q$  上的分量;

$u_{\max}$ ——逆变器额定电压,且  $u_{\max} = U_{dc}/\sqrt{3}$ , 其中  $U_{dc}$  为直流母线电压;

$i_{\max}$ ——逆变器最大输出电流,一般有  $i_{\max} = 1.5i_N$ 。

IM 定子电压方程为

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_1 \psi_{qs} + p\psi_{ds} \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_1 \psi_{ds} + p\psi_{qs} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $R_s$ ——定子电阻;

$\omega_1$ ——定子同步角速度;

$p$ ——微分算子;

$\psi_{ds}$ 、 $\psi_{qs}$ ——定子磁链在  $d$ 、 $q$  上的分量。

其中,

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $L_s$ ——电机绕组自感;

$L_m$ ——各绕组间的互感;

$i_{dr}$ 、 $i_{qr}$ ——转子电流在  $d$ 、 $q$  上的分量。

将式(3)代入式(2),可得

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} + p\psi_{ds} - \omega_1 (L_s i_{ds} + L_m i_{dr}) \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + p\psi_{qs} + \omega_1 (L_s i_{qs} + L_m i_{qr}) \end{cases} \quad (4)$$

按照磁场定向矢量控制,稳态时有

$$\begin{cases} i_{dr} = 0 \\ i_{qr} = -\frac{L_m}{L_r} i_{qs} \end{cases} \quad (5)$$

电机高速运行,忽略定子电阻压降,并且稳态时微分项为零,结合式(4)可得高速稳态运行下的  $u_{ds}$ 、 $u_{qs}$  表达式为

$$\begin{cases} u_{ds} = -\omega_1 \sigma L_s i_{qs} \\ u_{qs} = -\omega_1 L_s i_{ds} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\sigma$ ——定子漏感系数,且  $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ 。

将式(6)代入式(1),可得

$$(\omega_1 L_s i_{ds})^2 + (\omega_1 \sigma L_s i_{qs})^2 \leq u_{\max}^2 \quad (7)$$

根据式(1)和式(7),用圆和椭圆曲线分别表示电流和电压约束,如图1所示。根据式(7),随着电机转速的增加,电压约束椭圆半径逐渐减小与收缩,电压、电流约束随着转速工况的改变而变化。

### 2 最优转子磁链给定

基于上述 IM 在整个转速运行工况区域下的

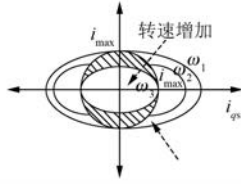


图1 不同转速工况下的电压、电流约束

电压、电流约束分析,将保证电机可控总损耗最小的转子磁链给定转化为在约束条件下求目标函数(可控总损耗)最小值问题:

$$\min P_{\text{loss}} = R_d(\omega_r) i_{ds}^2 + R_q(\omega_r) i_{qs}^2 + R_{dq}(\omega_r) i_{ds} i_{qs} \quad (8)$$

$$\text{其中, } R_d(\omega_r) = R_s + \frac{L_m^4 R_r \omega_r^2 + L_m^2 L_r^2 R_{Fe} \omega_r^2}{(L_r R_{Fe} + L_m R_r)^2},$$

$$R_q(\omega_r) = R_s + \frac{L_m^2 R_r R_{Fe}^2 + L_m^2 R_{Fe} R_r^2}{(L_r R_{Fe} + L_m R_r)^2},$$

$$R_{dq}(\omega_r) = \frac{2L_m^2 R_r R_{Fe} \omega_r}{(L_r R_{Fe} + L_m R_r)^2} (L_r - L_m)$$

且 \$R\_{Fe}\$ 为等效铁损电阻, \$R\_r\$ 为转子电阻, \$\omega\_r\$ 为转子角速度。其中电压电流约束条件为

$$\begin{cases} g_1(i_{ds}, i_{qs}) = (\omega_1 L_s i_{ds})^2 + (\omega_1 \sigma L_s i_{qs})^2 - u_{\text{max}}^2 \leq 0 \\ g_2(i_{ds}, i_{qs}) = i_{ds}^2 + i_{qs}^2 - i_{\text{max}}^2 \leq 0 \\ h(i_{ds}, i_{qs}) = T_e - \frac{pL_m^2 i_{ds}}{L_r R_{Fe} + L_m R_r} \\ (R_{Fe} i_{qs} - \omega_r L_m i_{ds}) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: \$p\$——极对数。

式(9)满足 Kuhn-Tucker 条件,定义广义 Lagrange 函数为

$$L(i, \lambda, u) = P_{\text{loss}}(i_{ds}, i_{qs}) + \mu_1 g_1(i_{ds}, i_{qs}) + \mu_2 g_2(i_{ds}, i_{qs}) + \lambda h(i_{ds}, i_{qs}) \quad (10)$$

式中: \$\lambda, \mu\_1, \mu\_2\$——Lagrange 乘子,且 \$\mu\_1 > 0, \mu\_2 > 0\$。

集合 \$S =

$$\left( \begin{array}{l} (\omega_1 L_s i_{ds})^2 + (\omega_1 \sigma L_s i_{qs})^2 - u_{\text{max}}^2 \leq 0 \\ i_{ds}^2 + i_{qs}^2 - i_{\text{max}}^2 \leq 0 \\ T_e - \frac{pL_m^2 i_{ds}}{L_r R_{Fe} + L_m R_r} (R_{Fe} i_{qs} - \omega_r L_m i_{ds}) = 0 \end{array} \right) \quad (11)$$

为可行域。根据 Kuhn-Tucker 定理,可控总损耗最优解通过下列方程解出:

$$\begin{cases} \frac{\partial L(i, \lambda, u)}{\partial i_{ds}} = (2R_d + 2u_1 \omega_1 L_s + 2u_2) i_{ds} + R_{dq} i_{qs} - \lambda \frac{pL_m^2 (R_{Fe} i_{qs} - 2\omega_r L_m i_{ds})}{L_r R_{Fe} + L_m R_r} = 0 \\ \frac{\partial L(i, \lambda, u)}{\partial i_{qs}} = (2R_q + 2u_1 \sigma \omega_1 L_s + 2u_2) i_{qs} + R_{dq} i_{ds} - \lambda \frac{pL_m^2 R_{Fe} i_{ds}}{L_r R_{Fe} + L_m R_r} = 0 \\ T_e - \frac{pL_m^2 i_{ds}}{L_r R_{Fe} + L_m R_r} (R_{Fe} i_{qs} - \omega_r L_m i_{ds}) = 0 \\ u_1 [(\omega_1 L_s i_{ds})^2 + (\omega_1 \sigma L_s i_{qs})^2 - u_{\text{max}}^2] = 0 \\ u_2 (i_{ds}^2 + i_{qs}^2 - i_{\text{max}}^2) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

根据最优解分布位置可分两种情况分别讨论:

(1) 恒转矩区域(\$\omega\_r \le \omega\_N\$)电机运行于内点,不受电压、电流约束,即满足 \$\mu\_1 = \mu\_2 = 0\$,结合式(12),可得

$$\begin{cases} 2R_d i_{ds} - R_{dq} i_{qs} - \lambda \frac{pL_m^2 (R_{Fe} i_{qs} - 2\omega_r L_m i_{ds})}{L_r R_{Fe} + L_m R_r} = 0 \\ 2R_q i_{qs} - R_{dq} i_{ds} - \lambda \frac{pL_m^2 R_{Fe} i_{ds}}{L_r R_{Fe} + L_m R_r} = 0 \\ T_e - \frac{pL_m^2 i_{ds}}{L_r R_{Fe} + L_m R_r} (R_{Fe} i_{qs} - \omega_r L_m i_{ds}) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

解得

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{\sqrt[4]{\left[ R_r + \frac{R_r^2}{R_{Fe}} + R_s \left( \frac{L_r}{L_m} + \frac{R_r}{R_{Fe}} \right)^2 \right]}}{\sqrt{\frac{R_s}{L_m^2} + \frac{\omega_r^2}{R_{Fe}^2} R_s + \frac{\omega_r^2}{R_{Fe}}}} \sqrt{\frac{T_e}{pL_m^2}} \\ i_{qs} = \frac{\sqrt[4]{\frac{R_s}{L_m^2} + \frac{\omega_r^2}{R_{Fe}^2} R_s + \frac{\omega_r^2}{R_{Fe}}}}{\sqrt{R_r + \frac{R_r^2}{R_{Fe}} + R_s \left( \frac{L_r}{L_m} + \frac{R_r}{R_{Fe}} \right)^2}} \sqrt{\frac{T_e}{pL_m^2}} \\ \left( \frac{L_r}{L_m} + \frac{R_r}{R_{Fe}} \right) \frac{\sqrt[4]{\left[ R_r + \frac{R_r^2}{R_{Fe}} + R_s \left( \frac{L_r}{L_m} + \frac{R_r}{R_{Fe}} \right)^2 \right]}}{\sqrt{\frac{R_s}{L_m^2} + \frac{\omega_r^2}{R_{Fe}^2} R_s + \frac{\omega_r^2}{R_{Fe}}}} \sqrt{\frac{T_e}{p}} \frac{\omega_r}{R_{Fe}} \end{cases} \quad (14)$$

相应地,最优转子磁链给定为

$$\psi_{rL}^{op} = \sqrt[4]{\frac{\left[ R_r + \frac{R_r^2}{R_{Fe}} + R_s \left( \frac{L_r}{L_m} + \frac{R_r}{R_{Fe}} \right)^2 \right]}{\frac{R_s}{L_m^2} + \frac{\omega_r^2}{R_{Fe}^2} R_s + \frac{\omega_r^2}{R_{Fe}}}} \sqrt{\frac{T_e}{p}} \quad (15)$$

根据式(15)可知,转速一定,可控损耗最小点对应的最优转子磁链随负载转矩的增大而增大;负载转矩一定,可控损耗最小点对应的最优转子磁链随转速的升高而降低。

(2) 恒功率区域 ( $\omega_r > \omega_N$ ) 电机运行于圆外,同时受到电压和电流的约束,此时  $\lambda \neq 0, \mu_1 \neq 0$  且  $\mu_2 \neq 0$ , 结合式(12), 可得

$$\begin{cases} (2R_d + 2u_1\omega_1L_s + 2u_2)i_{ds} + R_{dq}i_{qs} - \lambda \frac{pL_m^2(R_{Fe}i_{qs} - 2\omega_rL_m i_{ds})}{L_rR_{Fe} + L_mR_r} = 0 \\ (2R_q + 2u_1\sigma\omega_1L_s + 2u_2)i_{qs} + R_{dq}i_{ds} - \lambda \frac{pL_m^2R_{Fe}i_{qs}}{L_rR_{Fe} + L_mR_r} = 0 \\ T_e - \frac{pL_m^2i_{ds}}{L_rR_{Fe} + L_mR_r} (R_{Fe}i_{qs} - \omega_rL_m i_{ds}) = 0 \\ u_1 [(\omega_1L_s i_{ds})^2 + (\omega_1\sigma L_s i_{ds})^2 - u_{max}^2] = 0 \\ u_2 (i_{ds}^2 + i_{qs}^2 - i_{max}^2) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

解得

$$\begin{cases} i_{ds} = \sqrt{\frac{(\mu_{max}/\omega_1)^2 - (\sigma L_s i_{max})^2}{L_s^2(1 - \sigma^2)}} \\ i_{qs} = \sqrt{\frac{(\sigma L_s i_{max})^2 - (\mu_{max}/\omega_1)^2}{L_s^2(1 - \sigma^2)}} \end{cases} \quad (17)$$

相应地,最优转子磁链给定为

$$\psi_{rH}^{op} = L_m \sqrt{\frac{(\mu_{max}/\omega_1)^2 - (\sigma L_s i_{max})^2}{L_s^2(1 - \sigma^2)}} \quad (18)$$

实际运行中,IM 转子磁链给定还需考虑磁链上下限的限制。转子给定磁链过低,电磁转矩输出能力受限,不利于电机的快速动态响应,在此选取转子磁链给定下限值  $\psi_{rmin} = 0.1\psi_N$ ;电机运行在低速高转矩下,损耗最小点对应的最优转子磁链大于额定值,并且其在忽略磁链饱和的情况下求解得出,为获得较高的磁链,增加定子励磁电流分量  $i_{ds}$ , 使得铜耗增加,影响优化控制效果,在此选

取转子磁链给定上限值  $\psi_{rmin} = 1.1\psi_N$ 。

综上所述,IM 效率优化控制在整个工作范围内的转子磁链给定为

$$\psi_r^{op*} = \begin{cases} \psi_{rmin}^{op} (\psi_r^{op} \leq \psi_{rmin}^{op}) \\ \psi_{rL}^{op} (\psi_{rmin}^{op} < \psi_r^{op} < \psi_{rH}^{op}) \\ \psi_{rH}^{op} (\psi_{rH}^{op} < \psi_r^{op} < \psi_{rmax}^{op}) \\ \psi_{rmax}^{op} (\psi_r^{op} \geq \psi_{rmax}^{op}) \end{cases} \quad (19)$$

### 3 试验结果及分析

在 IM 交流调速平台上,对上述磁链给定方法进行了试验验证,试验电机参数如表 1 所示。

表 1 试验电机参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
$R_s/\Omega$	0.477	$R_r/\Omega$	0.893
$L_s/mH$	9	$L_r/mH$	9
$L_m/mH$	95	$L_t/mH$	104
$\psi_N/Wb$	0.63	$R_{Fe}/\Omega$	82.5
$J/(kg \cdot m^2)$	0.022	$p$	2
$P_N/kW$	2.2	$T_N/(N \cdot m)$	14.6

为保证系统稳定性,在电机启动时,仍采用传统的恒磁链控制方式,当电机达到稳定时,引入效率优化控制。试验分为两部分。

(1) 转速恒定,给定转矩突变下的性能参数,如图 2 所示。给定电机转速 1 000 r/min,初始给定空载负载转矩,在 3 s 时刻引入效率优化控制,6 s 时刻给定电机额定负载转矩。由性能参数曲线可知,引入效率优化控制后,电机运行效率提高约 15%,转矩电流几乎不受影响。在给定额定负载转矩后,转矩电流迅速增加,但效率几乎不变。

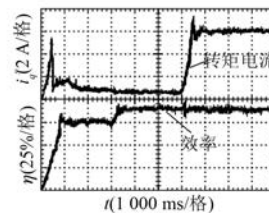


图 2 给定负载突变工况下的性能响应

(2) 转矩恒定,给定转速突变下的各类性能参数。如图 3 所示,给定电机额定负载转矩,初始转速给定 500 r/min,3 s 时刻引入效率优化控制,6 s 时刻给定转速 1 500 r/min。由性能参数曲线可知,引入效率优化控制后,电机运行效率提高约

25%, 并且运行效率几乎不受转速突变的影响。

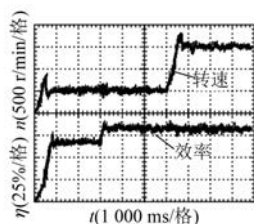


图3 给定转速突变工况下的性能响应

## 4 结 语

(1) 本文提出一种损耗模型下基于最优转子磁链给定的 IM 效率优化控制方法。它将保证可控总损耗最小的最优转子磁链给定转化为约束条件下的目标函数求值问题, 通过 Kuhn-Tucker 定理得出约束条件下的最优转子磁链给定, 保证 IM 的效率最大化运行。

(2) 以 1 台 2.2 kW IM 为对象进行试验研究, 以更为直观的方式使得效率优化控制法在不同转矩和转速工况下的效率优势得以表现。该方法在长期处于轻载工况或者负载范围变化较大的工况 IM 驱动系统中有着广泛的应用前景。

### 【参 考 文 献】

- [ 1 ] TERZIC M V, MIHIC D S, VUKOSAVIC S N. Impact of rotor material on the optimal geometry of high-speed dragcup induction motor [ J ]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31 ( 2 ): 455-465.
- [ 2 ] RAVANJI M H, NASIRI G Z. Design optimization of a ladder secondary single-sided linear induction motor for improved performance [ J ]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(4) : 1595-1603.
- [ 3 ] EDPUGANTI A, RATHORE A K. New optimal pulsewidth modulation for single DC-link dual-inverter fed open-end stator winding induction motor drive [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(8) : 4386-4393.
- [ 4 ] EDPUGANTI A, RATHORE A K. Optimal low-switching frequency pulsewidth modulation of medium voltage seven-level cascade-5/3H inverter [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30 ( 1 ): 496-503.
- [ 5 ] ALEXANDRIDIS A T, KONSTANTOPOULOS G C, ZHONG Q C. Advanced integrated modeling and

analysis for adjustable speed drives of induction motors operating with minimum losses [ J ]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30 ( 3 ): 1237-1246.

- [ 6 ] MARTIN C, ARAHAL M, BARRERO F, et al. Five-phase induction motor rotor current observer for finite control set model predictive control of stator current [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 38(2) : 1438-1449.
- [ 7 ] TA C M, HORI Y. Convergence improvement of efficiency-optimized control of induction drives [ J ]. IEEE Transactions on Applications, 2013, 37 ( 6 ): 1746-1753.
- [ 8 ] LORENZ R D, YANG S M. Efficiency-optimized flux trajectories for closed-cycle operation of field-orientation induction machine drives [ J ]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1992, 28(3) : 574-580.
- [ 9 ] 张承慧, 崔纳新, 李珂, 等. 电动汽车感应电机驱动系统效率优化控制 [ J ]. 控制理论与应用, 2006, 23 ( 5 ): 773-778.
- [ 10 ] 李珂, 张承慧, 崔纳新. 考虑铁损的电动汽车用感应电机矢量控制及其能量优化策略 [ J ]. 控制理论与应用, 2007, 24(6) : 959-968.
- [ 11 ] 裴文卉, 张承慧, 李珂, 等. 计及铁损时电动汽车用感应电机的 Hamilton 建模及无源控制 [ J ]. 控制理论与应用, 2011, 28(6) : 869-873.
- [ 12 ] 张兴华, 孙振兴, 王德明. 电动汽车用感应电机直接转矩控制系统的效率最优控制 [ J ]. 电工技术学报, 2013, 28(4) : 255-260.
- [ 13 ] 苗敬利, 黄远. 基于逐层预测模型的感应电机效率优化滑模控制 [ J ]. 电工技术学报, 2014, 29(3) : 206-212.
- [ 14 ] 徐占国, 邵诚. 基于模糊技术感应电机最大效率控制策略的研究 [ J ]. 控制与决策, 2009, 24(5) : 743-748.
- [ 15 ] AMIN A, KORFALLY M I E, SAYED A A, et al. Efficiency optimization of two-asymmetrical-winding induction motor based on swarm intelligence [ J ]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 24 ( 1 ): 12-20.
- [ 16 ] HAJIAN M, SOLTANI J, MARKADEH G A, et al. Adaptive nonlinear direct torque control of sensorless IM drives with efficiency optimization [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 57(3) : 975-985.

收稿日期: 2017-05-17