

# 感应电机基于最大转矩输入功率比的能效优化

梁宗伟,夏加宽,张子璇,龙宇航,何显平,齐美钧

(沈阳工业大学 电气工程学院,辽宁 沈阳 110870)

**摘要:**对于感应电机运行在非额定条件下能效不高的问题,在损耗模型的基础上,结合MTPA弱磁控制策略,提出了一种新型的损耗功率最小化方法。所提出的方法称为最大转矩输入功率比(MTPIP)方法,即在恒转矩的情况下保证输入功率的最小化。其原理是首先计算转矩向量和输入功率向量的梯度,当这两个向量平行即梯度为零时,转矩输入功率的比值达到最大。为了将新方法应用于感应电机的转子磁场定向矢量控制系统中,还设计了基于损耗模型的电压解耦方式和磁通观测器。所提出的方法既保留了损耗模型法和MTPA弱磁控制策略的优点,又实现了感应电机的高能效运行。仿真实验结果表明,MTPIP方法能在不影响矢量控制系统动态性能的基础上实现感应电机能效优化。

**关键词:**最大转矩输入功率比;能效优化;感应电机;矢量控制

**中图分类号:**TM464 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd20864

## Energy Efficiency Optimization of Induction Motor Based on Maximum Torque per Input Power

LIANG Zongwei, XIA Jiakuan, ZHANG Zixuan, LONG Yuhang, HE Xianping, QI Meijun

(School of Electric and Engineering, Shenyang University of Technology,  
Shenyang 110870, Liaoning, China)

**Abstract:** For the problem of low energy efficiency of induction motor running under non-rated conditions, based on the loss model and maximum torque per ampere (MTPA) weak magnetic control strategy, a novel loss power minimization method namely maximum torque per input power (MTPIP) was proposed, which could guarantee the minimization of input power under constant torque. The principle was to calculate the gradient of the torque vector and the input power vector firstly, when the two vectors were parallel, namely the gradient was equal to zero, the ratio of torque input power was maximized. In order to apply the novel method to the rotor field oriented vector control system of induction motor, a voltage decoupling method and a flux observer were designed based on loss model. The proposed method not only could retain the advantages of the loss model method and weak magnetic control strategy with MTPA, but also realize the high energy-efficient operation of the induction motor. The simulation results show that MTPIP can realize the energy efficiency optimization of induction motor without affecting the dynamic performance of vector control system.

**Key words:** maximum torque per input power (MTPIP); energy efficiency optimization; induction motor; vector control

工业和农业生产中大部分的负载由感应电机拖动,在工业部门中,超过70%的能量由感应电机转化为机械能,感应电机效率提升带来的节能效果和环境效益也非常可观<sup>[1]</sup>。此外,近年来电能成本的增加,愈加重视电机的能效运行。设计和研制高能效的电机可以替代传统低效电机进行生产<sup>[2-3]</sup>,而高能效电机的设计和制造只考虑额定运行,忽略了电机负载变化的情况。因此,

即使应用高效的电机,在运行的过程中仍有较高的功率被损耗<sup>[4]</sup>。电机损耗的2个主要组成部分即铜损耗和铁损耗之间的不平衡,是电机运行过程中产生损耗的主要原因<sup>[5]</sup>。因此,电机能效优化控制策略的研究是非常必要的。

电机能效优化的原理主要有两种。一种是选择最优磁通来重建铜、铁损耗之间的平衡,据此原理提出了两种控制策略:基于损耗模型的损

耗模型控制方法(loss model controller, LMC)和基于输入功率在线搜索控制(search controller, SC)<sup>[6-7]</sup>方法。LMC通过导出电机的损耗模型,分析电机效率与最优磁通值的函数关系,由该函数决定最优磁通的给定,从而实现电机的损耗最小化。损耗模型法需要精确的电机参数,以电机效率为优化目标,只能实现损耗功率的部分最小化,并非能效最优。SC是当电机的负载一定时,将励磁的给定作为控制参数,按一定的步长变化,直到输入功率最小化为止。SC需要监测输入功率、选择步长以及反复调整励磁给定,存在效果不佳、实现困难等缺点。另一种则是通过重新分配*d, q*轴的电流分量,来重建铜、铁损耗之间的平衡,提出了最大转矩电流比(maximum torque per ampere, MTPA)的控制策略。MTPA在电机模型的基础上,解析转矩与*d, q*轴电流的函数关系,以一定负载转矩情况下电流最小化即转矩电流比最大化为目标,重新分配*d, q*轴的电流,实现电机能效优化的目的<sup>[8-9]</sup>。然而, MTPA忽略了铁损耗的存在,电机的运行状态并非能效最优。

综合这些方法的优点,提出了一种基于考虑铁损耗的数学模型进行分析,以一定负载转矩条件下输入功率最小化为目标,重新分配*d, q*轴电流,减小电机损耗进而实现电机的能效优化方法,称之为最大转矩输入功率比(maximum torque per input power, MTPIP)。结合转子磁场定向,将新方法应用于感应电机的矢量控制系统中。考虑铁损耗电阻会导致电压解耦和磁链观测器产生误差,重新设计了考虑铁耗的电压解耦方法和转子磁链观测器。

## 1 MTPIP控制策略的提出

### 1.1 感应电机考虑铁耗的动态数学模型

传统的感应电机动态数学模型忽略铁耗的影响,仅以互感电感并联表示励磁支路。建立考虑铁损耗的数学模型,有将铁损耗电阻与互感电感串联或者并联的方式<sup>[10-11]</sup>。文献[12]指出,若采用串联的方式,会得到*i<sub>rd</sub>≠0*的结论,不符合转子磁场定向的原理,且并联的方式更能反映电机损耗的变化规律。在*d-q*坐标系中,感应电机考虑铁耗的动态数学模型如下<sup>[13]</sup>。

电流方程:

$$\begin{cases} i_{Lmd} + i_{Rmd} = i_{sd} + i_{rd} \\ i_{Lmq} + i_{Rmq} = i_{sq} + i_{rq} \end{cases} \quad (1)$$

电压方程:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + p \Psi_{sd} - \omega_1 \Psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + p \Psi_{sq} + \omega_1 \Psi_{sd} \\ u_{rd} = 0 = R_r i_{rd} + p \Psi_{rd} - \omega_{sl} \Psi_{rq} \\ u_{rq} = 0 = R_r i_{rq} + p \Psi_{rq} + \omega_{sl} \Psi_{rd} \\ R_m i_{Rmd} = L_m p i_{Lmd} - \omega_1 L_m i_{Lmq} \\ R_m i_{Rmq} = L_m p i_{Lmq} + \omega_1 L_m i_{Lmd} \end{cases} \quad (2)$$

磁链方程:

$$\begin{cases} \Psi_{sd} = L_{ls} i_{sd} + L_m i_{Lmd} \\ \Psi_{sq} = L_{ls} i_{sq} + L_m i_{Lmq} \\ \Psi_{rd} = L_{lr} i_{rd} + L_m i_{Lmd} \\ \Psi_{rq} = L_{lr} i_{rq} + L_m i_{Lmq} \end{cases} \quad (3)$$

电磁转矩:

$$T_e = n_p \frac{L_m}{L_r} [\Psi_{rd} (i_{sq} - i_{Rmq}) - \Psi_{rq} (i_{sd} - i_{Rmd})] \quad (4)$$

式中:*p*为微分算子; $\omega_1$ 为同步转速; $\omega_{sl}$ 为转差;*R<sub>s</sub>, R<sub>r</sub>, R<sub>m</sub>*分别为定、转子电阻及铁耗电阻;*L<sub>s</sub>, L<sub>m</sub>*分别为转子自感及互感;*L<sub>ls</sub>, L<sub>lr</sub>*分别为定、转子漏感;*i<sub>sd</sub>, i<sub>sq</sub>, i<sub>rd</sub>, i<sub>rq</sub>*分别为*d, q*轴的定、转子电流;*i<sub>Rmd</sub>, i<sub>Rmq</sub>*分别为*d, q*轴铁耗等效电流;*i<sub>Lmd</sub>, i<sub>Lmq</sub>*分别为*d, q*轴励磁电流;*u<sub>sd</sub>, u<sub>sq</sub>*分别为*d, q*轴定子电压; $\Psi_{sd}, \Psi_{sq}, \Psi_{rd}, \Psi_{rq}$ 分别为定、转子*d, q*轴磁链;*n<sub>p</sub>*为电机极对数。

考虑铁损耗的动态数学模型中,铁损耗电流为新的电机矢量,与定子电流耦合,为将转矩和输入功率用定子电流表示,需要先解耦。

当电机处于稳态运行并且转子磁场定向时,有: $\Psi_{rq}=0$ 和*p=0*,代入电机的数学方程中,可得:

$$\begin{cases} i_{Rmd} = -\frac{\omega_1 L_m i_{Lmq}}{R_m} \\ i_{Rmq} = \frac{\omega_1 L_m i_{Lmd}}{R_m} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} i_{Lmd} - \frac{\omega_1 L_m}{R_m} i_{Lmq} = i_{sd} \\ \frac{L_r}{L_{lr}} i_{Lmq} + \frac{\omega_1 L_m}{R_m} i_{Lmd} = i_{sq} \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)得励磁电流关于定子电流的表达式:

$$\begin{cases} i_{Lmq} = B (i_{sq} - \frac{\omega_1 L_m}{R_m} i_{sd}) \\ i_{Lmd} = B (\frac{\omega_1 L_m}{R_m} i_{sq} + \frac{L_r}{L_{lr}} i_{sd}) \end{cases} \quad (7)$$

其中  $\frac{1}{B} = [\frac{L_r}{L_{lr}} + (\frac{\omega_1 L_m}{R_m})^2]$

由式(7)可以发现,经过解耦后,励磁电流和铁损耗电流可由定子电流表示,为后文能效优化控制

策略的提出奠定基础。

### 1.2 MTPIP控制策略

MTPIP控制策略为在恒定负载转矩的约束条件下,实现输入功率最小化的控制策略。因此,选择输入功率为优化目标。基于拉格朗日定理,可以发现,当转矩曲线和优化目标在某点处相切时,即梯度向量平行时,电机的能效达到最优。在输出功率一定时,使输入功率最小化来实现能效最优。MTPIP控制策略需用定子电流表示转矩和输入功率。将式(6)代入转矩方程,得到转矩与 $i_{Lmd}, i_{Lmq}$ 的关系式:

$$T_e = n_p \left(\frac{L_m}{L_{lr}}\right)^2 \frac{R_r}{\omega_{sl}} i_{Lmd} i_{Lmq} = A \cdot i_{Lmd} i_{Lmq} \quad (8)$$

其中 
$$A = n_p \left(\frac{L_m}{L_{lr}}\right)^2 \frac{R_r}{\omega_{sl}}$$

感应电机的输入功率 $P_{input}$ 可以表示为

$$P_{input} = u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq} \quad (9)$$

定子电压又可以表示为

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_1 (L_{ls} i_{sq} + L_m i_{Lmq}) \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_1 (L_{ls} i_{sd} + L_m i_{Lmd}) \end{cases} \quad (10)$$

于是输入功率为

$$P_{input} = R_s i_{sd}^2 + R_s i_{sq}^2 - \omega_1 L_m i_{Lmq} i_{sd} + \omega_1 L_m i_{Lmd} i_{sq} \quad (11)$$

根据式(7)、式(8)可以在 $i_{sd} - i_{sq}$ 平面上画出考虑铁耗的转矩方程。在同一平面上,根据式(11)得到输入功率的曲线,如图1所示。恒转矩条件下,若工作点为 $a$ ,曲线A为恒转矩下输入功率的曲线( $P_{input}, a$ ),若工作点为 $b$ ,则曲线B为另一条恒转矩下输入曲线( $P_{input}, b$ )。根据拉格朗日定理,可以发现,两条曲线相切时( $\nabla T_e$ 和 $\nabla P_{input}$ 平行),输入功率最小(参见图1中的 $b$ 点)。

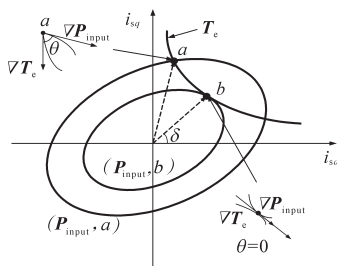


图1  $i_{sd} - i_{sq}$ 平面上转矩曲线和输入功率曲线

Fig.1 Torque curves and input power curves on the  $i_{sd} - i_{sq}$  plane

$\nabla T_e$ 和 $\nabla P_{input}$ 平行,即当且仅当:

$$\frac{\partial T_e}{\partial i_{sd}} \cdot \frac{\partial P_{input}}{\partial i_{sq}} - \frac{\partial T_e}{\partial i_{sq}} \frac{\partial P_{input}}{\partial i_{sd}} = 0 \quad (12)$$

计算转矩和输入功率对 $d, q$ 轴电流的偏导并代入式(12),且令 $X = i_{sd}/i_{sq}$ ,简化得:

$$k_1 X^2 + k_2 X + k_3 = 0 \quad (13)$$

其中

$$k_1 = \left(\frac{L_r}{L_{lr}} - \frac{\omega_1 L_m}{R_m}\right) + \frac{4\omega_1 L_{lr}}{B} \left(\frac{1}{R_m}\right)^2 \left[R_s + B \frac{(\omega_1 L_m)^2}{R_m}\right]$$

$$k_2 = 2 \frac{\omega_1 L_m}{R_m} + \left(\frac{\omega_1 L_m}{R_m}\right)^2$$

$$k_3 = \frac{4}{R_m L_m} \frac{L_{lr}}{B} \left[R_s + B \frac{(\omega_1 L_m)^2}{R_m}\right] - \left(\frac{L_r}{L_{lr}} - \frac{\omega_1 L_m}{R_m}\right)$$

由式(13)可以看出,最大转矩输入功率比与 $d, q$ 轴电流的比例系数 $X$ 相关,MTPIP能效优化的实质,为对 $d, q$ 轴电流分量的分配。而 $i_{sq}$ 为转矩分量,不宜调整; $i_{sd}$ 为励磁分量,因此通过调整 $i_{sd}$ ,可以实现感应电机的能效优化。式(13)的解为

$$X = \frac{-k_2 + \sqrt{k_2^2 - 4k_1 k_3}}{2k_1} \quad (14)$$

由于电机空载时, $q$ 轴电流非常小,导致计算的 $i_{sd}$ 近似为零,需要限制 $i_{sd}$ 的最小值 $I_1$ ,同理,电机重载时会超过额定值 $I_2$ ,于是 $i_{sd}$ 的给定为

$$i_{sd} = \begin{cases} I_1 & T_L = 0 \\ X \cdot i_{sq} & T_L > 0 \\ I_2 & X \cdot i_{sq} \geq I_2 \end{cases} \quad (15)$$

## 2 考虑铁耗的矢量控制系统

### 2.1 考虑铁耗的电压解耦方法及磁链观测器

感应电机驱动系统采用电压源型逆变器,需要将 $d, q$ 轴的控制量——电流转换成电压的控制量,而 $d, q$ 轴电压之间存在耦合<sup>[14]</sup>。文献[15]提出了一种解耦方法,并未考虑铁损耗,根据式(7)、式(10)可以得到新的解耦方法。

设置 $u_{sd-pu}, u_{sq-pu}$ 为电压解耦补偿,则

$$\begin{cases} u_{sd-pu} = -\omega_1 (L_{ls} i_{sq} + L_m i_{Lmq}) \\ u_{sq-pu} = \omega_1 (L_{ls} i_{sd} + L_m i_{Lmd}) \end{cases} \quad (16)$$

由于铁损耗 $R_m$ 的磁通观测器会不可避免地产生误差,进而会影响到系统的控制性能。为了解决这个问题,需重新设计考虑 $R_m$ 的磁通观测器。结合式(11)与电机的数学方程可得:

$$\begin{cases} \Psi_{rd} = L_m i_{Lmd} \\ \omega_{sl} = \frac{L_m R_r}{L_{ls} \Psi_{rd}} i_{Lmq} \end{cases} \quad (17)$$

转差计算为

$$\omega_{sl} = \frac{R_r}{L_{lr}} \frac{i_{sq} - \frac{\omega_1 L_m}{R_m} i_{sd}}{\frac{\omega_1 L_m}{R_m} i_{sq} + \frac{L_r}{L_{lr}} i_{sd}} \quad (18)$$

MTPIP 能效优化控制策略与矢量控制系统相结合,系统原理示意如图2所示。

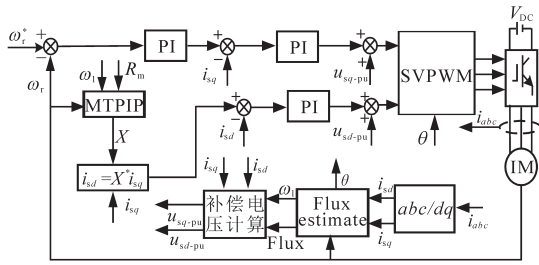


图2 基于MTPIP的感应电机矢量控制系统原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of induction motor vector control system based on MTPIP

在图2中,转速作为系统的给定,与实际值做差后,经转速PI调节器,输出q轴电流给定,与定子电流解耦后的q轴电流实际值求差后,经转矩PI控制器得到q轴电压的给定。将转速实际值、计算的 $\omega_1$ 和铁损耗电阻 $R_m$ 输入MTPIP中,计算比例系数 $X$ , $X$ 与q轴电流实际值相乘,得到励磁电流的给定,经励磁PI调节器后,得到d轴电压给定。SVPWM根据电压给定,输出逆变器的驱动信号,逆变器输出正弦电流驱动电机,使得电机达到设定的运行状态。补偿电压可根据式(7)、式(16)计算,磁通观测器可以根据式(17)以及式(18)设计。

### 2.2 控制系统的仿真模型

根据图2中设计的系统控制原理图,在Simulink仿真平台上搭建控制系统的仿真模型。模型库中没有考虑铁损耗的感应电机仿真模型,需要根据上文中提出的数学模型自行搭建,仿真模型如图3所示。以一台7.5 kW的感应电机为例,验证MTPIP控制策略的能效优化效果。

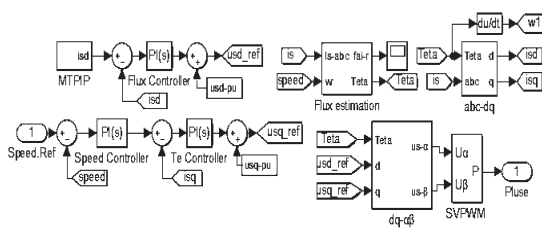


图3 基于MTPIP的矢量控制系统仿真模型

Fig.3 The simulation model of vector control system based on MTPIP

仿真模型中电机参数设置为: $P_N=7.5$  kW,  $U_N=380$  V,  $R_m=46.63$   $\Omega$ ,  $J=0.05$  kg·m<sup>2</sup>,  $n_p=2$ ,  $R_s=0.332$   $\Omega$ ,  $R_r=0.153$   $\Omega$ ,  $L_{ls}=0.001$  H,  $L_{lr}=0.001$  H,  $L_m=0.0615$  H; PI控制器的参数设置如表1所示。

表1 控制器的PI参数表

Tab.1 PI parameter table of the control system

	$K_p$	$K_i$
Flux Controller	1 000	10
Speed Controller	2.5	10
Te Controller	618	200

### 3 仿真结果及其分析

图4、图5分别为转速、转矩的仿真结果。分析图4、图5仿真波形可知:电机快速启动并达到稳态时,转速达到给定值,当转矩给定发生改变时,仍能保持为给定值;当电机转速的给定发生了改变,电机的运行状态发生改变,输出转矩受到影响产生突变,但因为转矩给定不变,输出转矩立刻恢复到给定值。由此可见,考虑铁损耗的矢量控制系统具有抗干扰能力强、稳定性好等优点。

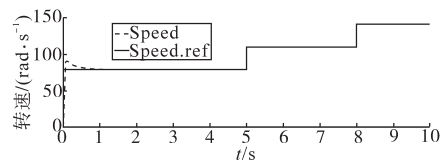


图4 转速的仿真结果

Fig.4 Simulation results of the speed

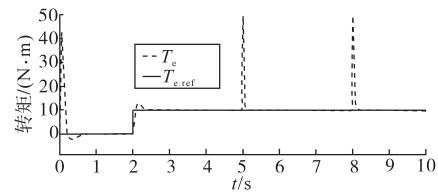


图5 转矩的仿真结果

Fig.5 Simulation results of torque

图6为损耗功率的仿真结果图。在图6中,虚线为MTPIP的损耗功率变化,实线为恒磁通控制的损耗功率变化。可以看出,稳定运行时,虚线一直在实线下方,即MTPIP方法可以有效地减少电损耗,提高电机的能效水平。具体来说,转矩为空载、转速为80 rad/s时,损耗功率分别为700 W和320 W;转矩为10 N·m、转速为80 rad/s时,损耗功率分别为700 W和580 W;在仿真转矩为10 N·m、转速为110 rad/s时,损耗功率分别为920 W和700 W;在仿真转矩为10 N·m、转速为140 rad/s时,损耗功率分别为1 150 W和850 W;可见MTPIP的能效优化效果明显。



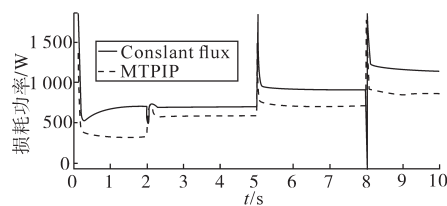


图6 损耗功率的仿真结果图

Fig.6 Simulation results of loss power

## 4 结论

针对感应电机运行在非额定条件下能效不高的问题,在考虑损耗模型的基础上,结合MTPA弱磁控制策略,提出一种新型的损耗功率最小化的方法,即MTPIP能效优化方法。该方法通过计算转矩向量和输入功率向量的梯度为零,即转矩和输入功率比最大化时的 $d, q$ 轴电流的比例系数 $X$ ,根据这个比例系数重新在线调整励磁电流的给定值,提高感应电机运行的能效水平。此外,考虑到了铁耗的影响,在考虑铁耗的感应电机数学模型基础上,提出了考虑铁耗的磁通观测器设计和电压解耦方式,并将其应用于转子磁场定向的矢量控制系统中。通过对一台7.5 kW感应电机的仿真实验,验证了所提出的MTPIP控制策略以及矢量控制系统,不仅可以提高感应电机运行的能效水平,而且不影响系统动态性能。

### 参考文献

- [1] 陈鹏,赵影,梁雪慧.基于EMD-EKF的异步电机效率优化控制研究[J].电气传动,2012,42(11):18-22.
- [2] 陈伟华,李秀英,姚鹏.电机及其系统节能技术发展综述(待

续)[J].电机与控制应用,2008(10):1-5.

- [3] 陈伟华,李秀英,姚鹏.电机及其系统节能技术发展综述(续)[J].电机与控制应用,2008(11):1-5,22.
- [4] Wu Jiajia, Gao Dawei, Zhao Xin, *et al.* An efficiency optimization strategy of induction motors for electric vehicles[C]//IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC):2008:1-5
- [5] 林显军,程小华,龙洪宇.异步电动机效率优化控制策略综述[J].微电机,2011,44(7):81-83,109.
- [6] Ren Kai, Xiong Nan1, Li Shiqing, *et al.* Efficiency optimization algorithm improvement of induction motor based on minimum input power searching[C]// International Conference on Electrical Machines and Systems, 2013:2055-2059.
- [7] 樊生文,李睿智,周鹏.感应电机弱磁区最大转矩输出的控制策略研究[J].电气传动,2018,48(9):82-87.
- [8] 万山明,陈骁.感应电动机转子磁场定向下的弱磁控制算法[J].中国电机工程学报,2011,31(30):93-99.
- [9] 张晓丽.异步电动机控制系统的效率优化研究[D].长沙:湖南大学,2016.
- [10] Sadegh hesari, Mohammad Bagher Naghibi Sistani. Efficiency improvement of induction iotor using fuzzy-genetic algorithm [C]//30th Power System Conference (PSC2015), 2015: 210-216.
- [11] 王继广.基于变频电源技术的节能控制系统研究[D].天津:天津职业技术师范大学,2016.
- [12] 吕昊,马伟明,聂子玲,等.转子磁场定向矢量控制中异步电机铁损模型分析[J].中小型电机,2004(2):10-13.
- [13] 朱文骏.感应电机矢量控制调速系统的效率优化研究[D].北京:北京理工大学,2016.
- [14] 罗豪.异步电机矢量控制系统设计及其PI控制器参数优化研究[D].长沙:湖南大学,2009.
- [15] 王成元,夏加宽,孙宜标.现代电机控制技术[M].第2版.北京:机械工业出版社,2014:74-76.

收稿日期:2019-09-12

修改稿日期:2019-11-11