基于最大转矩损耗功率比的感应电动机能效优化

何显平，夏加宽，梁宗伟，龙宇航，王婧妍

（沈阳工业大学电气工程学院，辽宁 沈阳 110870）

摘要：提出了一种基于最大转矩损耗功率比（Maximum Torque Per Power Losses，MTPPL）的感应电动机变频调速系统的能效优化方法。在考虑铁损耗的感应电动机数学模型以及转子磁场定向的基础上，分析了电动机处于稳态运行时，电动机转矩损耗功率比与电动机转速、转差频率之间的关系。当转矩损耗功率比取最大值时，即实现电动机控制系统损耗功率最小化的高能效运行。推导出转矩损耗功率比与电动机转速和转差的函数关系式，并对其求导，求出最大值对应的最优转差频率。将最优转差频率用于感应电动机的恒压频比变频调速系统，实现感应电动机的高能效运行。在Matlab/Simulink中搭建控制系统的仿真模型以及实验平台，验证了该方法的有效性。

关键词：感应电动机；最大转矩损耗功率比；最优转差频率；能效优化

Energy efficiency optimization of induction motor based on maximum torque per power losses

HE Xianping, XIA Jiakuan, LIANG Zongwei, LONG Yuhang, WANG Jingyan

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

Abstract: An energy efficiency optimization method for induction motor variable frequency speed control system based on Maximum Torque Per Power Losses (MTPPL) is proposed. Based on the mathematical model of induction motor considering iron loss and the orientation of rotor field, the relationship between motor torque per power losses and motor speed and slip frequency is analyzed when the motor is in steady state operation. When the torque per power losses is maximized, the energy-efficient operation of the motor control system power loss is minimized. The relationship between the torque per power losses and the motor speed and slip is derived, and the derivative is derived to find the optimal slip frequency corresponding to the maximum value. The optimal slip frequency is used for the constant voltage frequency ratio variable frequency speed control system of the induction motor to realize the energy-efficient operation of the induction motor. The simulation model and experimental platform of the control system are built in Matlab/simulink, and the effectiveness of the method is verified.

Key words: induction motor; maximum torque per power losses; optimal slip frequency; energy-efficiency optimization

0 引言

在工业生产中，感应电动机常采用恒压频比（即*V*/*f*控制）的变频调速方法，该方法可实现感应电动机在较大范围内的平滑调速。恒压频比的控制方法具有软硬件实现简单、性价比高的特点，广泛用于拖动对动态性能要求不高

的负载[1]。感应电动机在额定工作点（额定负载和额定转速）附近运行时效率较高，但在大多数的实际生产中，电动机都运行在非额定工作点，所以电动机的运行效率会有明显下降，即现有的感应电动机变频调速系统没有实现能效最优运行，浪费大量的电能。因此，在变频调速系统中引入能效优化方法是非常必要和有意义的，可以减少电动机运行过程中的损耗功率，提高电动机运行效率[2]。在研究能效优化方法之初，是在忽略铁损耗的基础上，分析电动机运行效率与转差频率之间的关系[3]。这种方法的好处在于，电动机能效优化方法的分析过程简单，便于控制系统软硬件的实现。然而，由于忽略了电动机的铁损耗，实际应用中的能效优化效果并不理想。考虑铁损耗时，在感应电动机等效电路中并联一个电阻来表示铁损耗，进而分析感应电动机的能效优化方法，称之为损耗模型法（Loss Model Controller，LMC)[4-5]。这类方法的能效优化效果非常依赖电动机参数的准确性，并且通常是针对电动机在基频以下运行时进行效率优化。为了提高电动机在基频以上运行的效率，基于最小电流的理论提出了最大转矩电流比(Maximum Torque Per Ampere，MTPA)的控制策略，可实现电动机在弱磁控制时，定子电流最小的能效优化效果[6-9]。MTPA通过限制一定负载下的电流间接地实现电动机的能效优化，虽然对电动机的参数不像LMC那么敏感，而且电动机节能性能的优化效果也较高，但是MTPA的控制方法实现起来比较复杂，对系统软硬件的要求较高，而且并未考虑铁损耗的影响。

综合两种方法，将考虑铁损耗的感应电动机等效电路作为分析基础，模仿MTPA的能效优化思想，以一定负载转矩下损耗功率的最小化为能效优化方法的目标，提出了一种最大转矩损耗功率比（Maximum Torque Per Power Losses，MTPPL）的感应电动机变频调速系统的能效优化方法。在LMC的感应电动机数学模型基础上，分析转矩损耗功率比与电动机转速、转差频率之间关系，导出了最大转矩损耗功率比条件下，实现电动机能效最优运行的转差频率表达式，并运用于感应电动机V/f变频调速系统中。仿真与实验的结果表明该方法在保持V/f变频调速系统控制性能的同时，有效地提高了电动机运行的节能效果，保证了电动机的高能效运行。

1 能效优化方法

电动机在实际运行中是会产生铁损耗的。铁损耗的存在会影响电动机控制系统的各种性能，尤其是电动机的运行效率[10]。在LMC方法中，通常以一个并联在互感支路的等效电阻来表示铁损耗，感应电动机的转矩和损耗功率就可以由包括等效电阻在内的电动机参数、转速、转差以及电流表示[11]。参考MTPA的控制思想，获得转矩与损耗功率比的表达式并加以简化。对转差求导，得出转矩损耗功率比的最大值。最大转矩损耗功率比与转速、转差相关，结合感应电动机的V/f变频调速系统，实现感应电动机的能效优化。

1.1 考虑铁损耗的感应电动机的数学模型

在对感应电动机恒压频比控制系统进行能效优化方法研究时，首先需要建立感应电动机的数学模型，在此之前需要作一些假设，具体如下：

1）忽略空间谐波，电动机的三相绕组对称分布，且在空间中互差120° 电角度。

2）忽略励磁饱和，认为各绕组的自感和互感不变，均为常值。

3）考虑定子励磁铁损耗的影响，在励磁支路并联一个铁损耗的等效电阻R_m，并且忽略温度、磁饱和等因素对铁损耗的影响，用一个常值表示。

建立考虑定子铁损耗的感应电动机等效电路，将其经坐标变换后，在dq坐标系中的等效电路如图1所示[12]。

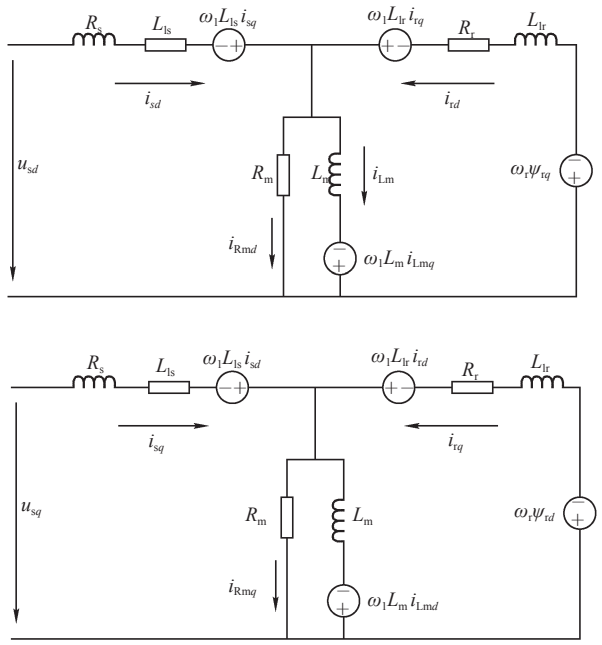


图1 同步旋转坐标系（*dq*系）中考虑铁损耗的感应电动机等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of induction motor considering iron loss in synchronous rotating coordinate system (*dq* system)

在图1的基础上，可以得到感应电动机考虑铁损耗的数学模型[13]。

电压方程

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + p\psi_{sd} - \omega_1 \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + p\psi_{sq} + \omega_1 \psi_{sd} \\ 0 = R_r i_{rd} + p\psi_{rd} - \omega_{sl} \psi_{rq} \\ 0 = R_r i_{rq} + p\psi_{rq} + \omega_{sl} \psi_{rd} \\ R_m i_{Rmd} = L_m p i_{Lmd} - \omega_1 L_m i_{Lmq} \\ R_m i_{Rmq} = L_m p i_{Lmq} + \omega_1 L_m i_{Lmd} \end{cases} \tag{1}$$

电流方程

$$\begin{cases} i_{Lmd} + i_{Rmd} = i_{sd} + i_{rd} \\ i_{Lmq} + i_{Rmq} = i_{sq} + i_{rq} \end{cases} \tag{2}$$

磁链方程

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_{ls} i_{sd} + L_m i_{Lmd} \\ \psi_{sq} = L_{ls} i_{sq} + L_m i_{Lmq} \\ \psi_{rd} = L_{lr} i_{rd} + L_m i_{Lmd} \\ \psi_{rq} = L_{lr} i_{rq} + L_m i_{Lmq} \end{cases} \tag{3}$$

电磁转矩

$$T_e = n_p \frac{L_m}{L_r} \psi_{rd} \left(i_{sq} - i_{Rmq} \right) - \psi_{rq} \left(i_{sd} - i_{Rmd} \right) \tag{4}$$

电动机的输入功率

$$P_{input} = u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq} \tag{5}$$

式中，ω_1为同步转速角频率；ω_r为转子转速角频率；$\omega_{sl}=\omega_1-\omega_r$为转差角频率；$R_s$、$R_r$和$R_m$分别为定转子电阻和铁损耗等效电阻；$L_s$、$L_r$和$L_m$分别为定转子自感和互感；$L_{ls}$、$L_{lr}$分别为定转子漏感；$i_{sd}$、$i_{sq}$、$i_{rd}$和$i_{rq}$分别为$dq$轴的定转子电流；$i_{Rmd}$、$i_{Rmq}$分别为$dq$轴铁损耗等效电流；$i_{Lmd}$、$i_{Lmq}$分别为$dq$轴励磁电流；$u_{sd}$、$u_{sq}$分别为$dq$轴定子电压；$\psi_{sd}$、$\psi_{sq}$、$\psi_{rd}$和$\psi_{rq}$分别为$dq$轴定转子磁链。

1.2 最大转矩损耗功率比的能效优化控制方法

感应电动机在采用恒压频比控制方式时，转矩与转差成正比，电动机控制系统采用转速闭环控制以保证系统的无静差。当电动机处于稳态运行时，转矩与转速都不变，如果能通过调节转差使得控制系统的损耗功率减小，那么就可以实现感应电动机的高能效运行，提高控制系统的节能效果。从感应电动机考虑铁损耗的数学模型出发，将转矩损耗功率比作为能效优化的目标函数，分析转矩损耗功率比与电动机的转速以及转差之间的关系。

为了简化计算，忽略电动机的定转子漏感，即有$L_{ls}=L_{lr}=0$。

基于转子磁场定向时有

$$\begin{cases} \psi_{rd} = \psi_r \\ \psi_{rq} = 0 \end{cases} \tag{6}$$

将式（6）代入式（3）中，可得

$$\begin{cases} i_{rd} = 0 \\ i_{Lmq} = 0 \end{cases} \tag{7}$$

当电动机处于稳态运行时，由式（1）可得

$$\begin{cases} R_m i_{Rmd} = -\omega_1 L_m i_{Lmq} = 0 \\ R_m i_{Rmq} = \omega_1 L_m i_{Lmd} \end{cases} \tag{8}$$

综合式（7）、式（8）得

$$\begin{cases} i_{rq} = -\dfrac{\omega_{sl} \psi_{rd}}{R_r} \\ i_{Lmd} = \dfrac{\psi_{rd}}{L_m} \end{cases} \tag{9}$$

将各式代入（1）中，可得

$$u_{sd} = R_s i_{sd} \tag{10}$$

$$i_{sq} = [(\frac{1}{R_m} + \frac{1}{R_r})\omega_{sl} + \frac{\omega_r}{R_m}]L_m i_{sd} \tag{11}$$

$$u_{sq} = [(\frac{R_s}{R_m} + \frac{R_s}{R_r} + 1)\omega_{sl} + (\frac{R_s}{R_m} + 1)\omega_r]L_m i_{sd} \tag{12}$$

$$P_{input} = R_s i_{sd}^2 + u_{sq} i_{sq} \tag{13}$$

$$T_e = A\omega_{sl} i_{sd}^2 \tag{14}$$

其中，$A=(n_p L_m^2)/R_r$。

在感应电动机稳态运行状态下，电动机输出功率可写成

$$\begin{aligned} P_{output} &= T_e \Omega \\ \Omega &= \omega_r / n_p \end{aligned} \tag{15}$$

式中，P_{output}为电动机的输出功率；Ω为电动机的机械角速度。

那么电动机的损耗功率为

$$\begin{aligned} P_{loss} &= P_{input} - P_{output} \\ &= \left(R_s + B\omega_{sl}^2 + C\omega_{sl}\omega_r + D\omega_r^2\right) i_{sd}^2 \end{aligned} \tag{16}$$

于是有

$$\frac{T_e}{P_{Loss}} = \frac{A\omega_{sl}}{R_s + B\omega_{sl}^2 + C\omega_{sl}\omega_r + D\omega_r^2} \tag{7}$$

其中

$$\begin{aligned} B &= L_m^2 R_s (\frac{1}{R_r} + \frac{1}{R_m})^2 + L_m^2 (\frac{1}{R_r} + \frac{1}{R_m}) \\ C &= (\frac{1}{R_r} + \frac{1}{R_m}) \frac{2L_m^2 R_s}{R_m} + L_m^2 \frac{2}{R_m} \\ D &= \frac{L_m^2 (R_s + R_m)}{R_m^2} \end{aligned} \tag{18}$$

由式（17）可知，电动机稳定运行时，转矩损耗功率比是电动机转速和转差角频率的函数，由此可见，定有一个最优的转差角频率，使得在该负载转矩下的损耗最小，转矩损耗功率比最大。

令 $\frac{\partial}{\partial \omega_{sl}} (\frac{T_e}{P_{loss}}) = 0$，得

$$\begin{aligned} \omega_{sl}^* &= \sqrt{\frac{R_s + D\omega_r^2}{B}} \\ &= \sqrt{\frac{\frac{R_s}{L_m^2} + \frac{(R_s + R_m)}{R_m^2}\omega_r^2}{R_s (\frac{1}{R_r} + \frac{1}{R_m})^2 + (\frac{1}{R_r} + \frac{1}{R_m})}} \end{aligned} \tag{19}$$

分析式（19）可知，此最优转差值仅与感应电动机的参数和转速相关，不受电动机的负载影响，可以实现电动机在全速域的节能。

2 基于MTPPL的能效最优控制系统实现

2.1 感应电动机基于MTPPL的能效优化控制系统

感应电动机的恒压频比控制系统中，引入MTPPL感应电动机能效优化方法，将最优转差频率引入控制系统，实现电动机的节能运行，控制系统原理框图如图2所示。

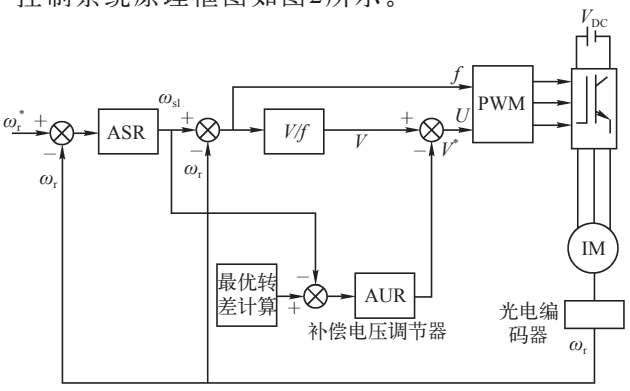


图2 基于最优转差的感应电动机恒压频比能效优化控制原理框图

Fig. 2 Principle block diagram of constant voltage frequency ratio energy efficiency optimization control of induction motor based on optimal slip

其中最优转差角频率由式（19）计算，实际的转差频率ω_{sl}与最优转差频率的误差经过补偿电压调节器，其输出是电压补偿值，用于对定子电压幅值进行补偿，采用通用的PWM脉冲调制方式控制逆变器的开关状态，控制输入电动机的电压，进而控制电动机的运行，使电动机运行在能效最优的状态[14]。

2.1 基于MTPPL方法的Matlab仿真模型

为了验证本文所提出的MTPPL的能效优化效果，在Matlab/Simulink仿真平台上，对感应电动机恒压频比能效优化控制系统进行模型建立以及实验仿真，仿真模型中感应电动机参数如下表所示。

在Matlab/Simulink仿真平台上，使用软件自带的电动机模型、三相电源模型、IGBT逆变桥模型以及PWM模型，以图2的原理图为依

表　电动机参数

Tab. Motor parameter table

电动机参数	参数值	电动机参数	参数值
额定功率P_N/kW	22	定子电阻R_s/Ω	0.525 7
额定电压U_N/V	380	定子漏感L_{ls}/H	0.005
极对数p	2	转子电阻R_r/Ω	0.301 7
转动惯量J/kg·m²	0.23	转子漏感L_{lr}/H	0.005
铁损耗电阻R_m/Ω	49	互感L_m/H	0.095

据搭建仿真模型，如图3所示。图4为最优转差频率计算模块，根据式（19）搭建。

3　仿真实验及结果分析

在图3的仿真模型中，速度控制器和补偿电压调节器均为PI控制器，其PI参数分别为：K_{P1}=1、K_{I1}=0.001；K_{P2}=15、K_{I2}=0.5。电动机设定为空载起动，转速初始给定为140 rad/s；当电动机到达稳态运行后，在2 s时刻起动基于MTPPL的能效优化控制模块；3 s时刻突加负载转矩100 N·m；在5 s时刻，转速突变为

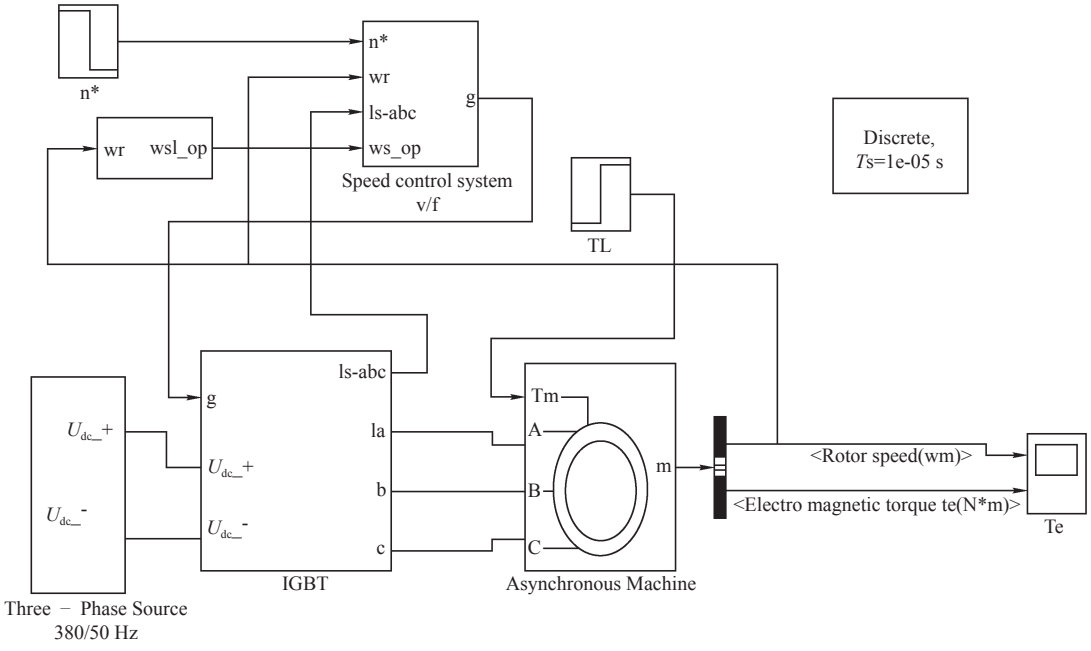


图3　Matlab/Simulink中搭建的仿真模型

Fig. 3 Simulation model built in Matlab / Simulink

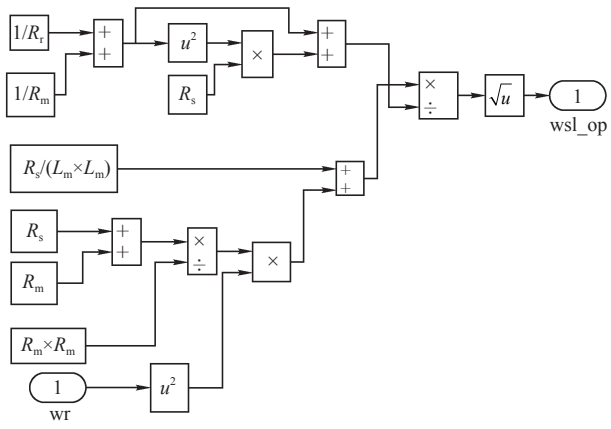
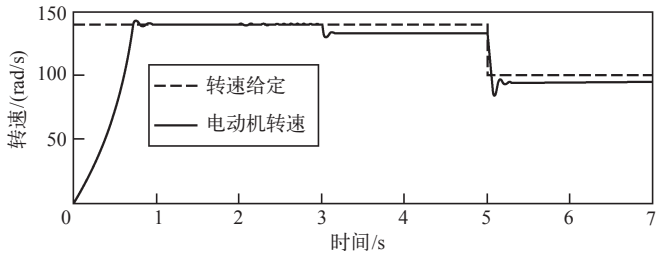


图4　最优转差频率的计算仿真模型

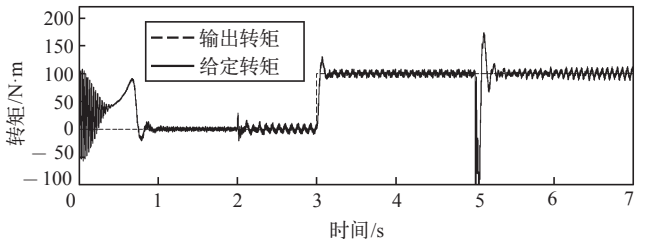
Fig. 4 Calculation simulation model of optimal slip frequency

100 rad/s。电动机转速的仿真结果波形如图5a所示，电动机转矩的仿真结果如图5b所示，MTPPL方法与传统的V/f变频调速系统相比，损耗功率的仿真结果如图5c所示。

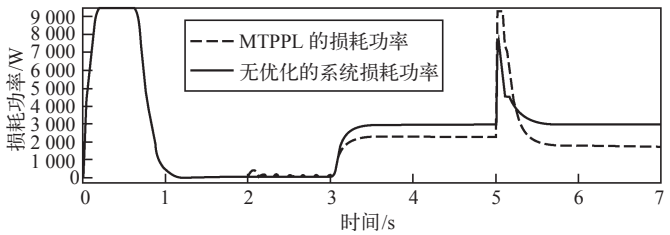
分析图5a可知，电动机在1.2 s左右到达稳定运行状态，稳态时电动机的转速为给定的转速140 rad/s，转速基本无超调无振荡。系统在2 s加入能效优化控制，电动机的转速在轻微的振荡后又迅速恢复到原来的稳定状态，转速保持不变；3 s时转矩给定改变，由于采用V/f控制方式，转差变大导致转速下滑至133 rad/s；5 s时，电动机的转速给定由140 rad/s降为100 rad/s，输



(a) 电动机转速仿真结果



(b) 电动机转矩仿真结果



(c) 损耗功率仿真结果

图5 仿真实验结果

Fig. 5 Simulation results

出转速也随之立刻改变，但由于负载转矩导致的转差存在，实际的转速为95 rad/s。在图5b中，由于电动机是空载起动，在起动阶段的电流比较大，导致电动机的起动转矩也比较大，当电动机的转速在1.2 s时刻达到给定时，电动机的输出转矩为0 N·m；当2 s时刻起动MTPPL控制时，电动机转矩出现一些脉动，但并不影响；3 s时刻电动机的转矩给定改为100 N·m，输出转矩立即响应。当转速发生改变时，电动机的输出转矩受到影响，出现振荡的情况，但是很快恢复稳定。图5c是MTPPL和普通*V*/*f*损耗功率的比较，在电动机的起动和调速的过程中，由于系统的振荡，损耗功率变化较大，当电动机稳态运行时，损耗功率曲线平稳。从图5中可以看出：当电动机负载为100 N·m、140 rad/s时，电动机的损耗功率从3 000 W降到了2 300 W，减少了700 W；当电动机的转速降为100 rad/s时，电动机的损耗功率由2 900 W下降至1 800 W，减少了1 100 W。由此可见，本文所提出的MTPPL控制策略在感应电动机*V*/*f*的控制系统中，能效优化作用明显。

4 实验研究

4.1 实验平台设计

实验控制平台以TMS320F2812为核心构成一个全数字化控制系统，根据图3的原理构建而成。实验装置如图6所示，包括：作为实验对象的感应电动机；作为负载的磁粉制动器；检测系统输入功率的功率测试仪；以及检测电动机输出转矩的转矩测试仪，而转子速度则由安装在电动机转轴上的增量编码器测量。使用两个伏特表测量定子相电流。

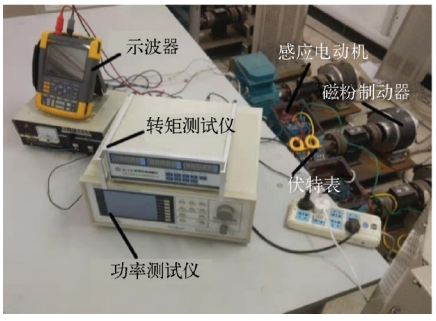


图6 实验平台

Fig. 6 Experimental platform

4.2 实验结果与分析

感应电动机基于MTPPL能效优化方法的实验结果如图7所示。在图7中，以实线表示普通*V*/*f*系统的损耗功率随转矩和转速变化的情况，虚线表示采用MTPPL能效优化的*V*/*f*控制系统的损耗功率。由实验所得的结果可以看出，随着电动机的负载加大，电动机的损耗功率也变大，这是由于定子电流随着转矩变化导致的；且在同一负载转矩下，转速越高，电动机的损耗也变得越高。通过分析损耗功率对比图可以发现，虚线一直在实线的下方，也即是负载与转矩相同的情况下，相比于传统的*V*/*f*控制系统，采用MTPPL能效优化方法后，系统的损耗功率都有明显的减少，达到了转矩最大损耗功率比的目的，实现感应电动机的能效优化。

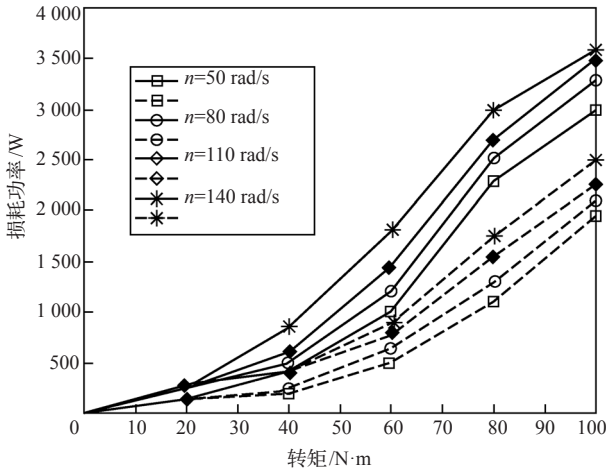


图7 实验结果

5 结束语

本文综合LMC和MTPA两种感应电动机的能效优化方法，将考虑铁损耗的感应电动机等效电路作为分析基础，模仿MTPA的能效优化思想，以一定负载转矩下，损耗功率的最小化为能效优化方法的目标，提出了一种MTPPL的感应电动机变频调速系统的能效优化方法。在感应电动机考虑铁损耗数学模型的基础上，分析了转矩损耗功率比与电动机的转速和转差的关系，并导出了感应电动机转矩损耗功率比与电动机转速和转差频率之间的函数关系式，以及实现损耗功率最小化对应的最优转差频率的分析式。通过在Matlab/simulink仿真平台上的仿真以及实验平台上的实践，验证了MTPPL能效优化方法对于提高感应电动机运行效率和节能效果的有效性。

参考文献

[1] 张兴华．空间矢量脉宽调制恒压频比控制的数字实现[J]．电气传动，2004(2)：12-15．

[2] 杨霞．感应电动机变频调速节能效果研究[D]．北京：北京建筑大学，2015．

[3] 李阳，张曾科，常进．基于转差率的感应电机最优效率控制[J]．电机与控制学报，2005(3)：16-18．

[4] LI Jie，NIE Shaofei，MENG Qingliang，et al．Efficiency optimization of induction motors based on online identification of iron loss equivalent resistance via dual extended Kalman filter[C]．IEEE Region 10 Conference (TENCON) 2016．

[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] 俞荣凯，赵坤，游小杰，等．异步电机最大转矩电流比控制方法研究[J]．电力电子技术，2008(7)：33-34，61．

[7] 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．

[8] 陶华堂，李强．基于矢量控制的感应电机弱磁控制算法研究[J]．电气传动，2016，46(3)：7-11．

[9] 刘璐，杜旭东，王晓年．考虑磁饱和的感应电机MTPA转矩控制[J]．电工技术学报，2017，32(23)：42-50．

[10] 严金云，张兴华．考虑铁损的感应电机恒压频比控制的效率优化[J]．制造业自动化，2015，37(15)：16-19．

[11] 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．

[1] 王建渊，安少亮，李洁，等．考虑主磁路饱和与铁损的异步电机模型[J]．电工技术学报，2010，25(10)：44-50．

[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] 王爱元，凌志浩．标量控制的感应电机高效节能运行的实现[J]．电气传动，2009，39(1)：19-22．

作者简介

何显平

何显平（1994－），男，硕士研究生，研究方向为电机及其控制。

夏加宽（1962－），男，教授，博士生导师，研究方向为电机及其控制。

(收稿日期：2019－07－16)EA