

8-17-2020

New Energy-saving Control of Induction Motor Considering Core Loss

Bulai Wang

1. *Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201400, China;*

Wei Biao

2. *Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;*

Zhang Fan

2. *Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;*

Zhenzhen Huang

2. *Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;*

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

New Energy-saving Control of Induction Motor Considering Core Loss

Abstract

Abstract: In order to further improve the running efficiency of induction motor, a new energy-saving control method was proposed. Considering the influence of varied flux, a control strategy coordinating the optimal flux with the optimal slip angular frequency based on the slip angular frequency control was built. The mathematical model of induction motor considering core loss was established. The expression of the optimal flux and slip angular frequency was obtained according to the Lagrange multiplier method when system was the highest efficiency. By using MATLAB simulation platform, a simulation model of the energy saving control system was built doing a research. The results show that this control strategy can not only improve the energy-saving effect, but also improve the dynamic performance of induction motor. So the control method is correct and feasible.

Keywords

energy-saving control, induction motor, optimal flux, optimal slip angular frequency, MATLAB simulation

Authors

Bulai Wang, Wei Biao, Zhang Fan, Zhenzhen Huang, and Yunfei Zhang

Recommended Citation

Wang Bulai, Wei Biao, Zhang Fan, Huang Zhenzhen, Zhang Yunfei. New Energy-saving Control of Induction Motor Considering Core Loss[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(2): 455-461.

考虑铁损时感应电机的一种新型节能控制

王步来¹, 魏彪², 张帆², 黄真真², 张允飞²

(1. 上海应用技术学院, 上海 201400; 2. 上海海事大学, 上海 201306)

摘要: 为进一步提高感应电动机的运行效率, 提出了一种新型节能控制方法。该方法基于转差角频率控制, 考虑磁链变化的影响, 建立一种最佳磁链和最佳转差角频率协调控制策略。建立考虑铁损时感应电动机的数学模型, 通过拉格朗日乘数法, 求得当系统效率最高时所对应的最佳磁链和最佳转差角频率的表达式, 利用 MATLAB 仿真平台, 搭建节能控制系统的仿真模型并作仿真研究。结果表明, 这种控制策略不仅能改善节能效果, 而且可以提高感应电动机的动态特性, 这种控制策略是正确和可行的。

关键词: 节能控制; 感应电动机; 最佳磁链; 最佳转差角频率; MATLAB 仿真

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 02-0455-07

New Energy-saving Control of Induction Motor Considering Core Loss

Wang Bulai¹, Wei Biao², Zhang Fan², Huang Zhenzhen², Zhang Yunfei²

(1. Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201400, China; 2. Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to further improve the running efficiency of induction motor, a new energy-saving control method was proposed. Considering the influence of varied flux, a control strategy coordinating the optimal flux with the optimal slip angular frequency based on the slip angular frequency control was built. The mathematical model of induction motor considering core loss was established. The expression of the optimal flux and slip angular frequency was obtained according to the Lagrange multiplier method when system was the highest efficiency. By using MATLAB simulation platform, a simulation model of the energy saving control system was built doing a research. The results show that this control strategy can not only improve the energy-saving effect, but also improve the dynamic performance of induction motor. So the control method is correct and feasible.

Keywords: energy-saving control; induction motor; optimal flux; optimal slip angular frequency; MATLAB simulation

引言

随着地球资源的不断消耗, 环境污染问题和节能环保问题一直是科学界关注的焦点。在重工业、电动汽车等领域, 感应电动机应用最广泛, 作为最

重要的用电设备, 其用电量约占动力设备耗电量的 60%左右, 面对地球资源的不断消耗等问题, 节能要求刻不容缓。通常感应电动机长时间处于低速或轻载运行状况下, 如车床等, 电能被大量浪费。文献[1-2]提出全球能源问题并提出感应电动机最优能源控制方法, 这些控制方法虽然具有一定效果但不明显。文献[3]采用空间矢量脉宽调制(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)算法在变频空调中应用, SVPWM 控制技术是交替使用不同



收稿日期: 2014-10-21 修回日期: 2015-03-10;
作者简介: 王步来(1966-), 男, 江苏淮安, 博士, 教授, 研究方向为电机及其系统; 魏彪(1988-), 男, 安徽滁州, 硕士生, 研究方向为电力电子与电力传动; 张帆(1990-), 男, 山西太原, 硕士生, 研究方向为电机及控制。

电压空间矢量来跟踪原型旋转磁场,来产生稳定的电磁转矩。SVPWM 控制技术能够明显减小电流波形畸变和电机谐波损耗,对于提高感应电动机控制系统的效率具有重大意义,本文利用其优点将其应用在感应电动机节能控制系统中。

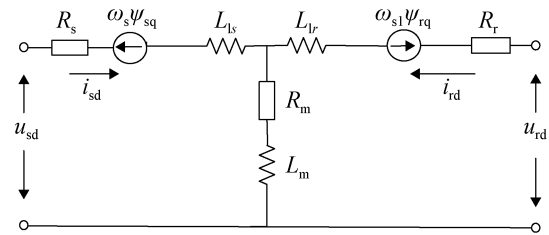
文献[4]从电动机损耗的角度,分析了电机的运行效率,大多数文献中只考虑铜耗而忽略了铁损耗的影响,本文考虑了铁损,研究铁损对感应电动机效率的影响。参考文献[5]研究了感应电动机转差频率控制;文献[6-7]研究了最优转差角频率感应电动机的节能控制。这些控制忽略了磁链的影响,保持磁链恒定不变,实际上磁链是在不断变化的,所以该方法没有显著的节能效果。文献[8-11]研究了感应电动机的一些传统节能控制方法,这些控制方法虽然有一定的节能效果,但考虑的因素不全面,并没有将影响电机效率的各种因素综合起来考虑。本文是基于矢量控制原理,利用感应电动机转差频率控制方案,考虑了磁链的影响建立最佳磁链和最佳转差角频率相协调的控制策略,使得转差角频率达到最佳的同时磁链也达到最佳。

1 考虑铁损感应电动机的数学模型

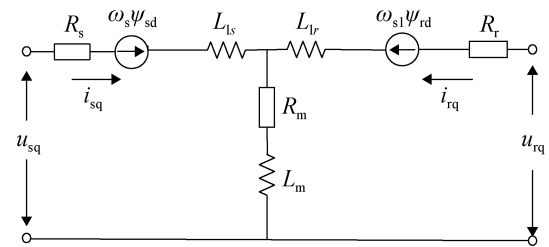
在对感应电动机矢量控制系统进行节能研究时,首先需要对感应电动机进行数学建模,在对感应电动机进行数学建模前需要作一些假设,具体如下所示:

- 1) 忽略空间谐波,设感应电动机三相绕组对称,在空间互差 120° 电角度。所产生的磁动势沿气隙周围按正弦规律分布,这样可以按矢量概念进行分析。
- 2) 忽略磁饱和,认为各绕组的自感和互感都是恒定的,并认为电感、互感均为常数值。
- 3) 考虑定子铁损的影响。
- 4) 绕组电阻不因温度变化和频率变化而受到影响。
- 5) 电压、电流、磁链的正方向符合右手螺旋定则。

感应电动机损耗包括定子铜耗、定子铁损、转子铜耗和转子铁损耗等,铁损耗对感应电动机效率的影响比较大不能忽略^[6],由于转子铁损远远小于定子铁损,转子铁损可以忽略,所以本文只考虑了定子铁损。建立考虑定子铁损感应电动机 d - q 轴动态数学模型,其动态等效电路如图 1 所示。



(a) 感应电动机 d 轴等效电路



(b) 感应电动机 q 轴等效电路

图 1 感应电动机 d - q 轴动态等效电路

这里研究的感应电动机的转子为鼠笼型转子,所以转子 d 轴和 q 轴电压为 0。由上述动态数学模型可得感应电动机在旋转坐标系下的电压方程、磁链方程、转矩方程及运动方程,如下所示:

电压方程

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_s \psi_{sq} + R_m (i_{sd} + i_{rd}) + p \psi_{sd} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s \psi_{sd} + R_m (i_{sq} + i_{rq}) + p \psi_{sq} \\ 0 = R_r i_{rd} - \omega_{sl} \psi_{rq} + R_m (i_{sd} + i_{rd}) + p \psi_{rd} \\ 0 = R_r i_{rq} + \omega_{sl} \psi_{rd} + R_m (i_{sq} + i_{rq}) + p \psi_{rq} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{sd} , i_{sd} , u_{sq} , i_{sq} 分别为定子 d 轴电压、电流和 q 轴的电压、电流; u_{rd} , i_{rd} , u_{rq} , i_{rq} 分别为转子 d 轴电压、电流和 q 轴电压、电流; R_s , R_r 和 R_m 分别为定、转子及铁耗电阻; p 为微分算子; ω_s 为定子角频率; ω_{sl} 为转差角频率。

磁链方程:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \end{cases} \quad (2)$$

式中: ψ_{sd} , ψ_{sq} , ψ_{rd} 及 ψ_{rq} 分别为定子 d, q 轴磁链和转子 d, q 轴磁链; L_s , L_r , L_m 分别为定、转子自感和互感。

转矩方程:

$$T_e = \frac{L_m}{L_r} n_p (\psi_{rd} i_{sq} - \psi_{rq} i_{sd}) \quad (3)$$

式中: T_e 为电磁转矩; n_p 为极对数。

运动方程:

$$T_e - T_L = \frac{J}{n_p} p \omega \quad (4)$$

式中: T_L 是负载转矩; J 是转动惯量; ω 是转子角频率。

2 最佳磁链和转差角频率协调控制策略原理及节能控制算法

2.1 最佳磁链和转差角频率协调节能控制策略原理

感应电动机转差频率控制是交流电机经典的控制方式, 因此感应电动机最佳转差角频率节能控制被广泛研究, 虽然有一定的节能效果但由于忽略了磁链的影响, 不能准确模拟感应电动机的实际运行过程, 导致节能效果不是很好。本文考虑铁损建立转差频率和磁链协调控制策略, 由感应电动机在 d-q 同步旋转坐标系下的数学模型, 若系统按转子磁场定向控制, 则有:

$$\psi_{rd} = \psi_r \quad (5)$$

$$\psi_{rq} = 0 \quad (6)$$

式(1)第 4 式中, 由于 $R_m i_{sq} \ll (R_r + R_m) i_{rq}$, 所以可以忽略最小项 $R_m i_{sq}$, 然后将(5), (6)式代入该式, 可得 q 轴转子电流的表达式为:

$$i_{rq} = -\frac{\omega_{sl} \psi_r}{R_r + R_m} \quad (7)$$

由(2)的第 4 式、(6)和(7)式可推导得到 q 轴定子电

流表达式如下:

$$i_{sq} = \frac{L_r \omega_{sl} \psi_r}{L_m (R_r + R_m)} \quad (8)$$

再由式(3), (6)及(8)可得电磁转矩为:

$$T_e = \frac{n_p \psi_r^2 \omega_{sl}}{R_r + R_m} \quad (9)$$

由式(9)可知, 可以把电磁转矩 T_e 看作是关于转子磁链 ψ_r 和转差角频率 ω_{sl} 的二元函数关系, 转子磁链和转差角频率是影响感应电机电磁转矩的 2 个变量, 同样也是直接影响电机效率的 2 个因素, 因此必然存在某一最佳控制时刻, 使得磁链和转差角频率协调达到最优。如果通过某种算法找到对应的最佳磁链和最佳转差角频率, 那么电磁转矩 T_e 可以得到最佳控制。这样既可以保证效率最高, 同时磁链也得到有效利用并达到最佳。

此外, 在定子电流不超过允许范围的情况下, 转差角频率也达到最佳, 从而实现转矩和磁链解耦。为了使感应电动机能够高效运行, 建立效率 η 关于 ψ_r 和 ω_{sl} 的二元函数关系式, 利用数值算法求得效率最大时所对应的最佳磁链 $\psi_{r,opt}$ 和最佳转差角频率 $\omega_{sl,opt}$ 。此控制策略是在感应电动机效率最大化的情况下, 保留矢量控制的基本思想, 因此既可以保证效率最优又能提高感应电动机的动态调速性能。

2.2 节能控制算法

这种最佳磁链和最佳转差角频率协调控制策略的节能算法是在精确的数学描述基础上, 可以根据感应电动机的效率最大化来控制感应电动机的运行点, 这样可使电动机始终工作在最大效率处, 起到节能的作用。根据上述数学模型和协调控制策略原理, 可以推导出最高效率控制算法。具体算法如下:

由于 $R_m i_{sd} \ll (R_r + R_m) i_{rd}$, 所以上面式(1)的第 3 式可忽略最小项 $R_m i_{sd}$, 系统稳态时, 磁链为某一恒值, 磁链的变化率为 0 可得:

$$i_{rd} = 0 \quad (10)$$

根据(2)的第 3 式和(5)及(10)式可得磁链电流的表

达式为:

$$i_{sd} = \frac{\psi_r}{L_m} \quad (11)$$

由(8)式和(11)式可计算出定子铜耗为:

$$P_{cus} = R_s(i_{sd}^2 + i_{sq}^2) = \frac{R_s \psi_r^2}{L_m^2} + \frac{R_s L_r^2 \omega_{sl}^2 \psi_r^2}{L_m^2 (R_r + R_m)^2} \quad (12)$$

由式(7), (8), (10)和(11)式可求得定子铁耗。定子铁耗的表达式如下:

$$P_m = R_m(i_{sd} + i_{rd})^2 + R_m(i_{sq} + i_{rq})^2 = \frac{R_m \psi_r^2}{L_m^2} + \frac{R_m L_r^2 \omega_{sl}^2 \psi_r^2}{L_m^2 (R_r + R_m)^2} \quad (13)$$

由于输入功率是定子铜耗、定子铁耗和电磁功率三者之和。其中, 电磁功率为 $P_e = T_e \omega_s / n_p$, 再结合式(12)和(13)可求得输入功率表达式为:

$$P_1 = \frac{R_s \psi_r^2}{L_m^2} + \frac{R_s L_r^2 \omega_{sl}^2 \psi_r^2}{L_m^2 (R_r + R_m)^2} + \frac{R_m \psi_r^2}{L_m^2} + \frac{R_m L_r^2 \omega_{sl}^2 \psi_r^2}{L_m^2 (R_r + R_m)^2} + T_e \frac{\omega_{sl} + \omega}{n_p} \quad (14)$$

由于系统稳态时, 电磁转矩是恒定不变的, 电磁转矩为 $T_e = n_p \psi_r^2 \omega_{sl} / (R_r + R_m)$ 。其中, 输出的机械功率为 $P_2 = T_e \omega / n_p$ 。根据效率的表达式, 利用拉格朗日乘法, 可构造效率函数为:

$$\eta(\psi_r, \omega_{sl}) = \frac{P_2}{P_1} + \lambda(T_e - n_p \frac{\psi_r^2 \omega_{sl}}{R_r + R_m}) = \frac{A}{B\psi_r^2 + C\omega_{sl}^2 \psi_r^2 + D\omega_{sl} + A} + \lambda(T_e - E\psi_r^2 \omega_{sl}) \quad (15)$$

式中: $A = T_e \frac{\omega}{n_p}$, $B = \frac{R_s + R_m}{L_m^2}$, $C = \frac{R_s L_r^2 + R_m L_r^2}{L_m^2 (R_r + R_m)^2}$,

$D = \frac{T_e}{n_p}$, $E = \frac{n_p}{R_r + R_m}$, λ 为拉格朗日乘子。

感应电动机在实际运行过程中, 定子 d 轴和 q 轴电流要受到最大定子电流峰值的限制。它们之间的关系为 $i_{sq}^2 + i_{sd}^2 \leq i_{max}^2$, 将上述所得定子 d 轴和 q 轴电流的表达式带入该表达式可得

$$\frac{\psi_r^2}{L_m^2} + \frac{L_r^2 \omega_{sl}^2 \psi_r^2}{L_m^2 (R_r + R_m)^2} \leq (\sqrt{2} I_N)^2 \quad (16)$$

结合(15)式和(16)式, 利用带限制条件求函数最优值的方法, 亦即拉格朗日乘数法。可求得最佳转差角频率和最佳磁链表达式, 并建立最佳磁链模型, 由上述方法可得最佳磁链和最佳转差角频率为

$$\begin{cases} \omega_{sl,opt} = \sqrt{\frac{BT_e}{CT_e + ED}} = \sqrt{\frac{(R_s + R_m)(R_r + R_m)^2}{R_s L_r^2 + R_m L_r^2 + L_m^2 (R_r + R_m)}} \\ \psi_{r,opt} = \sqrt{\frac{T_e (R_r + R_m)}{n_p \omega_{sl,opt}}} \end{cases} \quad (17)$$

最佳磁链模型如图 2 所示。

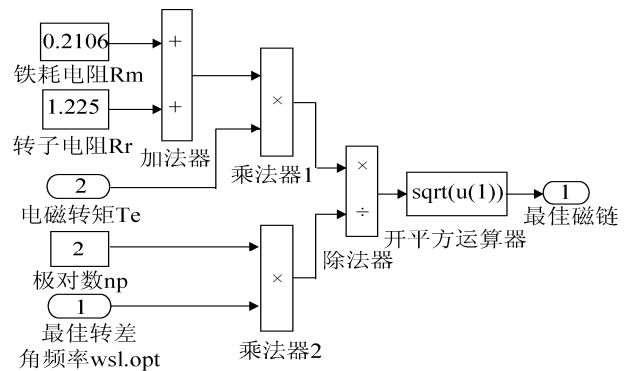


图 2 最佳磁链模型

3 系统结构图

根据上述最佳转差频率和最佳磁链协调控制策略原理及算法, 利用 MATLAB 软件中的 SIMULINK 仿真平台, 搭建节能控制系统的仿真模型结构图如图 3 所示。

4 仿真和对比分析

电机具体参数如下表 1 所示。

将上述电机参数带入式(17)中的最佳转差角频率的表达式, 可计算出最佳转差角频率的大小为 9.592 8 rad/s。

4.1 仿真结果分析

(1) 若该节能控制系统给定转速 $n = 300$ r/min 时, $t = 0$ s 时给定负载转矩为 $T_L = 2$ N·m, 当 $t = 2$ s 时, 负载转矩突变为 $T_L = 4$ N·m, 可得仿真结果如图 4 所示。

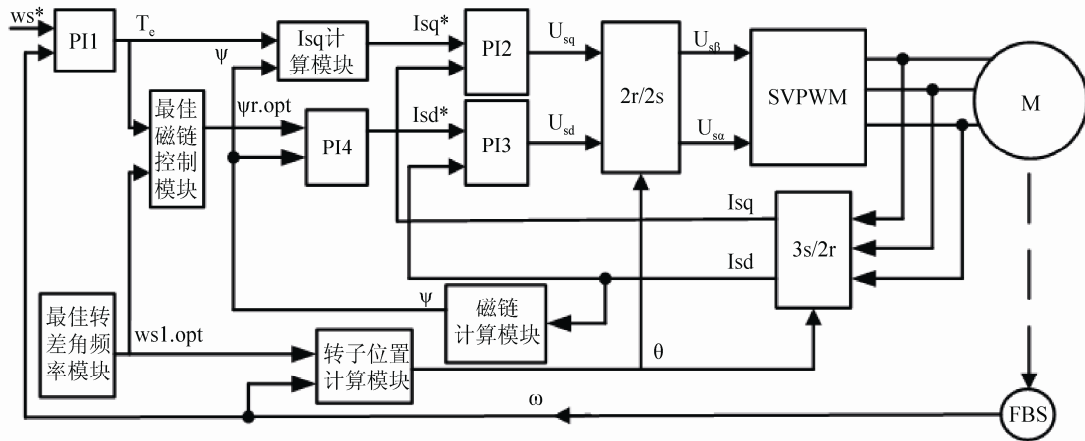
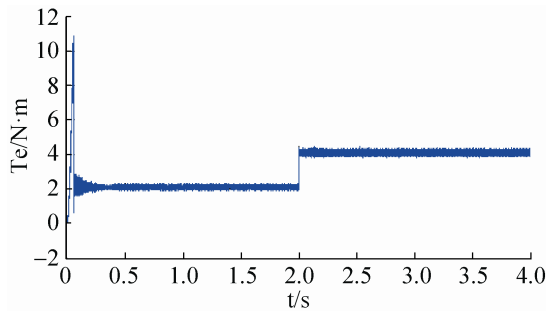


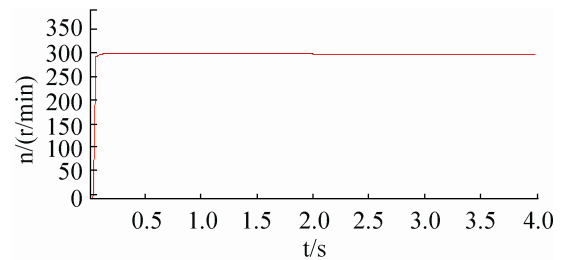
图 3 考虑铁损感应电动机最佳磁链和最佳转差角频率协调控制结构图

表 1 电机参数

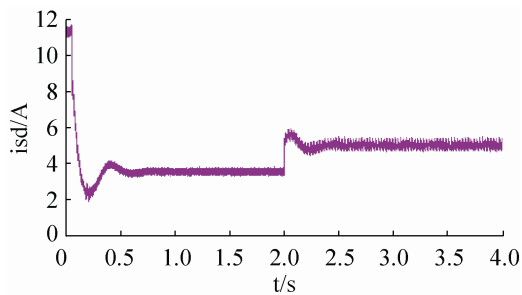
序号	电机参数	量值	序号	电机参数	量值
1	额定输出功率/kW	1.5	6	铁损电阻 R_m/Ω	0.210 6
2	极数/级	4	7	转子电阻 R_r/Ω	1.225
3	额定转速 $n_N/(r/min)$	1 420	8	定子漏感 L_{ls}/H	0.004 79
4	额定电流 I_N/A	6.4	9	转子漏感 L_{lr}/H	0.007 33
5	定子电阻 R_s/Ω	1.377	10	转子互感 L_m/H	0.108 77



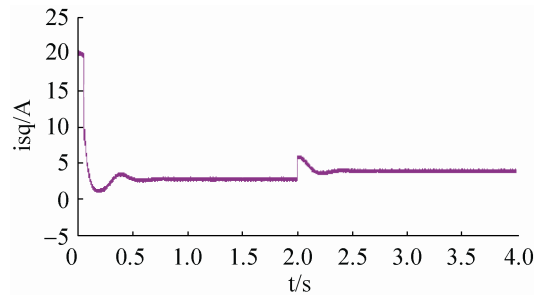
(a) 转矩 T_e 波形



(b) 转速 n 波形



(c) d 轴电流波形

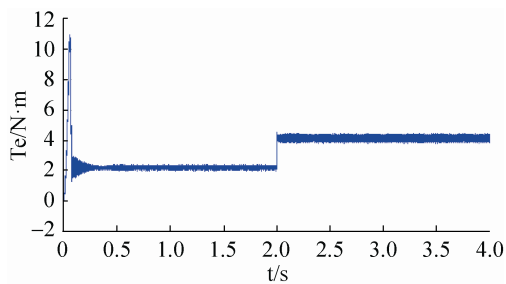


(d) q 轴电流波形

图 4 转速 $n = 300$ r/min 时的仿真波形

仿真结果表明：感应电动机在启动过程中，0.059 s 后达到稳定状态，由于感应电动机启动电流不得超过额定电流的 3~5 倍，该系统启动电流为 19.8A，为额定电流的 3.08 倍，所以符合启动电流要求。由转速波形可以看出其转速无超调。此外，控制系统的调节时间短，系统动态响应快。当电机运行到 $t=2$ s 时，负载突变为 $T_L=4$ N·m 时，转矩波动很小，并很快进入稳定运行状态，所以该系统的动态特性较好。

由图 4(c), (d) 可得当给定转速 $n=300$ r/min,



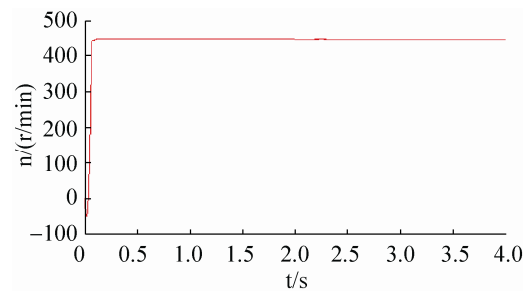
(a) 转矩 T_e 波形

负载转矩分别为 2 N·m 和 4 N·m 时的励磁电流和转矩电流大小如表 2 所示。

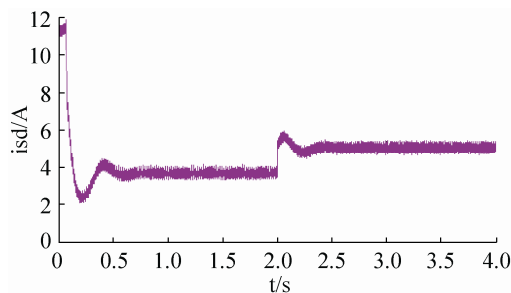
表 2 转速 $n=300$ r/min 负载转矩分别为 2 N·m 和 4 N·m 时的励磁电流和转矩电流

负载转矩 T_L /(N·m)	2	4
励磁电流 I_{sd} /A	3.583	5.003
转矩电流 I_{sq} /A	2.771	3.88

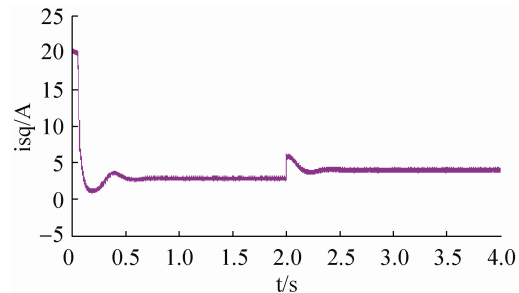
(2) 若该节能控制系统给定转速 $n=450$ r/min 时， $t=0$ s 时负载转矩为 $T_L=2$ N·m，当 $t=2$ s 时，负载转矩突变为 $T_L=4$ N·m，系统仿真结果如图 5 所示。



(b) 转速 n 波形



(c) d 轴电流波形



(d) q 轴电流波形

图 5 转速 $n=450$ r/min 时的仿真波形

仿真结果表明：感应电动机在启动过程中，0.072 s 后达到稳态，启动电流为 19.2A，为额定电流的 3.05 倍，不超过额定电流的 3~5 倍，所以同样符合启动电流要求。转速仍无超调，控制系统调节时间短，系统动态响应快。当电机运行到 $t=2$ s 时，负载突变为 $T_L=4$ N·m 时，转矩波动比较小，并很快进入稳定运行状态，由此表明该系统的动态性能较好。

同理由图 5(c)、(d) 可得当给定转速 $n=450$ r/min，负载转矩分别为 2 N·m 和 4 N·m 时的励磁电流和转矩电流大小如表 3 所示。

表 3 转速 $n=450$ r/min 负载转矩分别为 2 N·m 和 4 N·m 时励磁电流和转矩电流

负载转矩 T_L /(N·m)	2	4
励磁电流 I_{sd} /A	3.618	5.042
转矩电流 I_{sq} /A	2.798	3.903

4.2 对比分析

为了说明考虑铁损感应电动机最佳磁链和最佳转差角频率协调控制策略节能的优点，将此与考虑铁损最佳转差角频率节能控制进行对比。参考文献[6]已经给出了考虑铁损时最优转差角频率节能控制的效率表。根据本文研究，通过(12)，(13)式

和电磁功率的表达式并结合表 2、表 3 励磁电流和转矩电流的大小可计算出输入功率的大小, 再结合输出功率和(15)式可得考虑铁损感应电动机最佳磁链和最佳转差角频率协调控制策略的效率, 为了对比说明, 这里给出感应电动机在同一转矩而不同转速时和同一转速而不同转矩时的效率对比表, 具体数据如表 4 和表 5 所示。

表 4 负载转矩为 2 N·m 时转速分别为
300 r/min 和 450 r/min 效率对比表

转速 n/(r/min) (负载转矩 $T_L=2$ N·m)	300	450
最佳转差角频率	0.641 24	0.750 27
节能控制效率 η_1	0.677 40	0.760 20
协调控制策略效率 η_2	5.639 1%	1.323 5%
效率变化 $\Delta\eta$		

表 5 转速为 300 r/min 时负载转矩分别为
2 N·m 和 4 N·m 效率对比表

负载转矩 T_L /(N·m) (转速 n=300 r/min)	2	4
最佳转差角频率	0.641 24	0.641 26
节能控制效率 η_1	0.677 40	0.675 10
协调控制策略效率 η_2	5.639 1%	5.277 1%
效率变化 $\Delta\eta$		

由表 4 和表 5 所对比的结果可知, 考虑铁损感应电动机最佳磁链和最佳转差角频率协调控制策略比考虑铁损感应电动机最优转差角频率控制时系统平均提升效率为 4.55% 左右; 轻载低速时节能效果明显。因此, 考虑铁损感应电动机最佳磁链及最佳转差角频率协调控制策略的节能效果要优于考虑铁损感应电动机最优转差角频率的节能效果。

5 结论

本文考虑到定子铁损对感应电动机效率的影响不可忽略, 由此建立考虑铁损感应电动机的数学模型, 在最佳转差角频率节能控制的基础之上考虑了磁链的影响, 进而分析考虑铁损感应电动机最佳转差角频率和最佳磁链协调控制策略, 根据该策略

的原理和控制算法构建基于 Matlab/Simulink 的仿真模型。该原理清晰易懂, 通过仿真结果可知, 转速无超调, 转矩波动小, 动态性能好。从效率对比结果看, 感应电动机在轻载低速时节能效果比较明显。可见, 考虑铁损感应电动机最佳磁链和最佳转差角频率协调节能控制策略是可行的, 有效的。

参考文献:

- [1] M Madrigal, M Bhatia, G Elizondo *et al.* Surmounting the global challenges of energy for all and greener, more efficient electricity services [J]. *Power & Energy Magazine IEEE (S1540-7977)*, 2012, 10(3): 20-29.
- [2] CT Raj, SP Srivastava, A Pramod. Particle Swarm and Fuzzy Logic Based Optimal Energy Control of Induction Motor for a Mine Hoist Load Diagram [J]. *I aeng International Journal of Computer Science(S1819-9224)*, 2009, 36(1): 17-25.
- [3] 朱福成. 空间矢量SVPWM控制算法在变频空调中的应用[J]. *兵工自动化*, 2011, 30(3): 64-68.
- [4] 莫红苹, 钟彦儒. 基于铜损等于铁损的异步电动机最佳效率控制[J]. *西安理工大学学报*, 2002, 18(2): 167-170.
- [5] 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, 9(3): 215-217.
- [6] 陈雪琴. 基于最优转差角频率的异步电动机节能研究[D]. 上海: 上海海事大学, 2014.
- [7] 王步来, 陈雪琴, 季文彪, 等. 一种异步电机的节能控制方法: 中国ZL201210013071.5 [P]. 2014-04-28.
- [8] E Hussein, P Mutschler. Optimal Flux Loss Model based Speed Sensorless Control of Induction Motor [C]// *Iet International Conference on Power Electronics*, April 2010: 1-9, Brighton, UK, 10.1049/cp.2010.0005 10.1049, IET.
- [9] H Ouadi, F Giri, A Efadili, *et al.* Induction machine speed control with flux optimization [J]. *Control Engineering Practice (S0967-0661)*, 2010, 18(18): 55-66.
- [10] Duy C Huynh. Energy Efficient Control of an Induction Machine using a Chaos Particle Swarm Optimization Algorithm [C]// *IEEE Conference on Power and Energy*, Nov. 29, 2010, Dec 1st 2010. USA: IEEE, 2010: 450-455.
- [11] B Zahedi, S Vaez-Zadeh. Efficiency Optimization Control of Single-Phase Induction Motor Drives [J]. *IEEE Trans. Energy conversion(S0885-8993)*, 2009, 24(4): 1062-1071.