

基于无源化的感应电机能量最优控制

林 飞¹, 刘晓敏², 郑琼林¹

(1. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044; 2. 华北电力调度局, 北京 100053)

摘要: 提出了一种考虑运行效率优化的感应电机无源化控制方法。在动态系统无源性的基础上, 从能量的角度应用无源化方法设计了感应电机调速系统。利用系统的能量函数作为 Lyapunov 函数, 保证电机的转速和磁链能够渐进跟踪其给定值。根据电机的能量平衡关系, 得出使得电机能量损耗最小的转子磁链给定值。仿真结果表明, 该控制器具有良好的性能。电机轻载时, 损耗明显降低。

关键词: 感应电机; 非线性控制; 无源化控制; 能量优化

中图分类号: TM 346

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)01-0028-03

感应电机大量用于发电厂中水泵、风机的拖动, 是厂用电的主要负载。感应电机的能量优化控制, 对降低厂用电率, 满足国家节能政策的要求具有重要意义。随着变频调速技术的应用, 电机效率较以往有了很大的提高^[1]。随着矢量控制以及其他非线性控制手段的应用^[1-3], 感应电机调速系统的动态和稳态性能都有了很大提高, 但也面临着控制算法复杂, 参数调整困难等问题。无源化控制方法克服了以上缺点, 近年来逐步应用于电机调速领域, 但多局限于电流型逆变器系统^[4,5]。本文根据对电机能量平衡关系的分析, 将无源化控制推广到常用的电压型逆变器系统, 并进而得到能量损耗最小时对应的磁链。根据不同运行工况, 调整控制器的磁链给定值, 就可以实现电机的最优效率。

1 无源化控制概述^[6]

无源性的概念着重描述动态系统与外界的能量交换。无源系统只消耗能量而不产生能量, 可以保持自身的内部稳定性。考察下述非线性系统:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u, \quad y = h(x) \quad (1)$$

式中 x, u, y 分别为系统的状态、输入和输出变量。

下面给出无源系统的定义。

定义 1: 对给定的供给率 $S = u^T y$, 若存在非负函数 $V(x)$, 对 $t > t_0$, 使得不等式

$$V(x(t)) \leq V(x(t_0)) + \int_0^t u^T y dt \quad (2)$$

成立, 则称系统(1)为无源系统。 $V(x)$ 称为系统的存储函数。无源性与稳定性、最优性具有密切的关系, 在此基础上产生了无源化控制。在一定条件下, 无源系统可以保留系统的非线性特性而不必进行线性化等处理, 通过简单的输出反馈就能得到满意的控制性能^[6-8]。由系统的物理概念得到的存储函数 $V(x)$ 在控制器设计中起到了重要作用。

2 感应电机数学模型

经过正交 Clarke 变换, 感应电机在两相静止坐标系(称为 $\alpha\beta$ 轴)下的状态方程可以写成下述形式。

a. 电磁系统:

$$\begin{bmatrix} u_s \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma L_s I_2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_r} I_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_s \\ \dot{\Psi}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (R_s + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2}) I_2 & -R_r \frac{L_m}{L_r^2} I_2 \\ -\frac{R_r L_m}{L_r^2} I_2 & \frac{R_r}{L_r} I_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ \Psi_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega_r \frac{L_m}{L_r} J_2 \\ 0 & -\frac{\omega_r}{L_r} J_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ \Psi_r \end{bmatrix} \quad (3)$$

b. 机械系统:

$$\frac{J}{n_p} \dot{\omega}_r = \frac{n_p L_m}{L_r} (\Psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{r\beta} i_{s\alpha}) - T_L \quad (4)$$

$$I_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad J_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

式中, 定子电流向量 $i_s = [i_{s\alpha}, i_{s\beta}]^T$ 、转子磁链向量 $\Psi_r = [\Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}]^T$ 和电机电气角速度 ω_r 是系统的状态变量; 定子电压向量 $u_s = [u_{s\alpha}, u_{s\beta}]^T$ 为系统的输入。对于电磁系统(3), 选择电机电感线圈中储存的磁场能量函数作为系统的存储函数:

$$V_e = \frac{1}{2} [i_s^T \quad \Psi_r^T] \begin{bmatrix} \sigma L_s I_2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_r} I_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ \Psi_r \end{bmatrix} \quad (5)$$

对其求导有

$$\dot{V}_e = [i_s^T \quad \Psi_r^T] \begin{bmatrix} \sigma L_s I_2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_r} I_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_s \\ \dot{\Psi}_r \end{bmatrix} = i_s^T u_s - R_s i_s^T i_s - R_r i_r^T i_r - \frac{\omega_r}{n_p} T_e \quad (6)$$

式(6)反映了电机电磁系统的能量守恒关系, 根

据定义 1, 该系统满足无源性的条件。

对于机械系统, 选择电机动能作为存储函数:

$$V_m = \frac{1}{2} J \left(\frac{\omega_r}{n_p} \right)^2 \quad (7)$$

对其求导有

$$\dot{V}_m = J \frac{\omega_r}{n_p} \left(\frac{\dot{\omega}_r}{n_p} \right) = \frac{\omega_r}{n_p} (T_e - T_L) \quad (8)$$

式(8)反映了电机机械系统的能量守恒关系, 电磁转矩克服负载转矩后转化成系统的动能。可见, 整个感应电机是一个机电能量相互转换的无源系统。

3 感应电机的无源化控制

由于电机机械系统与电磁系统的时间尺度相差较大, 因此可以采用分层控制器。首先, 设计速度控制器得到转矩指令 T_{ref} , 使得电机转速在未知负载转矩 T_L 的扰动下跟踪给定值 ω_{ref} 。然后对于电磁系统设计控制器, 使得电磁转矩为 T_{ref} , 且电机磁链也跟踪其给定值 Ψ_{ref} 。

本文采用如下的 PI 调节器作为速度控制器:

$$T_{ref} = k_{\omega p} (\omega_{ref} - \omega_r) + k_{\omega i} \int_0^t (\omega_{ref} - \omega_r) dt \quad (9)$$

下面应用无源化的方法设计电磁系统的转矩和磁链控制器。首先, 设系统的磁链期望状态如下:

$$\Psi_{r\alpha}^* = \Psi_{ref} \cos \theta, \Psi_{r\beta}^* = \Psi_{ref} \sin \theta, \dot{\theta} = \omega_r + \frac{R_r}{n_p} \frac{T_{ref}}{\Psi_{ref}^2}$$

根据系统(3)中磁链方程并保留其非线性特性, 可得如下的电流期望值:

$$\begin{aligned} i_{s\alpha}^* &= \frac{L_r}{R_r L_m} \dot{\Psi}_{r\alpha}^* + \frac{1}{L_m} \Psi_{r\alpha}^* + \frac{L_r}{R_r L_m} \omega_r \Psi_{r\beta}^* \\ i_{s\beta}^* &= \frac{L_r}{R_r L_m} \dot{\Psi}_{r\beta}^* + \frac{1}{L_m} \Psi_{r\beta}^* - \frac{L_r}{R_r L_m} \omega_r \Psi_{r\alpha}^* \end{aligned} \quad (10)$$

经推导可知下式成立:

$$\begin{aligned} T_{ref} &= \frac{n_p L_m}{L_r} (\Psi_{r\alpha}^* i_{s\beta}^* - \Psi_{r\beta}^* i_{s\alpha}^*) \\ \Psi_{ref}^2 &= \Psi_{r\alpha}^{*2} + \Psi_{r\beta}^{*2} \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)表明, 当系统的状态达到所设定的期望状态时就可达到控制目标。

下面根据无源化控制方法设计电压控制律, 保证系统的状态能够跟踪上述期望状态。保持系统(3)中电流方程原有非线性结构不变, 加上线性输出反馈可得控制律如下式:

$$\begin{aligned} u_\alpha &= \sigma L_s \dot{i}_{s\alpha}^* + (R_{sn} + R_{rn} \frac{L_m^2}{L_r^2}) i_{s\alpha}^* - \\ &R_{rn} \frac{L_m}{L_r} \Psi_{r\alpha}^* - \omega_r \frac{L_m}{L_r} \Psi_{r\beta}^* - k_i (i_{s\alpha} - i_{s\alpha}^*) \\ u_\beta &= \sigma L_s \dot{i}_{s\beta}^* + (R_{sn} + R_{rn} \frac{L_m^2}{L_r^2}) i_{s\beta}^* - \\ &R_{rn} \frac{L_m}{L_r} \Psi_{r\beta}^* + \omega_r \frac{L_m}{L_r} \Psi_{r\alpha}^* - k_i (i_{s\beta} - i_{s\beta}^*) \end{aligned} \quad (12)$$

记

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_i &= [e_1, e_2]^T = [i_{s\alpha} - i_{s\alpha}^*, i_{s\beta} - i_{s\beta}^*]^T \\ \mathbf{e}_\Psi &= [e_3, e_4]^T = [\Psi_{r\alpha} - \Psi_{r\alpha}^*, \Psi_{r\beta} - \Psi_{r\beta}^*]^T \end{aligned}$$

为跟踪误差信号, 把上述控制律代入原方程(3), 整理可得如下的误差动态方程:

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} \sigma L_s \mathbf{I}_2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_r} \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{e}}_i \\ \dot{\mathbf{e}}_\Psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (R_s + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2}) \mathbf{I}_2 & -R_r \frac{L_m}{L_r^2} \mathbf{I}_2 \\ -R_r \frac{L_m}{L_r^2} \mathbf{I}_2 & \frac{R_r}{L_r} \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} \times \\ &\begin{bmatrix} \mathbf{e}_i \\ \mathbf{e}_\Psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega_r \frac{L_m}{L_r} \mathbf{J}_2 \\ 0 & -\frac{\omega_r}{L_r} \mathbf{J}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_i \\ \mathbf{e}_\Psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_i \mathbf{e}_i \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)与式(3)的系数矩阵是一致的。根据上一节对电机无源性的分析, 可以选择与式(5)类似的存储函数作为 Lyapunov 函数:

$$V_e = \frac{1}{2} [\mathbf{e}_i^T \quad \mathbf{e}_\Psi^T] \begin{bmatrix} \sigma L_s \mathbf{I}_2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_r} \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_i \\ \mathbf{e}_\Psi \end{bmatrix} \quad (14)$$

对其求导有

$$\begin{aligned} \dot{V}_e &= [\mathbf{e}_i^T \quad \mathbf{e}_\Psi^T] \begin{bmatrix} \sigma L_s \mathbf{I}_2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_r} \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{e}}_i \\ \dot{\mathbf{e}}_\Psi \end{bmatrix} = -[k_i + R_s - \omega_r^2 \frac{L_m}{4R_r}] \times \\ &\mathbf{e}_i^T \mathbf{e}_i - \left[\frac{\sqrt{R_r} L_m}{L_r} e_1 - \frac{\omega_r L_m}{2\sqrt{R_r}} e_2 - \frac{\sqrt{R_r}}{L_r} e_3 \right]^2 - \\ &\left[\frac{\sqrt{R_r} L_m}{L_r} e_2 + \frac{\omega_r L_m}{2\sqrt{R_r}} e_1 - \frac{\sqrt{R_r}}{L_r} e_4 \right]^2 \end{aligned}$$

显然, 根据 Lyapunov 定理, 适当地选择反馈增益 k_i , 使得 Lyapunov 函数的导数负定, 则误差系统(13)在原点渐进稳定, 也就保证了跟踪误差的收敛。

4 能量优化

对于给定速度的电机驱动系统, 在一定负载下的稳态输出功率也随之确定。进入稳态时电机的输出转矩与负载转矩相等, 此时根据不同的负载调整控制系统的磁链给定值, 可以减小系统的能量损耗。由电机的能量平衡关系(6)可知, 系统损耗的功率为输入的电功率 P_{in} 减去输出的机械功率 P_{out} , 如下式所示:

$$P_{loss} = \mathbf{i}_s^T \mathbf{u}_s - \frac{\omega_r}{n_p} T_e \quad (15)$$

代入上节的控制律, 并考虑系统稳态时的情况, 整理可得:

$$P_{loss} = \frac{R_s}{L_m^2} \Psi_{ref}^2 + \frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{n_p^2 L_m^2} \frac{T_e^2}{\Psi_{ref}^2}$$

令 $\frac{\partial P_{loss}}{\partial \Psi_{ref}} = 0$, 可得:

$$\Psi_{ref}^{opt} = \sqrt{\frac{T_e}{n_p} \left(\frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{R_s} \right)^{\frac{1}{4}}} \quad (16)$$

可见, 最优磁链给定值与负载转矩的开方成正比关系。负载减小时, 要降低控制器的磁链给定才

能获得较高的效率。当然,最后所得到的磁链给定值不能大于其额定值,以免引起磁通饱和。因此,低负载时能量优化的结果更为明显。

5 仿真结果

为了验证上述方法,本节给出了仿真结果。电机参数如下:额定功率 22 kW,额定转速 1 765 r/min,极对数 2,定子电阻 0.041 3 Ω ,转子电阻 0.040 7 Ω ,定子电感为 13.65 mH,转子电感为 13.95 mH,互感为 13.28 mH。

在额定负载下,给定额定转速和额定转子磁链幅值 0.82 Wb,电机的转速和磁链响应曲线见图 1。可见,本文提出的无源化控制方法效果令人满意。

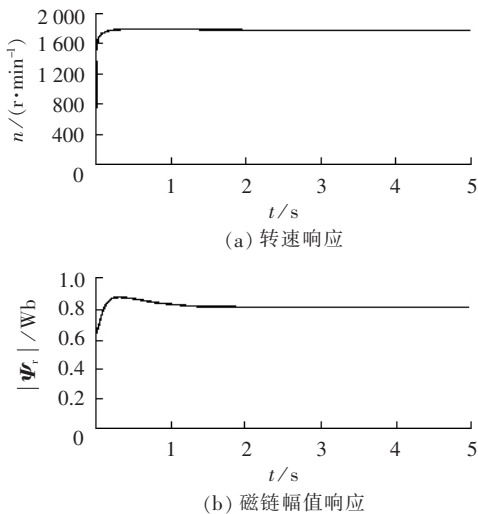


图 1 电机转速与磁链幅值曲线

Fig.1 Curves of rotor speed and flux

在同样转速、转矩下,电机的磁链不同,则电机输入功率即损耗也不同。式(16)给出了使得损耗最小的最优磁链给定值。

图 2 为不同负载下的输入功率-转子磁链曲线,其中 1,2,3 所示的 3 条曲线表示额定转速下,负载分别为 100%、50% 及 25% 额定负载时,不同转子磁链给定值所对应的输入功率。

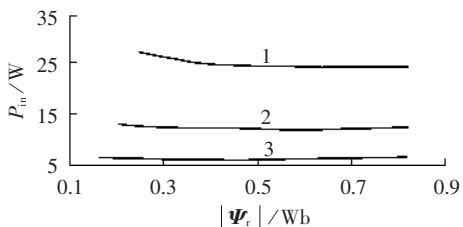


图 2 不同负载下的输入功率-转子磁链曲线

Fig.2 Input power versus rotor flux under different loads

可以验证,图中使输入功率最小的磁链给定值与式(16)是一致的。转矩由励磁电流和转矩电流的乘积决定,而电机的损耗主要是由电流产生。

因此,按照式(16)对两者进行适当分配,可以

达到减少损耗的目的。

在 50% 额定负载时,采用最优磁链给定值代替通常所用的额定磁链,可以使损耗降低 40%,而在 25% 额定负载时,损耗可以降低 50%。可见,系统轻载时,本文的方法具有明显的节能效果。

6 结论

本文应用无源化方法设计了感应电机调速系统。在控制器的设计过程中未用到任何线性化方法,完整地保留了系统中有利的非线性结构,具有控制器简单、鲁棒性好等优点。在此基础上又给出了使电机能量损耗最小的最优磁链给定值。仿真结果验证了以上结论。

参考文献:

- [1] BOSE B K. High performance control and estimation in ac drives[A]. **23rd International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation**[C]. New Orleans, USA: IECON, 1997. 377-385.
- [2] LEE A M, FU L C, TSAI C Y, *et al.* Nonlinear adaptive speed and torque control of induction motors with unknown rotor resistance[J]. **IEEE Trans. on Ind. Electr.**, 2001, 48(2): 391-401.
- [3] FEEMSTER M, AQUINO P, DAWSON D M, *et al.* Sensorless rotor velocity tracking control for induction motors [J]. **IEEE Trans. on Contr. Sys. Tech.**, 2001, 9(4): 645-653.
- [4] GOKDERE L U, SIMAAN M A. A passivity based method for induction motor control [J]. **IEEE Trans. Ind. Electronics**, 1997, 44(5): 688-695.
- [5] CECATI C, ROTONDALE N. Torque and speed regulation of induction motors using the passivity theory approach [J]. **IEEE Trans. Ind. Electronics**, 1999, 46(1): 119-127.
- [6] 马进, 席在荣, 梅生伟, 等. 基于 Hamilton 能量理论的发电机汽门与励磁非线性稳定控制器的设计 [J]. **中国电机工程学报**, 2002, 22(5): 88-93.
MA Jin, XI Zai-rong, MEI Sheng-wei, *et al.* Nonlinear stabilizing controller design for the steam-valving system and excitation system based on Hamiltonian energy theory[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2002, 22(5): 88-93.
- [7] 王智涛, 梅生伟. 基于无源控制方法的 TCSC 控制器及其仿真研究 [J]. **电力系统自动化**, 2003, 27(1): 11-15.
WANG Zhi-tao, MEI Sheng-wei. TCSC design based on passivity-based control and the simulation results[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2003, 27(1): 11-15.
- [8] SUN Y Z, LIU Q J, SONG Y H, *et al.* Hamiltonian modelling and nonlinear disturbance attenuation control of TCSC for improving power system stability[J]. **IEE Proc. -Control Theory Appl.**, 2002, 149(4): 278-284.

(责任编辑: 柏英武)

Energy optimized control of induction motors based on passivity theory

LIN Fei¹, LIU Xiao-min², ZHENG Qiong-lin¹

(1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. North China Power Dispatching Bureau, Beijing 100053, China)

Abstract: A passivity-based controller taking account of efficiency optimization for induction motor is proposed. Based on the passivity theory of dynamic system, in which the energy exchange plays a central role, the speed control system of induction motor is designed. The rotor speed and flux converge to the given value asymptotically with the energy function as Lyapunov function. From the energy-balance equation of passive system, the optimal rotor flux is obtained to minimize the energy loss. Simulative results show a perfect performance of drive system, and the power loss is reduced remarkably under light load.

This project is supported by Sci. and Tech. Fund of Beijing Jiaotong University(2004RC013).

Key words: induction motor; nonlinear control; passivity-based control; energy optimized