

基于 EKF 的永磁同步电机定子绕组 和转子磁铁温升估计

张忠英¹, 姜晓亮¹, 孙频东¹, Zhu Z Q²

(1. 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京, 210042;

2. Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Sheffield, UK)

[摘要] 选 dq 坐标下的电机模型, 用 3 阶 EKF 算法, 来估计电机定子绕组的电阻值和转子磁体的磁通量, 和静态时 20℃ 室温下测得的定子绕组阻值和转子磁通量作比较, 进而计算出对应的电机定子绕组和转子绕组的温度值. 电阻值估计和磁通估计分别独立进行, 通过对实验电机的实际测量和估计值进行比较具有较好的一致性.

[关键词] 扩展的卡尔曼算法, 交流永磁电机, 参数辨识, 交流拖动

[中图分类号] TP395 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-4292(2011)01-0045-06

Estimation of Temperature Rises in Stator Winding and Rotor Magnet of PMSM Drives Based on EKF

Zhang Zhongying¹, Jiang Xiaoliang¹, Sun Pingdong¹, Zhu Z Q²

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China;

2. Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Sheffield, UK)

Abstract: dq coordinates motor model is selected, with 3-order EKF algorithm to estimate the stator winding resistance and rotor winding magnet flux. Then compared with the stator resistance and rotor flux which measured under 20℃ room temperature when in static, and the corresponding stator winding and rotor winding temperature are calculated. Resistance and flux estimates were estimated independently. On the experimental motor, actual measurements and estimated values are compared with good agreement.

Key words: extended Kalman algorithm, permanent AC motor, parameter identification, AC drives

电机温度测量, 尤其是在动态运行的情况下是一个很有意义的工作, 目前有多种方法^[1-3], 例如热等效电路法, 用简化的热源和热阻构成热等效电路, 将温度场的问题转化为集中参数的热路问题进行计算, 此方法虽具有计算简单、工作量小, 且能给出电机铁心和绕组粗略的平均温度, 但温度误差相对较大且不适合用作电机的实时状态检测; 此外还有数值计算法、有限元法和等效热网络法等, 这些方法都需要了解电机内部的物理结构, 再建立相应的模型进行分析计算, 比较复杂; 在电机中加入热电阻、热敏电阻或热电偶可以用于电机动态的温度测量, 但需要在电机制造过程中加以安装, 而且一般只用于对电机定子温度的测量, 转子中埋设温度传感器件一般不宜检测. 因此, 在电机运行时直接测量电机转子内部的温度比较困难. 用卡尔曼滤波器, 除能成功地估计电机的转子转角位置和速度外, 还能估计电机运行过程中定子绕组电阻和转子磁通的变化^[4-8]. 根据定子绕组阻值和温度之间的关系, 永磁电机的定子绕组的阻值变化在一定范围内, 反映了定子的温度变化; 另外, 根据温度和磁通变化的关系曲线, 在一定程度上反映了转子的温度变化. 在不需要增加特殊的设备和埋设相应的热敏元件, 同时对电机的物理结构不十分清楚的情况下, 也能对电机的温度进行观测和估计. 由于在正常运行时磁损耗和电损耗一般不相等, 电机定、转子的温度具有一定的梯度分布, 定子绕组和转子磁钢的温升与定子铁心和转子铁心的温升有一定的差异, 所以, 用卡尔曼滤波器估计定、转子的电阻、磁通变化来实现对电机的温度测量是一种相对经济、方便和有效的办法.

收稿日期: 2010-05-28.

通讯联系人: 孙频东, 副教授, 研究方向: 电力电子技术. E-mail: sunpingdong@njnu.edu.cn

1 温度观测原理

考虑到铜材料电导系数的温度特性,通过对永磁电机定子绕组电阻当前阻值和额定阻值变化的观测,可以间接地求出定子绕组的温度值;同理由于铁磁材料的温度敏感性,通过对永磁体磁通当前值和额定值变化的观测也可以间接地得到转子温度的变化.

1.1 对定子绕组温度值的观测

在 dqO 坐标下,交流永磁同步电机的模型为:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r + pL_d & -\omega_r L_q \\ \omega_r L_d & r + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \lambda_m \end{bmatrix}. \quad (1)$$

转矩方程为:

$$T = \frac{3}{2} p i_q [\lambda_m - (L_q - L_d) i_d]. \quad (2)$$

上式中, λ_m 为转子主磁通; L_d 、 L_q 为定子绕组 dq 轴上的电感; r 为定子绕组的相电阻; ω_r 为转子的电角速度; p 为微分算子. 对于 IPM 电机通常 $L_d \neq L_q$, 但对于 SMPM 电机通常有 $L_d = L_q = L$. 因此对于 SMPM(表贴式同步电机) 电机具有更简单的模型, 以下讨论 SMPM 电机.

如果考虑电机系统的实际情况将温度变化引起的定子绕组电阻变化作为慢变量, 电流和电压作为快变量, 分析电流、电压平衡方程时认为定子绕组电阻的变化为 0, 用随机滤波器可以实现对永磁电机定子绕组电阻值的观测, 则电机定子绕组电阻值的估计模型如下:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} r \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{r}{L} i_d + \omega_r i_q + \frac{u_d}{L} \\ -\frac{r}{L} i_q - \omega_r i_d - \frac{\lambda_m}{L} \omega_r + \frac{u_q}{L} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

(3) 式中, 各物理量的含义同上. 状态向量 $\mathbf{x} = [r \ i_d \ i_q]^T$, 输出向量 $\mathbf{y} = [i_d \ i_q]^T$. 故式(3) 可表示为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, u), \\ \mathbf{y} = h(\mathbf{x}). \end{cases} \quad (4)$$

用 Jacobian 矩阵将式(4) 线性并离散化, 再考虑系统的随机干扰 w_k 和测量误差 v_k 后的状态方程为:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}(\hat{\mathbf{x}}_k) \delta \mathbf{x}_k + w_k, \quad \mathbf{y}_k = \mathbf{\Delta}(\hat{\mathbf{x}}_k) \delta \mathbf{x}_k + v_k. \quad (5)$$

其中, $\delta \mathbf{x}_k$ 为离散化后状态变量的增量; \mathbf{F} 阵和 $\mathbf{\Delta}$ 阵分别如下:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}_k) = \mathbf{I} + \frac{\partial f(\mathbf{x}, u)}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_k} \mathbf{T}_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -\frac{T_s}{L} i_d & 1 - \frac{T_s}{L} r & \omega_r T_s \\ -\frac{T_s}{L} i_q & -\omega_r T_s & 1 - \frac{T_s}{L} r \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中, T_s 为系统采样周期.

$$\mathbf{\Delta}(\mathbf{x}_k) = \frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_k} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

根据物理学定理, 定子绕组的电阻和绕组导线的电阻率 ρ 有关, 而电阻率 ρ 又和温度 T 和铜线的温度系数 α_p 有关, 他们之间的关系如下:

$$\rho_T = \rho_{20} \times [1 + \alpha_p (T - 20)], \quad (8)$$

式中, $\alpha_p = 0.004/^\circ\text{C}$ 是铜的温度系数; ρ_{20} 是铜材料在 20°C 时的电阻率. ρ_T 是在温度值为 $T^\circ\text{C}$ 时的铜线电阻率. 因此铜线在 20°C 时的电阻值和其在 $T^\circ\text{C}$ 时的电阻值有:

$$r_T = r_{20} \times [1 + \alpha_p (T - 20)]. \quad (9)$$

由此推出永磁电机定子绕组温度值和定子绕组在该温度值下的电阻值为:

$$T = 20 + [r_T/r_{20} - 1]/\alpha_p. \quad (10)$$

1.2 对电机转子温度值的观测

用随机滤波器还可以实现对永磁电机转子磁通值的观测. 用和上节相似的原理, 考虑电机系统的转子磁通变化为慢变量, 而电流和电压变化为快变量, 在分析电流、电压平衡方程时认为转子磁通变化为 0, 则电机的磁通观测模型有:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_m \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{r}{L}i_d + \omega_r i_q + \frac{u_d}{L} \\ -\omega_r i_d - \frac{r}{L}i_q - \frac{\lambda_m}{L}\omega_r + \frac{u_q}{L} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

模型的状态向量 $\mathbf{x} = [\lambda_m \ i_d \ i_q]^T$, 输出向量 $\mathbf{y} = [i_d \ i_q]^T$, 将(8) 用 Jacobian 矩阵作线性和离散化处理, 得到和电阻辨识模型类似的 \mathbf{F} 阵和 $\mathbf{\Delta}$ 阵, 分别有:

$$\mathbf{F}(x_k) = \mathbf{I} + \frac{\partial f(x, u)}{\partial x} \bigg|_{x=x_k} T_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{r}{L}T_s & \omega_r T_s \\ -\frac{\omega_r}{L}T_s & -\omega_r T_s & 1 - \frac{r}{L}T_s \end{bmatrix}, \quad (12)$$

其中, T_s 为系统采样周期.

$$\mathbf{\Delta}(x_k) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} \bigg|_{x=x_k} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

对于永磁材料, 如果忽略温度对磁饱和的影响, 而且假定温度变化对应的去磁效应是可逆的, 磁铁的工作点选在线性区, 则用磁体在 $T^\circ\text{C}$ 时的剩磁 B_{rT} 和温度之间的关系有:

$$B_{rT} = B_{r20} \times [1 + \alpha_{B_r}(T - 20)]. \quad (14)$$

对于 NdFeB 材料, 式中 $\alpha_{B_r} = 0.001/^\circ\text{C}$, B_{r20} 为 B_r 在 20°C 时的剩磁. 因此由上式可以得到计算转子磁通公式如下:

$$\lambda_m = \lambda_{m20} \times [1 + \alpha_{B_r}(T_m - 20)]. \quad (15)$$

式中, λ_{m20} 是在 20°C 时的电机转子主磁通.

对式(15) 进行变换可得计算转子温度 T_m 的公式如下:

$$T_m = 20 + [\lambda_m/\lambda_{m20} - 1]/\alpha_{B_r}. \quad (16)$$

其中, 通过对 λ_m 值的估计, 可以计算出转子的温度值 T_m .

1.3 随机滤波器的递推算法

用基于卡尔曼滤波器的随机递推算法, 算法的递推式如下:

$$\begin{cases} K_{k+1} = P_{k+1/k} \Delta_k^T [\Delta_k P_{k+1/k} \Delta_k^T + R]^{-1}, \\ \hat{x}_{k+1/k+1} = \hat{x}_{k+1/k} + K_{k+1} (y_{k+1} - h_k(\hat{x}_{k+1/k})), \\ P_{k+1/k+1} = (I - K_{k+1} \Delta_k) P_{k+1/k}. \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} K_{k+1} = P_{k+1/k} \Delta_k^T [\Delta_k P_{k+1/k} \Delta_k^T + R]^{-1}, \\ \hat{x}_{k+1/k+1} = \hat{x}_{k+1/k} + K_{k+1} (y_{k+1} - h_k(\hat{x}_{k+1/k})), \\ P_{k+1/k+1} = (I - K_{k+1} \Delta_k) P_{k+1/k}. \end{cases} \quad (18)$$

递推算法需要几个初始值, 分别取值如下^[4]:

$$\mathbf{P}_{0/0} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 20 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

$\mathbf{P}, \mathbf{Q}, \mathbf{R}$ 等参数的确定, 可以通过优化的方法获取, 通常选取不同的值会影响算法的收敛速度.

2 估计结果

在电机控制系统中,电机的参数如表 1 所示. 电机运行时检测到的位置及转速曲线如图 1 所示. 测量点的转速为 320 r/min; 负载转矩为 $5\text{N}\cdot\text{m}$,通过传感器得到的输入电压在 α 、 β 轴下的波形如图 2 所示,通过传感器得到的输入电流经 dq 坐标变换后的波形如图 3 所示; 考虑到卡尔曼滤波器辨识出的电阻和磁通曲线带有毛刺和脉动性,因此,需要经过滤波处理. 根据波形的特点,加入均值滤波使其变成光滑曲线,经过滤波处理后的电阻、磁通曲线,收敛于电阻和磁通的实际值,滤波后的波形如图 4 所示,滤波后定子和转子的温度曲线如图 5 所示.

表 1 实验水磁电机的参数
Table 1 Parameters of a PMSM

额定电流	4 A
额定速度	400 r/min
极对数	5
直流耦合电压	48 V
每相电阻	1 ohm
主磁通	0.077 6 Wb
L_d	$3.366\text{e}^{-3}\text{H}$
L_q	$3.366\text{e}^{-3}\text{H}$
阻尼系数	0
惯量	$0.8\text{e}^{-5}\text{kg}\cdot\text{m}^2$
负载转矩	5 (N·m)
采样时间 T_s	$50\text{e}^{-6}\text{s}$

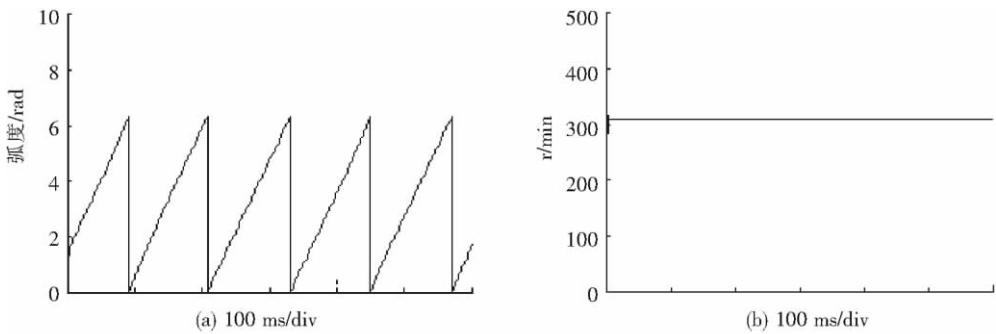


图 1 电机的位置和转速变化曲线
Fig.1 Motor position and speed curves

值得注意的是,温度对定子电阻和转子磁通的影响是同时的,本文在辨识定子电阻时没有考虑温度变化对转子磁通的影响,实际上电阻的温度系数要大于磁通变化的温度系数近 3 倍,所以需要对辨识结果作误差分析和校正,考虑比较极端的情况,如电机在额定工作点附近,温度短时间内上升达到 50°C 时,若在电机定、转子温度相差不大,则用文中使用的方法,估计得到定子的电阻值和实际的电阻值误差小于 -5.8% . 因此,温度误差也应在相应的范围之内. 在其他温度值下,误差曲线如图 6 所示. 如果能在估计定子的电阻值时及时校正磁通随温度的变化值,那么所得的估计误差将更小. 而在低于额定转速情况下,误差值将减小,当转速下降到额定值的 50% 时,电阻估计值和实际值的误差约为 -1.7% . 因此,估计结果在稍作修正后,是可用的.

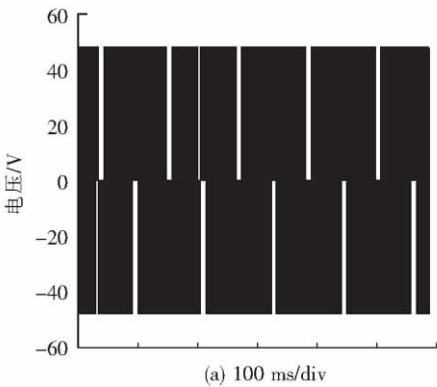


图 2 电机电压(a)和(b)波形
Fig.2 Voltages waveforms

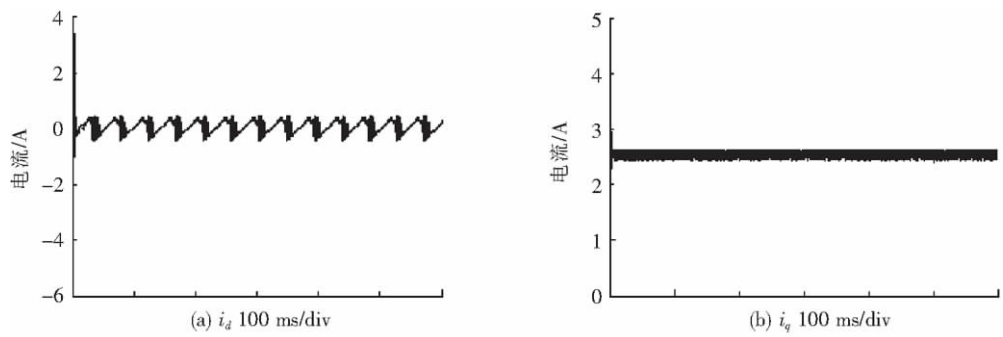


图 3 电机电流 i_d, i_q 波形
Fig.3 Motor currents i_d, i_q

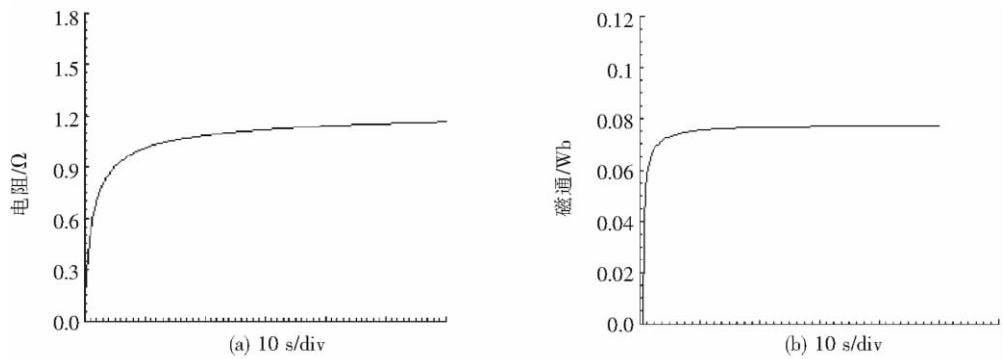


图 4 电阻、磁通的估计值经滤波后的曲线
Fig.4 The estimation of stator resistance and rotor flux through the filter

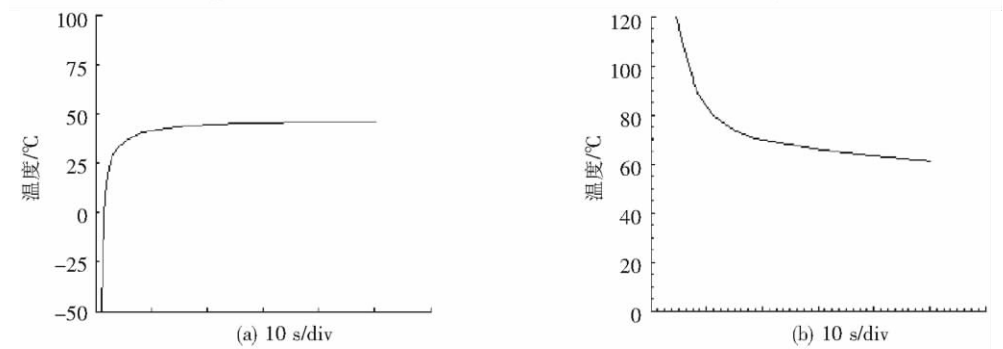


图 5 经滤波后定子、转子的温度估计值
Fig.5 The estimated temperature of the stator and rotor through the filter

3 结论

用扩展的卡尔曼滤波器估计交流永磁电机的定、转子工作温度是一项有意义的探索,虽然用卡尔曼滤波器可以估计永磁电机的电阻和磁通变化,但由温度变化引起的电阻值和转子磁通的变化值并不明显,即铜线的温度系数和永磁材料的温度系数值相对较小,所以估计过程中对干扰的排除十分重要,需要有一个性能良好的滤波器及合理的误差处理方法.考虑到温度的变化会同时影响电机转子磁通和定子电阻的值,但电阻的变化率要大于磁通的变化率近 4 倍,所以在估计定子电阻时,假定磁通不变,用得到的温度变化值来修正定子的电阻

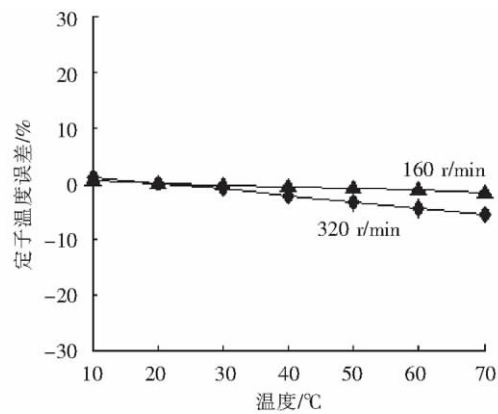


图 6 定子温度及转子温度估计的误差曲线
Fig.6 The error curves of the estimated temperature of the stator and rotor

值,然后再估计转子磁通值,这样得到的结果会比较准确.通过对电机绕组电阻和转子磁通变化量的估计,可以间接推算出电机定子绕组和转子中温度的变化,进而了解到电机系统的工作状况,这对减少电机的故障率,提高电机的控制性能和延长电机的使用寿命具有一定的作用.特别在大、中型电机系统中,对增加电机的安全性和稳定性上具有更加重要的意义.

[参考文献](References)

- [1] 李和明,李俊卿.电机中温度计算方法及其应用综述[J].华北电力大学学报,2005,32(1):1-5.
Li Heming, Li Junqin. Motor temperature calculation and its application[J]. Journal of North China Electric Power University, 2005,32(1):1-5. (in Chinese)
- [2] 许伯强,李明和,朱凌,等.发电机定转子绕组温度在线监测新方法[J].电力系统自动化,2002,35(1):35-38.
Xu Boqiang, Li Minghe, Zhu Ling, et al. Generator rotor winding temperature of a new method of online monitoring[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002,35(1):35-38. (in Chinese)
- [3] Beguenane R, Benbouzid M E H. Induction motors thermal monitoring by means of rotor resistance identification[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999,14(3):566-570.
- [4] Zhu X, Zhu Z Q, Howe D. Application of full-order and simplified EKF to sensorless PM brushless AC machines[J]. Int Journal of Automation and Computing, 2006,2(1):179-186.
- [5] Bolognani S, Oboe R, Zigliotto M. Sensorless full-digital PMSM drive with EKF estimation of speed and rotor position[J]. IEEE Trans Industrial Electronics, 1999,14(4):868-873.
- [6] YoonHo Kim, YoonSang Kook. High performance IPMSM drives without rotational position sensors using reduced-order EKF[J]. IEEE Transactions Energy Conversion, 1999,14(4):868-873.
- [7] Cernat M, Comnac V, Cernat R M. Sensorless control of interior permanent magnet synchronous machine using a Kalman filter [C]// Industrial Electronics, ISIE 2000. Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on, 2000,2(4/8):401-406.
- [8] Bolognani S, Tubiana L, Zigliotto M. EKF-based sensorless IPM synchronous motor drive for flux-weakening applications[J]. IEEE Transactions Industry Applications, 2003,39(3):768-775.

[责任编辑:刘 健]