

永磁同步发电机混沌运动分析及最优输出反馈 H_∞ 控制

杨益飞 骆敏舟 邢绍邦 韩晓新 朱焜秋

Analysis of chaos in permanent magnet synchronous generator and optimal output feedback H_∞ control

Yang Yi-Fei Luo Min-Zhou Xing Shao-Bang Han Xiao-Xin Zhu Huang-Qiu

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 040504 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.040504

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.040504>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphys.ac.cn/CN/Y2015/V64/I4>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

参数不确定统一混沌系统的鲁棒分数阶比例微分控制

Robust fractional-order proportional-derivative control of unified chaotic systems with parametric uncertainties

物理学报.2015, 64(5): 050503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.050503>

一种分数阶混沌系统同步的自适应滑模控制器设计

Design of an adaptive sliding mode controller for synchronization of fractional-order chaotic systems

物理学报.2015, 64(4): 040505 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.040505>

间歇反馈法实现单模 Lorenz-Haken 激光系统的周期镇定与同步

Realization of periodical control and synchronization of single-mode laser Haken-Lorenz system with intermittent feedback

物理学报.2015, 64(3): 030504 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.030504>

基于量子并行粒子群优化算法的分数阶混沌系统参数估计

Research on particle swarm optimization algorithm with characteristic of quantum parallel and its application in parameter estimation for fractional-order chaotic systems

物理学报.2015, 64(3): 030505 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.030505>

基于快速全线性预测控制的混沌系统控制与同步

Control and synchronization in chaotic systems based on fast linear predictive control

物理学报.2015, 64(1): 010502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.010502>

永磁同步发电机混沌运动分析及最优输出反馈 H_∞ 控制*

杨益飞^{1)2)†} 骆敏舟²⁾ 邢绍邦¹⁾ 韩晓新¹⁾ 朱焯秋³⁾

1) (江苏理工学院电气信息工程学院, 常州 213001)

2) (中国科学院合肥物质科学研究院, 先进制造技术研究所, 常州 213164)

3) (江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013)

(2014年7月17日收到; 2014年9月23日收到修改稿)

以永磁同步发电机为研究对象, 在两相同步旋转坐标系下建立了数学模型. 针对永磁同步发电系统在某些参数和工作条件下出现的混沌运动现象, 在考虑系统扰动情况下通过求解 Riccati 方程得到满足最小性能指标的输出反馈控制增益矩阵, 并将该增益矩阵反馈到系统中, 用来改善系统性能. 仿真结果表明, 基于 Riccati 方程的最优输出反馈 H_∞ 控制, 在系统发生扰动时, 能对混沌运动下永磁同步发电机做出快速响应, 使系统脱离混沌运动, 运行稳定.

关键词: 永磁同步发电机, 混沌控制, 扰动抑制, 输出反馈

PACS: 05.45.Gg, 05.45.Ac

DOI: 10.7498/aps.64.040504

1 引言

永磁同步发电机 (permanent magnet synchronous generator, PMSG) 是一个多变量、强耦合的非线性系统, 在某些参数及工作条件下会出现混沌运动, 这将影响到它提供稳定的电力供应. 消除发电机中的混沌现象则是确保系统稳定运行必须解决的重要问题^[1,2].

自从 Gledzer-Ohkitani-Yamada 控制方法提出以来, 出现了大量的混沌控制理论, 并普遍应用于工程实践的各个领域^[3-6]. Hemati 在 1994 年通过人为引进参数建立了第一个永磁同步电机混沌模型. 此后张波等^[7]通过尺度变换和线性仿射变换建立了一个永磁同步电机混沌模型. 吴忠强等^[8]利用微分几何中状态反馈准确线性化方法将非线性系统的状态方程准确地转为完全可控的线性系

统, 以控制永磁同步电机的混沌运动, 但实现较困难. 韦笃取等^[9]考虑了混沌运动状态下 PMSG 不确定性的情况, 设计了故障观测器, 在系统发生故障时, 能对混沌状态下 PMSG 的故障做出准确估计. 任丽娜等^[10]基于 Hamilton 模型设计了 PMSG 混沌运动状态下 H_∞ 控制方案, 能够在对混沌运动进行控制的同时有效抑制外部干扰. 此外, 文献^[10]在控制方法中并没有将风速等干扰考虑到系统中, 这使得系统的实用性降低. 以上方法均能从理论上解决系统中的混沌问题, 但均需进一步完善.

本文推导了 PMSG 数学模型, 得出了在一定参数下产生混沌运动, 再通过文献^[9, 11]的直接反馈线性化方法将其转化为线性模型, 最终提出解决混沌现象的基于 Riccati 方程的最优输出反馈 H_∞ 控制, 以解决最优控制以及 H_∞ 控制所构成的输出反馈控制计算方法求解非凸问题所面临的困难. 仿

* 国家自然科学基金 (批准号: 60974053)、江苏省自然科学基金 (批准号: BK2012707)、江苏省高校自然科学基金项目 (批准号: 12KJJB470004)、常州市科技支撑计划项目 (批准号: CE20120100)、江苏理工学院创新团队 (批准号: 20510311303) 和江苏理工学院教授博士专项项目 (批准号: KYY13001) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: brucehoyang@gmail.com

真结果表明,在考虑风速等扰动存在的情况下,最优输出反馈 H_∞ 控制对于混沌运动下PMSG具有较好的鲁棒性.

2 PMSG 风电系统模型及其混沌性态

2.1 PMSG 系统模型

风力发电机在风的作用下旋转,带动永磁电机转动,一旦达到切入风速就可以并网发电.风力发电机的动态方程可以表示为

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - B\omega, \quad (1)$$

$$T_m = P_M/\omega = \rho\pi r^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 / (2\omega), \quad (2)$$

式中, T_m 为风对风轮机产生的驱动转矩; P_M 为风轮机所俘获的风能; v 为风速; r 为风轮机转子半径; ρ 为空气密度; $C_p(\lambda, \beta)$ 为功率系数,由风轮机的类型和运行条件决定; β 为桨距角; λ 为叶尖速比; ω 为风机的转子速度; J 为风力系统的转动惯性系数; B 为风力发电系数摩擦系数.

PMSG 在风力机的驱动下,其动态方程为

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L} R u_d + \omega_e i_q - \frac{1}{L} u_d, \quad (3)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L} u_q - \omega_e i_d - \frac{1}{L} \omega_e \psi_f - \frac{1}{L} R i_q, \quad (4)$$

式中, i_d, i_q 分别为发电机 d, q 轴的电流分量; u_d, u_q 分别为发电机 d, q 轴的电压分量; R 为定子电阻; ω_e 为发电机电角频率, $\omega_e = p\omega$, 其中 p 为电机极对数.

PMSG 的电磁转矩方程为

$$\begin{aligned} T_e &= p(\psi_d i_q - \psi_q i_d) \\ &= p[(L_d - L_q) i_d i_q + \psi_f i_q], \end{aligned} \quad (5)$$

式中, L_q, L_d 为 d, q 的电感; ψ_f 为永磁体的磁链.因为转子结构是对称形式,这里假设 $L_q = L_d = L$, 以此简化模型结构,得到

$$T_e = p\psi_f i_q. \quad (6)$$

则在 dq 同步旋转坐标系下,建立的PMSG系统的数学模型为

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} (T_m - p\psi_f i_q - B\omega), \\ \frac{di_d}{dt} &= -\frac{1}{L} R i_d + \omega_e i_q + \frac{1}{L} u_d, \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{1}{L} u_q - \omega_e i_d - \frac{1}{L} \omega_e \psi_f - \frac{1}{L} R i_q. \end{aligned} \quad (7)$$

2.2 PMSG 系统的混沌属性

当风力发电机速度较低或者接近于PMSG发电临界速度,且其他参数匹配的条件下,PMSG出现无规则振荡,电能和频率不稳定,系统将处于混沌运动状态,这严重地危害到了电能输出品质,甚至导致机电系统的崩溃.因此,有必要采取有效方法消除这种混沌现象.这里选取参数 $L = 14.25 \text{ mH}, R = 0.9 \Omega, J = 4.7 \times 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}^2, B = 0.0162 \text{ N}\cdot\text{rad}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$. 系统初值为 $(\omega, i_d, i_q) = (0.5, 0.5, 0.5)$, 采用四阶龙格-库塔算法,取积分步长 $\Delta t = 0.01$, 双精度求解(7)式,在气隙转矩为250—2500 N·m条件下进行试验,发现此时PMSG呈现混沌状态.图1为 $T_m = 250 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时的混沌吸引子,证明了PMSG本体混沌运动的存在(x, y, z 分别对应 ω, i_d, i_q).

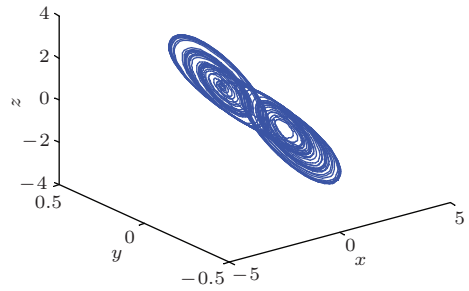


图1 PMSG 中的混沌吸引子

3 基于最优输出反馈 H_∞ 控制的 PMSG 中混沌运动的控制

综上所述,PMSG系统(7)是一个多变量、强耦合的非线性系统.这里通过直接反馈线性化将系统(7)转换为所对应的带干扰的线性模型(8),从文献[1, 11]直接得出线性化后的数学模型如下:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{B_s}{J} & -\frac{2B_s^2}{3p^2 J \psi_f} \\ 0 & \frac{3p^2 \psi_f}{2J} & -\frac{B_s}{J} \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{2J}{3p^2 \psi_f} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{u} \\ &+ \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{2B_s}{3pJ\psi_f} \\ -\frac{p}{J} \end{bmatrix} \mathbf{w}, \end{aligned}$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}. \quad (8)$$

PMSG 混沌控制系统 (8) 是一个多变量、强耦合的非线性系统. 设状态变量

$$\mathbf{x} = [i_d \ i_q \ \omega]^T, \quad \mathbf{u} = [u_d \ u_q]^T.$$

为了下面方便分析, 将其表示为如下的考虑伴随扰动的线性时不变系统的标准式:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{D}\mathbf{w}, \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x}, \end{aligned} \quad (9)$$

其中 \mathbf{D} 是扰动输入矩阵.

根据 (9) 式, 并结合以下的控制量 \mathbf{u} , 得出整个 PMSG 混沌控制系统输出反馈控制律:

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{y} = -\mathbf{K}\mathbf{C}\mathbf{x}, \quad (10)$$

其中 \mathbf{K} 通常选择为系统最小化性能指标的恒定反馈系数矩阵. 文献 [12—14] 介绍的最优输出反馈增益由求解三个耦合矩阵方程得到, 而本文提出的算法基于 Gadewadikar 等 [15] 所提的算法, 不需初始稳定增益. 下面首先介绍利用最优输出反馈 H_∞ 控制对 PMSG 的混沌进行控制的具体定义, 然后求出控制 PMSG 混沌的控制律 (10) 式的增益 \mathbf{K} 值, 并且论证该值的存在性. 最后, 根据 Riccati 代数方程得出 \mathbf{K} 值所必须满足的 L_2 增益的对称并且正定的矩阵 \mathbf{P} 值, 并由充要条件证明其合理性.

3.1 PMSG 混沌系统控制方法——最优输出反馈 H_∞ 控制

z 是性能输出矩阵, 表示为

$$z = \mathbf{E}\mathbf{x} + \mathbf{H}\mathbf{u}. \quad (11)$$

初始状态 $x(0) = 0$ 以及性能函数为

$$J = \int_0^\infty q(\mathbf{x}, \mathbf{u}) dt. \quad (12)$$

在 (10) 式的条件下, 其中

$$\begin{aligned} q(\mathbf{x}, \mathbf{u}) &= \mathbf{x}^T (\mathbf{E}^T \mathbf{E} - \mathbf{E}^T \mathbf{H} \mathbf{K} \mathbf{C} - \mathbf{C}^T \mathbf{K}^T \mathbf{H}^T \mathbf{E} \\ &\quad + \mathbf{C}^T \mathbf{K}^T \mathbf{H}^T \mathbf{H} \mathbf{K} \mathbf{C}) \mathbf{x} - \gamma^2 \mathbf{w}^T \mathbf{w}. \end{aligned} \quad (13)$$

设计控制系统使得图 2 中的 d 端口到 z 端口的 L_2 增益小于 γ , 其表达式如下:

$$\|\mathbf{T}_{zd}(j\omega)\|_\infty = \sup \frac{\|\mathbf{z}(j\omega)\|_2}{\|\mathbf{w}(j\omega)\|_2} \leq \gamma. \quad (14)$$

对于所有的 $T \geq 0$ 以及 $w \in L_2(0, T)$ 同时满足 $w \neq 0$ 以及 $x(0) = 0$. L_2 增益问题等价于博弈理论的求解方法 [16].

$$V(x_0) = \min_{u \in U} \max_w \int_0^\infty (\|\mathbf{E}\mathbf{x} + \mathbf{H}\mathbf{u}\|^2 - \gamma^2 \|\mathbf{w}\|^2) dt. \quad (15)$$

以上即为最优输出反馈 H_∞ 控制问题.

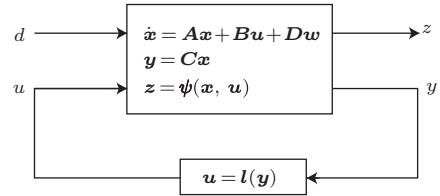


图 2 系统框图

3.2 PMSG 混沌控制系统输出反馈控制律增益的求解及证明

定义哈密顿函数 H 为

$$\begin{aligned} H(\mathbf{x}, p, \mathbf{w}, \mathbf{K}) &= (\partial V / \partial \mathbf{x})^T (\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{D}\mathbf{w}) \\ &\quad + \|\mathbf{E}\mathbf{x} + \mathbf{H}\mathbf{u}\|^2 - \gamma^2 \|\mathbf{w}\|^2, \end{aligned} \quad (16)$$

(16) 式对 \mathbf{w}, \mathbf{K} 求导的表达式如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial \mathbf{w}} (\mathbf{w}_*, \mathbf{K}_*) &= 0, \\ \frac{\partial H}{\partial \mathbf{K}} (\mathbf{w}_*, \mathbf{K}_*) &= 0. \end{aligned} \quad (17)$$

求解后, $\mathbf{w}_*, \mathbf{K}_*$ 表示为

$$\mathbf{w}_* = \frac{1}{\gamma^2} \mathbf{D}^T \mathbf{P}\mathbf{x}, \quad (18)$$

$$\mathbf{K}_* \mathbf{C} = \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{H}^T \mathbf{E}), \quad (19)$$

式中 $\mathbf{R} = \mathbf{H}^T \mathbf{H}$.

这里 Lyapunov 函数 $V(\mathbf{x})$ 是关于对称矩阵 \mathbf{P} 的二次型函数, 以达到 PMSG 混沌控制系统稳定性能,

$$V(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{P}\mathbf{x}, \quad (20)$$

(20) 式的导数为 $\partial V / \partial \mathbf{x} = 2\mathbf{P}\mathbf{x}$. 将 (20) 式代入 (16) 式经过整理得出

$$\begin{aligned} H(\mathbf{x}, p, \mathbf{w}, \mathbf{K}) &= 2\mathbf{x}^T \mathbf{P} [(\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}\mathbf{C})\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{w}] \\ &\quad + \mathbf{x}^T (\mathbf{E}^T \mathbf{E} - \mathbf{E}^T \mathbf{H} \mathbf{K} \mathbf{C} - \mathbf{C}^T \mathbf{K}^T \mathbf{H}^T \mathbf{E} \\ &\quad + \mathbf{C}^T \mathbf{K}^T \mathbf{H}^T \mathbf{H} \mathbf{K} \mathbf{C}) \mathbf{x} - \gamma^2 \mathbf{w}^T \mathbf{w}. \end{aligned} \quad (21)$$

将(18)和(19)式代入到(21)式得到

$$\begin{aligned} & H(\mathbf{x}, p, \mathbf{w}_*, \mathbf{K}_*) \\ = & \mathbf{x}^T [P(\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}^T\mathbf{E}) + (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}^T\mathbf{E})^T P \\ & + \mathbf{E}^T\mathbf{E} - \mathbf{E}^T\mathbf{H}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}^T\mathbf{E} \\ & + \frac{1}{\gamma^2}P\mathbf{D}\mathbf{D}^T P - P\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T P] \mathbf{x}. \end{aligned} \quad (22)$$

经过整理, 哈密尔顿函数 $H(\mathbf{x}, P, \mathbf{w}, K)$ 表示为

$$\begin{aligned} & H(\mathbf{x}, P, \mathbf{w}, K) \\ = & H(\mathbf{x}, p, \mathbf{w}_*, \mathbf{K}_*) - \mathbf{x}^T (P\mathbf{B}K\mathbf{C} - \mathbf{C}^T K^T \mathbf{B}^T P \\ & - \mathbf{E}^T \mathbf{H}K\mathbf{C} - \mathbf{C}^T K^T \mathbf{H}^T \mathbf{E} + P\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T P \\ & + \mathbf{E}^T \mathbf{H}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T P - \mathbf{E}^T \mathbf{E} + P\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}^T \mathbf{E} \\ & + \mathbf{E}^T \mathbf{H}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}^T \mathbf{E} + \mathbf{C}^T K^T \mathbf{H}^T \mathbf{H}K\mathbf{C}) \mathbf{x} \\ & - \frac{1}{\gamma^2} \mathbf{x}^T P\mathbf{D}\mathbf{D}^T P \mathbf{x} \\ & - \gamma^2 \mathbf{w}^T \mathbf{w} + 2\mathbf{x}^T P\mathbf{D}\mathbf{w}. \end{aligned} \quad (23)$$

将(19)式代入到(23)式的第二项, 得出

$$\begin{aligned} & \mathbf{x}^T (P\mathbf{B}K\mathbf{C} - \mathbf{C}^T K^T \mathbf{B}^T P - \mathbf{E}^T \mathbf{H}K\mathbf{C} \\ & - \mathbf{C}^T K^T \mathbf{H}^T \mathbf{E} + P\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T P \\ & + \mathbf{E}^T \mathbf{H}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T P - \mathbf{E}^T \mathbf{E} + P\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}^T \mathbf{E} \\ & + \mathbf{E}^T \mathbf{H}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}^T \mathbf{E} + \mathbf{C}^T K^T \mathbf{H}^T \mathbf{H}K\mathbf{C}) \mathbf{x} \\ = & \mathbf{x}^T [(K_*\mathbf{C} - K\mathbf{C})^T R \times (K_*\mathbf{C} - K\mathbf{C})] \mathbf{x}. \end{aligned} \quad (24)$$

将(18)式代入到(23)式, (23)式的后三项便可表示为

$$\begin{aligned} & \mathbf{x}^T \left(-\frac{1}{\gamma^2} P\mathbf{D}\mathbf{D}^T P \right) \mathbf{x} + 2\mathbf{x}^T P\mathbf{D}\mathbf{w} - \gamma^2 \mathbf{w}^T \mathbf{w} \\ = & -\gamma^2 \|\mathbf{w} - \mathbf{w}_*\|^2. \end{aligned} \quad (25)$$

由(19), (24)和(25)式可得

$$\begin{aligned} & H(\mathbf{x}, P, \mathbf{w}, K) \\ = & H(\mathbf{x}, p, \mathbf{w}_*, \mathbf{K}_*) \\ & + \mathbf{x}^T \left\| (K_*\mathbf{C} - K\mathbf{C})^T - (K_*\mathbf{C} - K\mathbf{C}) \right\|_R^2 \mathbf{x} \\ & - \gamma^2 \|\mathbf{w} - \mathbf{w}_*\|^2. \end{aligned} \quad (26)$$

这里 $\|\mathbf{V}\|_M^2$ 等价于 $\mathbf{V}^T M \mathbf{V}$. 因此可以得出以下表达式,

$$\begin{aligned} H(\mathbf{x}, P, \mathbf{w}, K_*) & \leq H(\mathbf{x}, P, \mathbf{w}_*, \mathbf{K}_*) \\ & \leq H(\mathbf{x}, P, \mathbf{w}_*, K). \end{aligned}$$

由此可以证明 \mathbf{w}_* , \mathbf{K}_* 是哈密尔顿函数 $H(\mathbf{x}, P, \mathbf{w}, K)$ 的鞍点, 说明PMSG混沌控制系统输出反馈控制律增益是合理存在的.

定理1 如果存在输出反馈控制律增益 $\mathbf{K}_* \in \mathbf{R}^m \times \mathbf{R}^n$ ($\mathbf{R}^m, \mathbf{R}^n$ 为实数集) 使得系统(8)稳定, 那么系统(8)满足上述 L_2 增益的条件为: 只存在一个对称并且正定的矩阵 $P \in \mathbf{R}^m \times \mathbf{R}^n$ 是以下 Riccati 代数方程的惟一解,

$$\begin{aligned} & P\mathbf{A} + \mathbf{A}^T P + \frac{1}{\gamma^2} P\mathbf{D}\mathbf{D}^T P - P\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T P \\ & + \mathbf{E}^T \mathbf{E} - \mathbf{E}^T \mathbf{H}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}^T \mathbf{E} - \mathbf{E}^T \mathbf{H}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T P \\ & - P\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}^T \mathbf{E} = 0. \end{aligned} \quad (27)$$

证明 充分性. 如果 $H(\mathbf{x}, P, \mathbf{w}_*, \mathbf{K}_*) = 0$, 那么(26)式即为

$$\begin{aligned} & H(\mathbf{x}, P, \mathbf{w}, K) \\ = & \mathbf{x}^T [(K_*\mathbf{C} - K\mathbf{C})^T R \\ & \times (K_*\mathbf{C} - K\mathbf{C})] \mathbf{x} - \gamma^2 \|\mathbf{w} - \mathbf{w}_*\|^2. \end{aligned} \quad (28)$$

因为 $\mathbf{u} = -K\mathbf{y} = -K\mathbf{C}\mathbf{x}$, 其沿着闭环系统轨迹的时间导数, 可以得出

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} & = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V^T}{\partial \mathbf{x}} \dot{\mathbf{x}} = \frac{dV^T}{dt} (\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{D}\mathbf{w}) \\ & = \frac{dV^T}{dt} [(\mathbf{A} - \mathbf{B}K\mathbf{C})\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{w}]. \end{aligned} \quad (29)$$

(29), (16)式等价于下式:

$$\begin{aligned} & H(\mathbf{x}, P, \mathbf{w}, K) \\ = & \frac{dV}{dt} + \mathbf{x}^T (\mathbf{E}^T \mathbf{E} - \mathbf{E}^T \mathbf{H}K\mathbf{C} - \mathbf{C}^T K^T \mathbf{H}^T \mathbf{E} \\ & + \mathbf{C}^T K^T \mathbf{H}^T \mathbf{H}K\mathbf{C}) \mathbf{x} - \gamma^2 \mathbf{w}^T \mathbf{w}. \end{aligned} \quad (30)$$

由(28)和(30)式得出

$$\begin{aligned} & \mathbf{x}^T [(K_*\mathbf{C} - K\mathbf{C})^T R (K_*\mathbf{C} - K\mathbf{C})] \mathbf{x} \\ & - \gamma^2 \|\mathbf{w} - \mathbf{w}_*\|^2 \\ = & \frac{dV}{dt} + \mathbf{x}^T (\mathbf{E}^T \mathbf{E} - \mathbf{E}^T \mathbf{H}K\mathbf{C} - \mathbf{C}^T K^T \mathbf{H}^T \mathbf{E} \\ & + \mathbf{C}^T K^T \mathbf{H}^T \mathbf{H}K\mathbf{C}) \mathbf{x} - \gamma^2 \mathbf{w}^T \mathbf{w}. \end{aligned} \quad (31)$$

令 $K = K_*$, (31)式可以变为

$$\begin{aligned} & -\gamma^2 \|\mathbf{w} - \mathbf{w}_*\|^2 \\ = & \frac{dV}{dt} + \mathbf{x}^T (\mathbf{E}^T \mathbf{E} - \mathbf{E}^T \mathbf{H}K\mathbf{C} - \mathbf{C}^T K^T \mathbf{H}^T \mathbf{E} \\ & + \mathbf{C}^T K^T \mathbf{H}^T \mathbf{H}K\mathbf{C}) \mathbf{x} - \gamma^2 \mathbf{w}^T \mathbf{w} \leq 0. \end{aligned} \quad (32)$$

(32)式在 $[0, T]$ 区间内积分, 可以得出

$$\begin{aligned} & V[\mathbf{x}(T)] - V[\mathbf{x}(0)] \\ & + \int_0^T \left[\mathbf{x}^T (\mathbf{E}^T \mathbf{E} - \mathbf{E}^T \mathbf{H}K\mathbf{C} - \mathbf{C}^T K^T \mathbf{H}^T \mathbf{E} \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -C^T K^T H^T E + C^T K^T H^T H K C)x \\
 & -\gamma^2 w^T w] dt \leq 0. \tag{33}
 \end{aligned}$$

这里取 $x(0) = 0$, (33) 式表示为

$$\begin{aligned}
 & \int_0^T \left[x^T (E^T E - E^T H K C - C^T K^T H^T E \right. \\
 & \left. + C^T K^T H^T H K C)x \right] dt \leq \int_0^T \gamma^2 w^T w dt.
 \end{aligned}$$

则对于 $T > 0$, 表明系统 (10)—(12) 存在 L_2 增益的值小于或者等于 γ , 由 Lyapunov 稳定性理论可知闭环系统是稳定的.

必要性. 考虑以下 Riccati 方程

$$\begin{aligned}
 & P A_c + A_c^T P + \frac{1}{\gamma^2} P D D^T P + E^T E \\
 & - C^T K^T R K C = 0. \tag{34}
 \end{aligned}$$

由文献 [16] 中的引理 12.1 闭环稳定和 L_2 增益界限可知, (16) 式有惟一的对称解 $P \geq 0$, (34) 式可以转化为

$$\begin{aligned}
 & P(A - BR^{-1}H^T E) + (A - BR^{-1}H^T E)^T P \\
 & + E^T E - E^T H R^{-1} H^T E + \frac{1}{\gamma^2} P D D^T P \\
 & - P B R^{-1} B^T P. \tag{35}
 \end{aligned}$$

将 (19) 式定义的 PMSG 混沌控制系统输出反馈控制律增益代入到 (26) 式得出 (27) 式, 证毕.

以上分析, 将定理 1 求解出的正定矩阵 P 代入到 (19) 式中, 从而得出 K_* 是 PMSG 混沌控制系统输出反馈控制律的最优反馈增益. 本文提出的方法最大程度地避免了 Hamilton-Jacobi-Bellman 方程的缺点并且降低了计算复杂度.

3.3 PMSG 混沌控制系统的最优输出反馈增益 K 值求解步骤

本文提出一种迭代算法, 逐步计算 Riccati 方程得出增益. 在以下算法中, 下标 i 代表迭代的次数, ε 代表可以允许的误差.

步骤 1 初始化: 求解 Riccati 方程得出输出反馈控制增益作为初始增益. 令 $i = 0$, $L_0 = 0$ 并且选择 γ , 以及加权矩阵 E 和 H .

步骤 2 第 i 次迭代.

在下列 Riccati 方程中求解 P_i

$$\begin{aligned}
 & P_i A + A^T P_i + \frac{1}{\gamma^2} P_i D D^T P_i - P_i B R^{-1} B^T P_i \\
 & + E^T E - L_i^T R^{-1} L_i - L_i^T R^{-1} B^T P_i \\
 & - P_i B R^{-1} L_i = 0, \tag{36}
 \end{aligned}$$

其中 $L_i = H^T E$.

重新计算输出反馈增益 K 和更新 L 值

$$K_{i+1} = R^{-1}(B^T P + L_i)C^T (CC^T)^{-1}, \tag{37}$$

$$L_{i+1} = R K_{i+1} C - B^T P_i. \tag{38}$$

因为 P_i 为对称矩阵且是负定的, 如果 $\|K_{n+1} - K_n\| \leq \varepsilon$, ε 为较小的正实数, 进行到步骤 3, 否则使 $i < i + 1$ 并且返回到步骤 2.

步骤 3 令 $K = K_i + 1$, 重复以上步骤, 最优输出反馈增益 K 得以求解, 从而得出 PMSG 混沌控制系统的控制律.

4 系统仿真研究

本文的控制策略通过选取以下物理参数对 PMSG 混沌控制系统进行仿真研究: 发电机转动惯量 $J = 4.7 \times 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 风力机转子半径 $r = 12 \text{ m}$, $L = 14.25 \text{ mH}$, $R = 0.9 \text{ }\Omega$, $p = 7$, $\psi_f = 0.03 \text{ Nm/A}$, 额定功率 $P_n = 1.1 \text{ kW}$; 所用风力发电机参数为: 风轮扫过面积 $S = 4 \text{ m}^2$, 风轮最大风能利用系数 $C_{p\text{max}} = 0.3$, 叶尖速比 $\lambda = 0.9$.

这里使用 3.3 节中的算法在 MATLAB 鲁棒控制工具箱中快速选择最优输出反馈增益 K ,

$$K = \begin{bmatrix} -0.7577 & -0.2856 \\ -0.8629 & -0.3459 \end{bmatrix}. \tag{39}$$

对于每次选择的 γ 值, 均判定该值是否满足定理 1 的条件, 通过多次仿真得到接近最小化的 $\gamma = 0.253$.

定义控制输出向量满足 $D^T D = I$ 和 $D^T C = 0$,

$$Z(t) = \alpha \begin{bmatrix} \Gamma \\ 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} u(t), \tag{40}$$

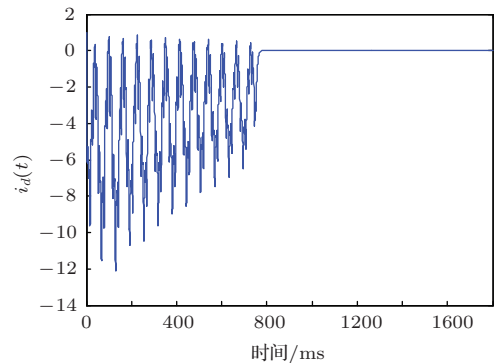


图 3 d 轴电流状态响应曲线

其中, $Z(t)$ 记为位移响应; Γ 是单位元素为 0 或者 1 的恒定矩阵; 控制加权系数 α 决定了系统响应和磁力控制的相对重要性, α 的值越大, 系统响应的变化越明显, $\alpha = 0$ 代表不可控的情形.

采用本文算法对风电系统的桨距角 β 进行控制. 从仿真结果可以观察到, 此时图 3 的 d 轴电流以及图 4 的转速显示系统在控制器 (10) 的作用下, 在前 800 ms, 由于 PMSG 系统未受控制, 因此其响应具有混沌现象; 而在 800 ms 后, 控制器 (10) 起作用, PMSG 系统状态很快受到控制.

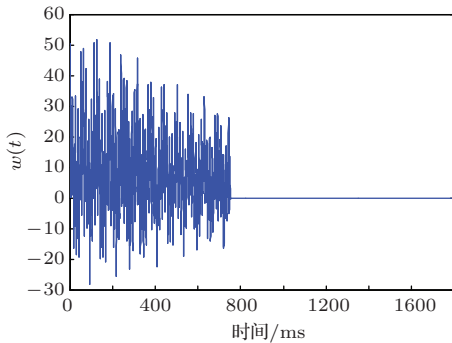


图 4 转速状态响应曲线

5 结 论

本文在分析 PMSG 数学模型的基础上, 针对 PMSG 的两相同步旋转模型建立了系统的混沌模型, 并验证了系统在某些参数和一定运行条件下会出现混沌现象. 随后考虑系统干扰的情况下设计了基于 Riccati 方程的最优输出反馈 H_∞ 控制, 能够对混沌状态下系统的干扰进行快速准确的响应. 从算法的稳定性分析得出, 合理选择控制参数 K 值和 γ 值, 就能使得从任意初始条件出发均能保证系统稳定, 并仿真验证了该方法良好的鲁棒性.

参考文献

- [1] Wang X Y, Song P, Tian L 2006 *Proc. CSEE* **26** 142 (in Chinese) [王晓远, 宋鹏, 田亮 2006 中国电机工程学报 **26** 142]
- [2] Wang X Y, Tang R Y, Du J J 2007 *Trans. China Electrotech. Soc.* **22** 5 (in Chinese) [王晓远, 唐任远, 杜静娟 2007 电工技术学报 **22** 5]
- [3] Ren H P, Liu D, Li J 2003 *Proc. CSEE* **23** 175 (in Chinese) [任海鹏, 刘丁, 李洁 2003 中国电机工程学报 **23** 175]
- [4] Huang Q, Li T W, Yang S Q 2012 *Control Theory Appl.* **12** 1603 (in Chinese) [黄谦, 李天伟, 杨绍清 2012 控制理论与应用 **12** 1603]
- [5] Gholizadeh H, Hassannia A, Azarfar A 2013 *Chin. Phys. B* **22** 010503
- [6] Qin Y H, Luo X S, Wei D Q 2010 *Chin. Phys. B* **19** 050511
- [7] Zhang B, Li Z, Mao Z Y, Pang M X 2001 *Proc. CSEE* **21** 13 (in Chinese) [张波, 李忠, 毛宗源, 庞敏熙 2001 中国电机工程学报 **21** 13]
- [8] Wu Z Q, Yang Y, Xu C H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 150507 (in Chinese) [吴忠强, 杨阳, 徐纯华 2013 物理学报 **62** 150507]
- [9] Wei D Q, Luo X S, Fang J Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 54 (in Chinese) [韦笃取, 罗晓曙, 方锦清 2006 物理学报 **55** 54]
- [10] Ren L N, Liu F C, Jiao X H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 060506 (in Chinese) [任丽娜, 刘福才, 焦晓红 2012 物理学报 **61** 060506]
- [11] Ji Z C, Chang J 2009 *Chin. J. Sci. Instrum.* **30** 2139 (in Chinese) [纪志成, 常军 2009 仪器仪表学报 **30** 2139]
- [12] Lewis F L, Syrmos V L 2012 *Optimal Control* (3rd Ed.) (New York: Wiley-Interscience) p31
- [13] Yu J T 2004 *IEEE Trans. Automat. Control* **49** 2275
- [14] Cao Y, Sun Y, Mao W 1998 *IEEE Trans. Automat. Control* **43** 1111
- [15] Gadewadikar J, Bhilegaonkar A, Lewis F L 2007 *IEEE Trans. Automat. Control* **93** 2599
- [16] Baúar T, Bernard P 1995 *H_∞ Optimal Control and Related Minimax Design Problems* (2nd Ed.) (Boston: Birkhäuser) p34

Analysis of chaos in permanent magnet synchronous generator and optimal output feedback H_∞ control*

Yang Yi-Fei^{1)2)†} Luo Min-Zhou²⁾ Xing Shao-Bang¹⁾ Han Xiao-Xin¹⁾ Zhu Huang-Qiu³⁾

1) (School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

2) (Institute of Advanced Manufacturing Technology, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Changzhou 213164, China)

3) (School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

(Received 17 July 2014; revised manuscript received 23 September 2014)

Abstract

The permanent magnet synchronous generator (PMSG) is investigated and its mathematical model is established in two-phase synchronous rotating coordinates. Aiming at the fact that PMSG may present chaotic behaviors at certain values of parameters and under certain working conditions, the output feedback control gain matrix with the minimum performance index is obtained by solving the Riccati equation and fed back to the system in order to improve the system performance with considering the disturbance. Results show that the optimal output feedback H_∞ control based on Riccati equation can respond to PMSG very quickly and accurately in the chaotic state when disturbance occurs.

Keywords: permanent magnet synchronous generator, chaos control, disturbance attenuation, output feedback

PACS: 05.45.Gg, 05.45.Ac

DOI: 10.7498/aps.64.040504

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60974053), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK2012707), the Natural Science Foundation of Higher Education Institutions of Jiangsu Province, China (Grant No. 12KJJB470004), the Science and Technology Support Program of Changzhou City, China (Grant No. CE20120100), the Innovative Team of Jiangsu University of Technology, China (Grant No. 20510311303), and the Special Funds of the Professor and Doctor of Jiangsu University of Technology, China (Grant No. KYY13001).

† Corresponding author. E-mail: brucehoyang@gmail.com