doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.049

车用永磁同步电机稳定性分析

韩清振 何 仁(江苏大学汽车与交通工程学院,镇江 212013)

摘要:采用多参数统一方法,将永磁同步电机数学模型中多个参数变化的特性综合到两个参数的变化上,给出了平衡点的稳定性判别条件,推导了平衡点产生 Hopf 分岔及叉形分岔的条件。仿真分析了永磁同步电机的平衡点随 这两个参数变化的规律,得到了平衡点的叉形分岔点以及亚临界 Hopf 分岔点。分析得到了永磁同步电机中的不同动力学现象,解释了不同动力学现象产生的机理。

关键词: 永磁同步电机; 稳定性; 分岔; 分析

中图分类号: U463.23 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)11-0363-06

Stability Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor in Vehicle

Han Qingzhen He Ren

(School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Since the permanent magnet synchronous motor (PMSM) has a large number of parameters and the direct analysis of parameters' impact on PMSM's dynamic behaviors is inconvenient, multi-parameter unified approach was proposed and all the PMSM's dynamic behaviors can be discovered through in-depth analysis of the unified parameters. PMSM equilibrium local stability condition as well as Hopf bifurcation condition and pitchfork bifurcation condition were derived through the Routh - Hurwitz criterion and the bifurcation theory respectively. Pitchfork bifurcation line together with subcritical Hopf bifurcation line divided the equilibrium parameter plane into three regions, where the equilibrium had different characteristics in different regions. Simulation showed the equilibrium bifurcation characteristics along with single parameter variation, and one pitchfork bifurcation point and two subcritical Hopf bifurcation points were found in the equilibrium bifurcation curve. The PMSM dynamic behaviors along with parameters variation were studied by phase portraits, time history map and Poincaré bifurcation diagram, and presented different mechanisms. If there was only one stable equilibrium in the parameters regions, the PMSM can work stably. If there were two stable equilibriums in the parameters regions, the initial conditions would affect PMSM operation. If there was no stable equilibrium in the parameters regions, the PMSM cannot work stably. The research of this paper can provide some references for PMSM design. Key words: permanent magnet synchronous motor; stability; bifurcation; analysis

引言

在各种车用驱动电机中,永磁同步电机 (PMSM)是重要的发展方向之一。PMSM 既具有交 流电动机运行可靠的优点又具有直流电动机调速性 能好的优点,且无需励磁绕组,具有体积小、效率高、 高转矩密度及高功率密度等优点^[1],非常适用于车 辆驱动领域^[2]。PMSM 是多变量强耦合的非线性系

收稿日期: 2016-05-08 修回日期: 2016-05-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51275212)、江苏省高校自然科学研究重大项目(13KJA580001)和2016年度江苏省普通高校研究生科 研创新计划项目(KYZZ16_0332)

作者简介:韩清振(1989--),男,博士生,主要从事车辆综合节能与新能源汽车技术研究,E-mail: tsingen2009@163.com

通信作者:何仁(1962一),男,教授,博士生导师,主要从事汽车机电一体化技术研究,E-mail: heren1962@163.com

统^[3-5].将其应用于电动汽车中时,由于受到温度、 噪声等因素影响,PMSM 的参数并不是固定不变的, 各项参数会在某个区间内变化,这就可能造成转速 或转矩的剧烈振荡、控制性能不稳定以及不规则的 电磁噪声等有害现象,影响 PMSM 在汽车中的正常 使用,因此在设计 PMSM 时需要研究参数波动对电 机稳定性的影响。在分析参数波动对电机的稳定性 影响时采用的动态分析方法有时域仿真法、小信号 分析法和非线性理论相关分析法等,如文献[6]应 用时域分析方法分析了 PMSM 调速系统的动、静态 性能。文献[7-8]建立了 PMSM 系统的小信号模 型,通过线性理论中状态转移矩阵特征根判别法分 析了参数对电机局部稳定性的影响。文献[9-11] 应用非线性动力学相关理论研究了 PMSM 的不稳 定动力学行为及其控制问题等。通过非线性理论判 断参数变化对 PMSM 稳定性影响的文献相对较少, 本文将应用非线性动力学相关理论分析 PMSM 模 型在不同参数下的动力学行为。

本文采用多参数统一方法^[12],将 PMSM 模型中 多个参数变化的特性综合到两个参数的变化上,推 导 PMSM 平衡点的稳定性条件以及分岔条件,应用 Matlab 软件仿真分析平衡点的分岔行为,通过单参 数分岔图分析平衡点随单个参数变化的规律。通过 数值仿真分析永磁同步电机在不同参数下的动力学 行为,并通过分析对应参数下平衡点的数目、平衡点 的稳定性、初始条件以及 Poincaré 截面图揭示 PMSM 产生相应动力学行为的机理。通过分析参数 对 PMSM 稳定性的影响,为 PMSM 的设计提供参 考。

1 永磁同步电机数学模型

目前所研究的 PMSM 数学模型为三维自治系统^[11]

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}i_{d}}{\mathrm{d}t} = \left(u_{d} - R_{1}i_{d} + \omega L_{q}i_{q}\right)/L_{d} \\ \frac{\mathrm{d}i_{q}}{\mathrm{d}t} = \left(u_{q} - R_{1}i_{q} - \omega L_{d}i_{d} + \omega\psi_{f}\right)/L_{q} \\ \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = \left[n_{p}\psi_{f}i_{q} + n_{p}\left(L_{d} - L_{q}\right)i_{d}i_{q} - T_{L} - \beta\omega\right]/J \end{cases}$$

$$(1)$$

式中
$$i_d$$
 — d 轴定子电流
 i_q — q 轴定子电流
 ω — 转子机械角速度
 u_d — d 轴电压 u_q — q 轴电压
 T_L — η 新转矩 L_d — d 轴电感
 L_q — q 轴电感 ψ_l — λ 久磁通

 R_1 ——定子电阻 β ——粘性阻尼系数 J——转动惯量

n_n——极对数

直接对 PMSM 动态模型进行分析相对复杂,一般通过仿射变换及时间尺度变换等将 PMSM 系统转换为无量纲模型^[11]

$$\begin{split} \left\{ \begin{aligned} \frac{\mathrm{d}\,\tilde{i}_{d}}{\mathrm{d}\,\tilde{t}} &= -\frac{L_{q}}{L_{d}}\tilde{i}_{d} + \widetilde{\omega}\tilde{i}_{q} + \widetilde{u}_{d} \\ \\ \frac{\mathrm{d}\,\tilde{i}}{\mathrm{d}\,\tilde{t}} &= -\tilde{i}_{q} - \widetilde{\omega}\tilde{i}_{d} + \gamma\,\widetilde{\omega} + \widetilde{u}_{q} \end{aligned} \tag{2} \right\} \\ \left\{ \begin{aligned} \frac{\mathrm{d}\,\tilde{i}_{q}}{\mathrm{d}\,\tilde{t}} &= -\tilde{i}_{q} - \widetilde{\omega}\tilde{i}_{d} + \gamma\,\widetilde{\omega} + \widetilde{u}_{q} \\ \\ \frac{\mathrm{d}\,\widetilde{\omega}}{\mathrm{d}\,\tilde{t}} &= -\tilde{i}_{q} - \widetilde{\omega}\tilde{i}_{d} + \gamma\,\widetilde{\omega} + \widetilde{u}_{q} \end{aligned} \end{aligned} \\ \left\{ \begin{aligned} \frac{\mathrm{d}\,\widetilde{\omega}}{\mathrm{d}\,\tilde{t}} &= -\tilde{i}_{q} - \widetilde{\omega}\tilde{i}_{d} + \gamma\,\widetilde{\omega} + \widetilde{u}_{q} \\ \\ \frac{\mathrm{d}\,\widetilde{\omega}}{\mathrm{d}\,\tilde{t}} &= \sigma\,(\tilde{i}_{q} - \widetilde{\omega}) + \varepsilon\,\tilde{i}_{d}\tilde{i}_{q} - \widetilde{T}_{L} \end{aligned} \end{aligned} \\ \left\{ \begin{aligned} \frac{\mathrm{d}\,\widetilde{\omega}}{\mathrm{d}\,\tilde{t}} &= \sigma\,(\tilde{i}_{q} - \widetilde{\omega}) + \varepsilon\,\tilde{i}_{d}\tilde{i}_{q} - \widetilde{T}_{L} \\ \\ \frac{\mathrm{d}\,\widetilde{\omega}}{\mathrm{d}\,\tilde{t}} &= \sigma\,(\tilde{i}_{q} - \widetilde{\omega}) + \varepsilon\,\tilde{i}_{d}\tilde{i}_{q} - \widetilde{T}_{L} \end{aligned} \\ \left\{ \end{aligned} \right\} \\ \left\{ \begin{aligned} \\ \frac{\mathrm{d}\,\widetilde{\omega}}{\mathrm{d}\,\tilde{t}} &= \sigma\,(\tilde{i}_{q} - \widetilde{\omega}) + \varepsilon\,\tilde{i}_{d}\tilde{i}_{q} - \widetilde{T}_{L} \\ \\ \frac{\mathrm{d}\,\widetilde{\omega}}{\mathrm{d}\,\tilde{t}} &= \sigma\,(\tilde{i}_{q} - \widetilde{\omega}) + \varepsilon\,\tilde{i}_{d}\tilde{i}_{q} - \widetilde{T}_{L} \end{aligned} \\ \left\{ \end{aligned} \\ \left\{ \end{aligned} \right\} \\ \left\{ \end{aligned} \\ \left\{ \end{aligned} \right\} \\ \left\{ \end{aligned} \\ \left\{ \end{aligned} \right\} \\ \left\{ \cr \end{aligned} \\ \left\{ \varkappa \right\} \\ \left\{ \end{aligned} \\ \left\{ \varkappa \right\} \right\} \\ \left\{ \varkappa \right\} \\ \left\{ \varkappa$$

对于均匀气隙的 PMSM, 有 $L_d = L_q$ 。为研究 PMSM 本体的固有特性, 令其输入 $\tilde{u}_d = 0$, $\tilde{u}_q = 0$, $\tilde{T}_L = 0$,则式(2)变为

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}\,\tilde{i}_{d}}{\mathrm{d}\,\tilde{t}} = -\,\tilde{i}_{d} + \widetilde{\omega}\tilde{i}_{q} \\ \\ \frac{\mathrm{d}\,\tilde{i}_{q}}{\mathrm{d}\,\tilde{t}} = -\,\tilde{i}_{q} - \widetilde{\omega}\tilde{i}_{d} + \gamma\,\widetilde{\omega} \\ \\ \frac{\mathrm{d}\,\tilde{\omega}}{\mathrm{d}\,\tilde{t}} = \sigma(\,\tilde{i}_{q} - \widetilde{\omega}) \end{cases}$$
(3)

式(3)中仅有 γ 、 σ 两个参数,但每一个参数都 代表了实际 PMSM 中的多个参数,在对式(3)分析 时可以将式中的两个参数作为互不影响的独立参数 分析,得出稳定区域。将实际 PMSM 的参数无量纲 化后代入,即可判断实际 PMSM 模型中单个或多个 参数同时变化时 PMSM 能否稳定运行。例如,若判 断 L_q 对电机性能的影响,得到 $L_q = \frac{R_1 J}{\beta} \sigma$,在其它参 数不变情况下,通过研究 σ 对电机的影响即可得到 L_q 对电机性能的影响。

2 平衡点稳定性及分岔行为分析

2.1 平衡点稳定性分析

当 PMSM 在稳态情况时,式(3)的平衡点(\tilde{i}_{d_0} ,

 $\tilde{i}_{q_0}, \tilde{\omega}_0$)存在关系

 $\begin{cases} -\tilde{i}_{d_0} + \tilde{\omega}_0 \tilde{i}_{q_0} = 0 \\ -\tilde{i}_{q_0} - \tilde{\omega}_0 \tilde{i}_{d_0} + \gamma \tilde{\omega}_0 = 0 \Rightarrow \begin{cases} \tilde{i}_{d_0} = \tilde{\omega}_0^2 \\ \tilde{i}_{q_0} = \tilde{\omega}_0 \\ \tilde{\omega}_0 (\tilde{\omega}_0^2 - \gamma + 1) = 0 \end{cases}$ $\overrightarrow{P} \Pi : \stackrel{.}{\exists} \gamma > 1 \ \overrightarrow{P}, \overrightarrow{I}, (3) \ \overrightarrow{P} \ \overrightarrow{E} \ 3 \ \uparrow = \mathfrak{M} \ \overrightarrow{L}, \ \overrightarrow{D} \ \overrightarrow{H} \ \mathcal{H}$ $(0, 0, 0), (\gamma - 1, \sqrt{\gamma - 1}, \sqrt{\gamma - 1}), (\gamma - 1, -\sqrt{\gamma - 1}); \ \overrightarrow{H} \ \gamma \leq 1 \ \overrightarrow{P}, \ \overrightarrow{I}, \ \overrightarrow{I},$

平衡点处的局部稳定性可以通过动力系统特征 方程的特征值来描述,当特征值全为负或出现复根 时,复根的实部为负,则平衡点是稳定的。系统的特 征方程可以表示为 det($\lambda I - J$) = 0,其中 λ 为特征 值, I 为单位矩阵, J 为平衡点处的 Jacobian 矩 阵^[13]。对于维数较高的系统,直接计算特征方程的 特征根以判断系统的平衡点的稳定性相对复杂,一 般采用 Routh – Hurwitz 准则进行判断。

式(3)平衡点的 Jacobian 矩阵为

$$\boldsymbol{J} = \begin{bmatrix} -1 & \widetilde{\omega}_0 & \widetilde{i}_{q_0} \\ -\widetilde{\omega}_0 & -1 & -\widetilde{i}_{d_0} + \gamma \\ 0 & \sigma & -\sigma \end{bmatrix}$$

为了便于计算,根据 \tilde{i}_{d_0} 、 \tilde{i}_{q_0} 、 $\tilde{\omega}_0$ 的关系,将式(3)的平衡点表示为($\tilde{\omega}_0^2$, $\tilde{\omega}_0$, $\tilde{\omega}_0$)并代入特征方程 det($\lambda I - J$) = 0得

$$\lambda^{3} + (\sigma + 2)\lambda^{2} + (1 + \sigma \widetilde{\omega}_{0}^{2} - \sigma \gamma + \widetilde{\omega}_{0}^{2} + 2\sigma)\lambda + 3\sigma \widetilde{\omega}_{0}^{2} - \sigma \gamma + \sigma = 0$$
(4)

根据 Routh – Hurwitz 准则,平衡点局部稳定的条件为

$$\begin{cases} \sigma > -2 \\ 3\sigma \,\widehat{\omega}_0^2 - \gamma\sigma + \sigma > 0 \\ (\sigma + 2) \left(1 + \sigma \,\widehat{\omega}_0^2 - \sigma\gamma + \widehat{\omega}_0^2 + 2\sigma\right) - \\ (3 \,\widehat{\omega}_0^2 + \gamma - 1) \sigma > 0 \end{cases}$$
(5)

2.2 平衡点的分岔分析

平衡点失稳将会导致不同形式的分岔,故推导 平衡点产生 Hopf 分岔的条件,Hopf 分岔是平衡点 失稳常见的动态分岔现象。系统产生 Hopf 分岔的 条件为^[13-15]

$$\begin{cases} \operatorname{Re}(\lambda) \mid_{c=c_{0}} = 0\\ \operatorname{Im}(\lambda) \mid_{c=c_{0}} \neq 0\\ \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}c} \operatorname{Re}(\lambda) \mid_{c=c_{0}} \neq 0 \end{cases}$$
(6)

其中, c_0 是系统发生 Hopf 分岔时 c 的关键值。

若式(4)中存在一个纯虚数的非零特征根 λ =

*nj*且*n*≠0,可得

$$-n^{3}j - (\sigma + 2)n^{2} + (1 + \sigma \widetilde{\omega}_{0}^{2} - \sigma \gamma + \widetilde{\omega}_{0}^{2} + 2\sigma)nj + 3\sigma \widetilde{\omega}_{0}^{2} - \sigma \gamma + \sigma = 0$$
将实部和虚部分离得

$$n^{2} = 1 + \sigma \widetilde{\omega}_{0}^{2} - \sigma \gamma + \widetilde{\omega}_{0}^{2} + 2\sigma$$

$$n^{2} = (3\sigma \widetilde{\omega}_{0}^{2} - \sigma\gamma + \sigma) / (\sigma + 2)$$

可得平衡点发生 Hopf 分岔的必要条件为

$$\begin{cases} \sigma + 2 > 0 \\ 1 + \sigma \,\widetilde{\omega}_0^2 - \sigma \gamma + \widetilde{\omega}_0^2 + 2\sigma > 0 \\ (-\sigma^2 - 2) \,\omega_0^2 + (\gamma - 2) \,\sigma^2 + (\gamma - 4) \,\sigma - 2 = 0 \end{cases}$$

另外,当 $\gamma > 1$ 时,式(3)存在3个平衡点,特征 根有1个为正,当 $\gamma < 1$ 时,式(3)仅存在1个平衡 点,且3个特征根都满足 Re(λ) < 0,可以判断 式(3)在 $\gamma = 1$ 处发生了叉形分岔(pitchfork bifurcation)。

2.3 平衡点的分岔图

通过 Matlab 软件数值模拟平衡点随参数变化的双参数分岔图和单参数分岔图。

参数(γ,σ)平面的分岔图如图 1 所示,图中 subH 曲线表示亚临界 Hopf 分岔曲线,BP 表示叉形 分岔曲线,subH 曲线和 BP 分岔线将参数平面分为 3 个区域,通过分析知区域 A 内存在 1 个稳定的平 衡点。当这个稳定的平衡点穿越 BP 曲线进入区域 B 后失稳,并且产生 2 个新的稳定平衡点,故参数区 域 B 内存在 2 个稳定平衡点和 1 个不稳定平衡点, 当参数区域 B 内的平衡点穿越 subH 曲线进入区域 C 时,2 个稳定的平衡点失稳,故参数区域 C 内存在 3 个不稳定平衡点。



令参数 σ = 10 并将参数 γ 作为分岔参数,可得 式(3)的平衡点曲线如图 2 所示,图中实线代表稳 定的平衡点,虚线代表不稳定的平衡点,BP 代表叉 形分岔点,分岔参数为 γ = 1,subH1、subH2 表示亚 临界 Hopf 分岔点(分岔参数为 γ = 17.5),LPC1、 LPC2 分别表示亚临界 Hopf 分岔点 subH1 和 subH2 分岔所产生的不稳定极限环。可见随着参数 γ 的增 加,稳定的平衡点 E_1 在 BP 处由于发生叉形分岔失





稳变为不稳定平衡点 E'_1 ,并产生 2 个新的稳定平衡 点 $E_2 \ E_3$,在 subH1、subH2 处稳定平衡点 $E_2 \ E_3$ 由于发生亚临界 Hopf 分岔而失稳。

3 PMSM 动力学行为仿真

当平衡点的稳定性及个数发生改变时, PMSM 会展现出不同的动力学行为, 根据式(3), 通过数值 仿真分析参数 γ 变化时, PMSM 的不同动力学行为。

令参数 $\sigma = 10$, $\gamma = 0.5$,该组参数在图 1 中的区 域 A 内,可知 PMSM 此时仅具有 1 个稳定的平衡点 (0,0,0),将初始值设为 $i_a = 20$ A, $i_q = 1$ A, $\omega =$ 1 rad/s。通过仿真得到的相图以及时间历程图如 图 3 所示,由于此时仅存在 1 个稳定的平衡点,随着 时间的推移,PMSM 运行轨迹最终将稳定在平衡点 (0,0,0),可见在这组参数下 PMSM 可以稳定运行。



 $\sigma = 10$ and $\gamma = 0.5$

令参数 $\sigma = 10, \gamma = 10$,该组参数在图 1 区域 B 内,式(3)此时存在 2 个稳定的平衡点 $E_2(9,3,3)$ 、 $E_3(9, -3, -3)$ 以及 1 个不稳定平衡点 $E'_1(0,0,0)$, 图 4 中标出了 2 个稳定的平衡点 $E_2 \ E_3$ 以及不稳定 平衡点 E'_1 。通过仿真分析可知,将初始值选为 $\tilde{i}_d =$ 20 A, $\tilde{i}_q = 3$ A, $\tilde{\omega} = 3$ rad/s 时,PMSM 轨迹稳定于平衡 点 E_3 ,将初始值选为 $\tilde{i}_d = 20$ A, $\tilde{i}_q = -3$ A, $\tilde{\omega} = 3$ rad/s 时,PMSM 轨迹将稳定平衡点 E_2 ,可知在这组参数 下,PMSM 是可以稳定运行的,但最终沿平衡点 E_2 还是 E_3 运动与初始值有关。



将参数选为 $\sigma = 10$, $\gamma = 16$ 时, 该组参数在图 1 区域 B内, 此时式(3)仍然具有 2 个稳定的平衡点 和 1 个不稳定的平衡点。将初始值取为 $\tilde{i}_d = 20$ A, $\tilde{i}_q = 3.87$ A, $\tilde{\omega} = 3.87$ rad/s 时, PMSM 会出现混沌行 为, 如图 5a 所示。图 5b 为相应的时间历程, 可见此 时 PMSM 的轨迹受混沌吸引子的吸引进入混沌状 态而失稳。在不改变参数的条件下, 当初始值取 $\tilde{i}_d = 15$ A, $\tilde{i}_q = 3.87$ A, $\tilde{\omega} = 3.87$ rad/s 时, 对应的相图 如图 5c, 时间历程图如图 5d 所示, 可见 PMSM 的轨 迹将会受平衡点 E_2 吸引, 最终稳定于平衡点 E_2 。同 样通过适当选择初始条件 PMSM 可以稳定于平衡 点 E_3 。可见在这组参数下平衡点存在局部稳定的 区域, 同时出现了混沌吸引子, 永磁同步电机会出现 不稳定运行的情况。



将参数选为 $\sigma = 10, \gamma = 20$ 时,该组参数在图 1 区域 C 内,此时式(3)的 3 个平衡点都为不稳定平 衡点,选择初始值为 $\tilde{i}_{d} = 15$ A, $\tilde{i}_{q} = 3$ A, $\tilde{\omega} = 3$ rad/s, 通过此时的相图与时间历程图(图 6)可知, PMSM 由于受混沌吸引子影响而失稳。

通过以上仿真分析可以看出,随着参数 γ 的改 变,PMSM 的平衡点将发生超临界叉形分岔^[16]、亚 临界 Hopf 分岔等现象,导致平衡点的个数及稳定性





发生改变,进而影响了 PMSM 的动力学行为。在 图 1 中,当参数选择在区域 A 内时,PMSM 可以稳定 运行,选择在 B 区域时运行情况受初始条件影响, 选择在区域 C 内时,PMSM 将出现混沌等不稳定现 象。

为研究参数 $\sigma = 10$ 固定不变,参数 γ 在 0 ~ 20 内变化时的 PMSM 的全局动力学现象,将初始值取 $\tilde{i}_{d} = 10$ A, $\tilde{i}_{q} = 0.1$ A, $\tilde{\omega} = 0.1$ rad/s,并以 $\tilde{i}_{d} = 0$ A 为 截面得到 PMSM 的转速随参数 γ 变化的 Poincaré 分 岔图如图 7 所示。由图 7 可知,在 0 < γ < 1 的参数 区域内,PMSM 最终稳定于平衡点 E_1 ,在 1 < γ < 2.1 的区域,PMSM 最终稳定于平衡点 E_2 ,在 5.4 < γ < 15 的区域,PMSM 最终稳定于平衡点 E_2 ,在 5.4 < γ < 15 的区域,PMSM 最终稳定于平衡点 E_3 ,在 15 < γ < 17.5 的区域内,PMSM 平衡点局部是稳定的(见 图 2),但存在混沌吸引子,即若参数选择在此区域 PMSM 容易失稳。当 γ > 17.5 时,此时 PMSM 没有 稳定平衡点,不能稳定运行。可见相同的初始条件



下,PMSM 的运行状态会随着参数的改变发生改变, 且存在不稳定区域。

4 结论

(1)通过多参数统一法将 PMSM 数学模型中多 参数变化的特性综合到两个参数的变化上,应用分 岔理论等研究了 PMSM 的动力学行为随这两个参 数的变化规律。因为这两个参数包含实际 PMSM 模型中的所有参数,故可以通过分析这两个参数探 讨实际 PMSM 模型中单个参数或多个参数同时变 化时的动力学特征。

(2)当 PMSM 模型的参数选择在有且仅有1个 稳定平衡点区域时,PMSM 可以稳定运行;当参数选 择在有2个稳定平衡点区域时,PMSM 的最终运行 状态受初始值的影响,且如果此时存在混沌吸引子, PMSM 可能会失稳;当参数选择在无稳定平衡点的 区域时,PMSM 不能稳定运行。

(3)为确保 PMSM 的稳定运行,在 PMSM 设计时,参数应选择在有且仅有1个稳定平衡点的区域。

- 参考文献
- 卢东斌,欧阳明高,谷靖,等. 电动汽车永磁同步电机最优制动能量回馈控制[J]. 中国机电工程学报, 2013, 33(3): 83-91.

LU Dongbin, OUYANG Minggao, Gu Jing, et al. Optimal regenerative braking control for permanent magnet synchronous in electric vehicles [J]. Proceeding of the CSEE, 2013, 33(3):83-91. (in Chinese)

- 2 吴志红,王双全,朱元. 车用永磁同步电机位置传感器容错系统低速性能研究[J]. 农业机械学报,2013,44(8):13-20. WU Zhihong, WANG Shuangquan, ZHU Yuan. Position sensor fault-tolerant system low-speed performance of permanent magnet synchronous motor in vehicle application[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8):13-20. (in Chinese)
- 3 RASOOLZADEH A, TAVAZOEI M S. Prediction of chaos in non-salient permanent-magnet synchronous machines [J]. Physics Letters A, 2012, 377(1-2):73-79.
- 4 VESELY I, POHL L. Identification of PMSM nonlinear part[C] // Programmable Devices and Embedded Systems, 2013,46(28): 56-61.
- 5 WEI Duqu, ZHANG Bo. Controlling chaos in permanent magnet synchronous motor based on finite-time stability theory [J]. Chinese Physics B, 2009, 18(4):1399 1403.
- 6 王莉娜,朱鸿悦,杨宗军. 永磁同步电动机调速系统 PI 控制器参数整定方法[J].电工技术学报,2014,29(5):104-117. WANG Lina, ZHU Hongyue, YANG Zongjun. Tuning method for PI controllers of PMSM driving system[J]. Transactions of China

Electrotechnical Society, 2014,29(5):104 - 117. (in Chinese)

7 李槐树,周羽,曹晴,等.永磁同步电机开环控制系统稳定性的数学推导与分析[J].电工技术学报,2014,29(增刊1): 36-43.

LI Huaishu, ZHOU Yu, CAO Qing, et al. Mathematical deduction and stability analysis of PMSM open-loop control system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014,29(Supp. 1):36-43. (in Chinese)

- 叶志伟. 电动汽车用对转双转子电机的设计与开发[D]. 广州:华南理工大学,2014.
- YE Zhiwei. Design and development of anti-directional-dual-rotor motor for electric vehicles [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese)
- 9 SU Kalin, LI Chunlai. Chaos control of permanent magnet synchronous motors via unidirectional correlation [J]. Optik -International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(14):3693-3696.
- 10 吴忠强,吴昌韩,赵立儒,等. 基于哈密顿函数的永磁同步电机混沌系统鲁棒控制[J]. 物理学报,2015,64(9):221-226.
 WU Zhongqiang, WU Changhan, ZHAO Liru, et al. Robust control for permanent magnet synchronous motors based on Hamiltonian function[J], Acta Physica Sinica, 2015, 64(9):221-226. (in Chinese)
- 11 罗晓署,韦笃取. 复杂电机与电力系统非线性动力学行为与控制研究[M]. 北京:科学出版社,2015:35-36.
- 12 吴志红,武四辈,朱元,等. 车用内置式永磁电动机转矩多参数统一控制方法[J]. 农业机械学报,2012,43(6):30-34.
 WU Zhihong, WU Sibei, ZHU Yuan, et al. Torque control method of multi-parameter integrated for IPMSM in vehicle[J].
 Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6):30-34. (in Chinese)
- 13 邹国棠. 混沌电机驱动及其应用[M]. 北京:科学出版社,2009:59-61.
- 14 BI Qinsheng, ZHANG Zhengdi. Bursting phenomena as well as the birfurcation mechanism in Lorenz with two time scales [J]. Physics Letters A, 2011, 375(8):1183-1190.
- 15 ZHENG Song, HAN Xiujing, BI Qinsheng. Bifurcations and fast-slow behaviors in a hyperchaotic dynamical system [J]. Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation, 2011, 16(4):1998-2005.
- 16 刘秉正. 非线性动力学[M]. 北京:高等教育出版社,2004.

(上接第362页)

- 16 CHOI W, KWON S, DONGSHIN H. Combustion characteristics of hydrogen-air premixed gas in a sub-millimeter scale catalytic combustor[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008,33(9):2400 - 2408.
- 17 YANG W, DENG C, ZHOU J, et al. Mesoscale combustion of ethanol and dimethyl ether over Pt/ZSM 5: Differences in combustion characteristics and catalyst deactivation [J]. Fuel, 2016,165:1-9.
- 18 ZHONG B, YANG F, YANG Q. Catalytic combustion of n-C₄H₁₀ and DME in swiss-roll combustor with porous ceramics [J]. Combustion Science and Technology, 2012,184(5):573 - 584.
- 19 OSHIBE H, NAKAMURA H, TEZUKA T, et al. Stabilized three-stage oxidation of DME/air mixture in a micro flow reactor with a controlled temperature profile[J]. Combustion and Flame, 2010,157(8):1572-1580.
- 20 MIHAI O, FATHALI A, AUVRAY X, et al. DME, propane and CO: The oxidation, steam reforming and WGS over Pt/Al₂O₃. The effect of aging and presence of water[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2014,160 161:480 491.
- 21 FAN A, MARUTA K, NAKAMURA H, et al. Experimental investigation on flame pattern formations of DME-air mixtures in a radial microchannel[J]. Combustion and Flame, 2010,157(9):1637-1642.
- 22 FAN A, MINAEV S, SERESHCHENKO E, et al. Dynamics of splitting flames in a heated channel [J]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 2009, 45(3): 245 250.
- 23 FAN Y, SUZUKI Y, KASAGI N. Experimental study of micro-scale premixed flame in quartz channels [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009,32(2):3083 3090.
- 24 WAN J, FAN A, LIU Y, et al. Experimental investigation and numerical analysis on flame stabilization of CH₄/air mixture in a mesoscale channel with wall cavities [J]. Combustion and Flame, 2015, 162(4):1035 1045.
- 25 LI J, CHOU S K, LI Z W, et al. Experimental investigation of porous media combustion in a planar micro-combustor[J]. Fuel, 2010,89(3):708-715.