

两级式光伏并网逆变器建模与非线性动力学行为研究

廖志贤 罗晓曙 黄国现

Numerical modeling and research on nonlinear dynamic behaviors of two-stage photovoltaic grid-connected inverter

Liao Zhi-Xian Luo Xiao-Shu Huang Guo-Xian

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 130503 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.130503

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.130503>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I13>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于对偶数理论的资料同化新方法

A new data assimilation method based on dual-number theory

物理学报.2015, 64(13): 130502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.130502>

一类可变禁区的不连续系统的加周期分岔

Period-adding bifurcations in a discontinuous system with a variable gap

物理学报.2015, 64(12): 120502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.120502>

Duffing 系统随机相位抑制混沌与随机共振并存现象的机理研究

Mechanism for the coexistence phenomenon of random phase suppressing chaos and stochastic resonance in Duffing system

物理学报.2015, 64(10): 100501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.100501>

太赫兹场和倾斜磁场对超晶格电子动力学特性调控规律研究

Nonlinear electron transport in superlattice driven by a terahertz field and a tilted magnetic field

物理学报.2015, 64(9): 090502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.090502>

一种基于人工蜂群算法的混沌信号盲分离方法

A blind source separation method for chaotic signals based on artificial bee colony algorithm

物理学报.2015, 64(9): 090501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.090501>

两级式光伏并网逆变器建模与非线性动力学行为研究*

廖志贤 罗晓曙† 黄国现

(广西师范大学电子工程学院, 桂林 541004)

(2014年12月12日收到; 2015年2月5日收到修改稿)

本文首先建立了两级式光伏并网逆变器严格的分段光滑状态方程, 分析级联情况下光伏阵列电压对光伏并网逆变器非线性动力学行为的影响, 然后探讨拓展两级式光伏并网逆变器输入电压范围的策略, 并研究前后级电路内部参数变化引起并网逆变器输出电流的快变尺度分岔和慢变尺度分岔现象. 研究发现: 若对光伏阵列电压进行分段控制, 可以有效展宽两级式光伏并网逆变器的输入电压范围; 适当增加前级输出电容值、电感量, 可以避免系统产生混沌运动, 而后级参数的取值需避开多个不连续的混沌区域. 研究结果对提高光伏发电系统的效率与稳定性有较重要的参考价值.

关键词: 两级式光伏并网逆变器, 分段光滑, 分岔现象, 混沌

PACS: 05.45.-a, 84.30.Jc, 47.20.Ky

DOI: 10.7498/aps.64.130503

1 引言

现代功率变换器大量采用高频功率开关器件, 其输入输出电压通常较高, 使得功率变换器系统具有复杂的非线性动力学行为^[1-3]. 已有的研究发现, 非线性电路系统的分岔现象和混沌行为会引起系统的电磁干扰噪声加重、效率降低、稳定性和鲁棒性变差、临界状态崩溃等问题^[4-6]. 因此, 深入研究并网逆变器的非线性动力学行为, 对工程设计中电路参数选择、探索新型控制策略和避免微网电力系统灾变等方面具有非常重要的意义.

近年来, 随着新能源开发技术的不断发展, 光伏并网逆变器已经成为功率变换器技术领域的重要研究对象^[7,8]. 与之相关的各类变换器电路的非线性动力学行为研究得到了研究者们的广泛关注. 文献^[9]建立了单相逆变器在比例控制下的一阶离散映射模型, 采用数值分析的方法, 研究了外部参数变化时逆变器中存在的非线性行为, 该研究结果对单相逆变器的工程设计具有很好的理论指导意

义. 文献^[10]通过对全桥DC/AC变换器进行建模分析, 研究了滤波器参数对系统非线性动力学行为的影响, 结果表明, 在一定的滤波器参数条件下, DC/AC变换器会出现分岔和混沌行为. 在逆变器电路系统快变和慢变尺度分岔现象及其控制策略方面, 文献^[11]针对电压型逆变器中存在的快慢变两种非线性动力学行为, 提出一种基于频域传递函数的控制策略, 可同时抑制快慢变尺度分岔引起的不稳定. 此外, 也有学者对采用模块并联方式的逆变器系统的非线性现象进行了研究^[12], 研究结果表明, 在模块并联结构的逆变器系统中, 存在复杂的非线性动力学行为, 分岔和混沌对系统输出质量具有重大的影响. 从上述研究动态来看, 国内外学者对逆变器电路系统的非线性动力学行为已经展开了深入的研究, 多集中在离网运行条件下的逆变器电路系统的研究. 在并网逆变器的非线性动力学研究方面, 相关的研究工作也开始逐步展开, 并取得了一些有意义的成果, 如文献^[5]通过建立单相并网逆变器的离散迭代模型, 研究考虑死区非线性的

* 国家自然科学基金(批准号: 11262004)和广西科学研究与技术开发计划(批准号: 桂科攻 1348017-2)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lxz@mailbox.gxnu.edu.cn

系统分岔行为, 为控制器参数设计和死区时间选取提供了很好的理论依据. 然而, 采用多级结构的光伏并网逆变器的非线性动力学行为研究工作还鲜见报道.

光伏并网逆变器电路使用高频功率开关器件, 同时将电网作为其有源负载^[13,14]. 其输入电压是光伏阵列的输出电压, 光伏阵列的输出电压变化范围宽、电压值随环境变化, 因此光伏并网逆变器是一种强非线性系统, 存在着十分复杂的非线性动力学行为. 单级式光伏并网逆变器具有电路结构简单、成本低、体积小等优点^[15-17]. 随着光伏并网发电系统规模的不断扩大, 光伏并网逆变器控制精度、最大功率点跟踪效率等方面需要进一步提高, 因此两级式光伏并网逆变器得到了广泛的应用^[18-20]. 两级式光伏并网逆变器是一类重要的电路结构, 前级通常用于做电压环控制, 以提高最大功率点跟踪 (MPPT) 精度和扩展逆变器的输入电压范围, 后级用于实现 DC/AC 变换, 将光伏阵列产生的直流电转换成交流电, 并馈入公共电网^[21-24]. 为了更全面地揭示光伏并网逆变器的物理特性, 更好地提高系统稳定性、鲁棒性、同步性能

等, 本文首先建立两级式光伏并网逆变器严格的分段光滑动力学模型, 研究其非线性动力学行为, 然后探讨拓展两级式光伏并网逆变器输入电压范围的策略, 并研究前后级电路内部参数变化引起并网电流的快变尺度分岔和慢变尺度分岔现象, 为正确设计和调试光伏并网逆变器提供理论依据.

2 逆变器的工作原理分析与模型建立

2.1 两级式光伏并网逆变器的电路结构

图 1 是一种应用非常广泛的两级式光伏并网逆变器电路结构, 第一级是采用 Boost 升压电路结构的 DC/DC 变换器, 第二级是采用双极性 SPWM 控制的电流型全桥 DC/AC 变换器. U_{PV} 是光伏阵列的输出电压, S_0 是 DC/DC 变换器的功率开关管, S_1-S_4 为全桥 DC/AC 变换器的 4 个功率开关管, i_L , u_C 分别为滤波电感电流和滤波电容两端的电压, u_g 为公共电网电压. 由于第一级具有升压和稳压的作用, 因此采用两级结构的光伏并网逆变器, 与采用单级结构的光伏并网逆变器相比, 具有输入电压范围宽、控制精度和稳定性高等特点.

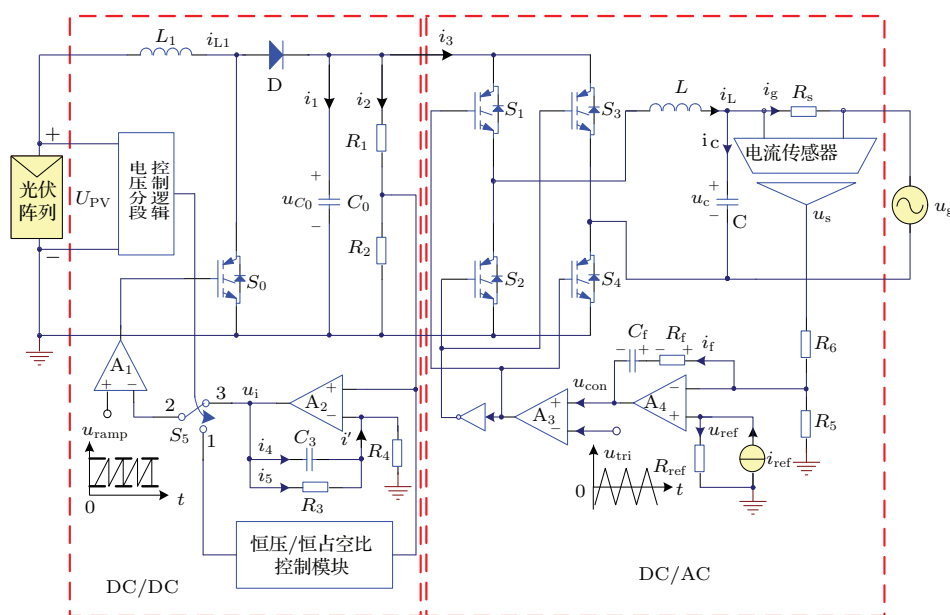


图 1 两级式光伏并网逆变器电路

Fig. 1. Circuit of two-stage photovoltaic grid-connected inverter.

图中, DC/DC 变换器的输出电压 u_{C0} 经电阻分压网络反馈到运算放大器 A_2 的同相端, 经积分环节后得到控制信号 u_i , 控制信号 u_i 与锯齿波 u_{ramp} 进行比较得到开关 S_0 的控制逻辑. 锯齿波

u_{ramp} 表达式如下:

$$u_{ramp} = V_1 + (V_2 - V_1) \text{MOD}(t, T_{ramp}), \quad (1)$$

式中, V_1 为锯齿波的谷值, V_2 为锯齿波的峰值,

T_{ramp} 为锯齿波的周期. 功率开关管 S_0 的控制逻辑为

$$S_0 = \begin{cases} 1, & (u_{\text{ramp}} > u_i), \\ 0, & (u_{\text{ramp}} < u_i). \end{cases} \quad (2)$$

DC/AC 变换器部分, 由于光伏并网逆变器通常希望以功率因数 1 向公共电网注入电流, 因此光伏并网逆变器的电流参考信号 i_{ref} 表达式如下:

$$i_{\text{ref}} = I_m \sin(\omega t), \quad (3)$$

式中 I_m 是电流参考信号的幅值, ω 是公共电网电压信号的角频率. 光伏并网逆变器输出电流 i_g 经采样电阻 R_s 后得到表征电流大小的电压信号 u_s , 电流参考信号流过电阻 R_{ref} 得到的电压信号 u_{ref} . 反馈电压信号 u_s 通过电阻 R_5 , R_6 分压后与参考电压信号 u_{ref} 分别输入到运算放大器 A_2 的反相与同相端, 进行比例积分后得到输出控制信号 u_{con} . 控制信号 u_{con} 与三角波 u_{tri} 进行比较, 得到开关 (S_1 — S_4) 的控制逻辑. 三角波 u_{tri} 的表达式如下:

$$u_{\text{tri}} = \begin{cases} \frac{4V_H}{T} \left[\text{MOD}(t, T) - \frac{1}{4}T \right], & 0 < \text{MOD}(t, T) \leq T/2, \\ -\frac{4V_H}{T} \left[\text{MOD}(t, T) - \frac{3}{4}T \right], & T/2 < \text{MOD}(t, T) \leq T, \end{cases} \quad (4)$$

式中, V_H , T 分别为三角波信号的峰值和周期.

S_1 — S_4 的开关逻辑为 $S_{1,4} = S$, $S_{2,3} = \bar{S}$, 其中

$$S = \begin{cases} 0, & (u_{\text{tri}} > u_{\text{con}}), \\ 1, & (u_{\text{tri}} < u_{\text{con}}). \end{cases} \quad (5)$$

2.2 两级式光伏并网逆变器分段光滑状态方程的建立

若公共电网电压 $u_g = U_m \sin(\omega t)$, 其中 U_m 和 ω 分别为公共电网电压的幅度和角频率. 为了使系统方程中不显含时间变量 t , 构造一个状态变量

$$\vartheta = U_m \cos(\omega t), \quad (6)$$

则有

$$\dot{u}_g = \omega \vartheta, \quad \dot{\vartheta} = -\omega u_g. \quad (7)$$

根据 KCL, KVL 及欧姆定律, 利用理想运算放大器的特性, 对图 1 所示的两级式光伏并网逆变器构建状态方程. 并令 $x_1 = i_{L_1}$, $x_2 = u_{C_0}$, $x_3 = u_i$, $x_4 = i_L$, $x_5 = u_C$, $x_6 = u_{\text{con}}$, $x_7 = u_g$, $x_8 = v$,

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{R_2}{C_0(R_1 + R_2)}, \\ \beta &= \frac{R_2(R_3 + R_4)}{C_3 R_4 R_3 (R_1 + R_2)} - \frac{R_2}{C_0(R_1 + R_2)^2}, \\ \gamma &= \frac{R_f}{R_6 R_S C} - \frac{1}{R_6 C_f}, \\ \xi &= \frac{1}{R_6 C_f} + \left(\frac{1}{R_6 C_f} + \frac{1}{R_5 C_f} \right) \frac{R_{\text{ref}} I_m}{U_m} - \frac{R_f}{R_6 R_S C}, \\ \rho &= \frac{R_f}{R_6} + \left(\frac{R_f}{R_6} - \frac{R_f}{R_5} + 1 \right) \frac{R_{\text{ref}} I_m}{U_m}, \end{aligned}$$

得到图 1 所示两级式逆变器的状态方程为

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \frac{S_0 - 1}{L_1} x_2 + \frac{U_{\text{PV}}}{L_1}, \\ \dot{x}_2 &= \frac{1 - S_0}{C_0} x_1 - \alpha x_2 - \frac{2S - 1}{C_0} x_4, \\ \dot{x}_3 &= \alpha x_1 + \beta x_2 - \frac{1}{C_3 R_3} x_3 - \alpha(2S - 1) x_4, \\ \dot{x}_4 &= -\frac{1}{L} x_5 + \frac{(2S - 1)}{L} x_2, \\ \dot{x}_5 &= \frac{1}{C} x_4 - \frac{1}{R_S C} x_5 + \frac{1}{R_S C} x_7, \\ \dot{x}_6 &= -\frac{R_f}{R_6 C} x_4 + \gamma x_5 + \xi x_7 + \rho \omega x_8, \\ \dot{x}_7 &= \omega x_8, \\ \dot{x}_8 &= -\omega x_7, \end{aligned} \quad (8)$$

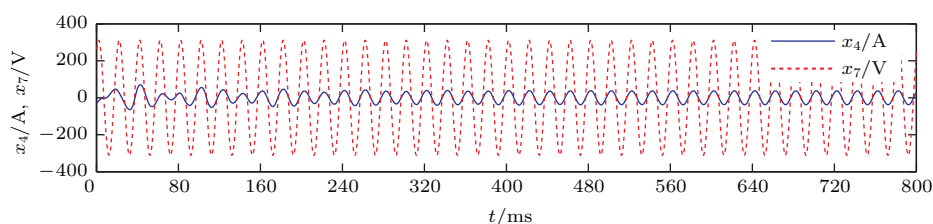
式中,

$$\begin{aligned} S_0 &= \begin{cases} 1, & (u_{\text{ramp}} > u_i), \\ 0, & (u_{\text{ramp}} < u_i), \end{cases} \\ S &= \begin{cases} 0, & (u_{\text{tri}} > u_{\text{con}}), \\ 1, & (u_{\text{tri}} < u_{\text{con}}). \end{cases} \end{aligned}$$

3 数值计算和分析

3.1 两级式光伏并网逆变器随光伏阵列电压变化的分岔行为

将 Boost 变换器输出端与单级式光伏并网逆变器输入端相连接, 构成图 1 所示的两级式光伏并网逆变器, 数值计算采用四阶龙格-库塔法, 取参数值为: $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 50 \text{ }\Omega$, $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 10 \text{ k}\Omega$, $L_1 = 2 \text{ mH}$, $C_0 = 220 \text{ }\mu\text{F}$, $C_3 = 200 \text{ nF}$, $R_S = 1.0 \text{ }\Omega$, $R_f = 50 \text{ }\Omega$, $R_{\text{ref}} = 0.5 \text{ }\Omega$, $R_5 = 50 \text{ k}\Omega$, $R_6 = 5 \text{ k}\Omega$, $L = 44 \text{ mH}$, $C = 52 \text{ }\mu\text{F}$, $C_f = 1 \text{ }\mu\text{F}$, $\omega = 100\pi$, 积分步长 $h = 0.000001$. 当 $U_{\text{pv}} = 250.0 \text{ V}$ 时, 并网电流的同步效果如图 2 所示, 经历了约 266 ms 后并网电流与电网电压相位、频率同步.

图2 (网刊彩色) 时域图显示并网电流的同步效果 ($U_{PV} = 250.0$ V)Fig. 2. (color online) Time-domain waveform of two-stage photovoltaic grid-connected inverter current ($U_{PV} = 250.0$ V).

研究DC/AC变换器的非线性动力学行为, 可以从开关频率和基波频率(50 Hz)两个角度去分析DC/AC变换器的分岔, 分别称为快变尺度分岔和慢变尺度分岔分析^[5,25]. 由于逆变器输出的基波电流(50 Hz正弦波)在一个较大的范围变化, 若其幅值过大, 可能会引起占空比饱和, 导致输出电流波形产生畸变, 不符合国家并网标准, 因此控制器需要选择合适的输出参考电流, 以防止发生占空比饱和现象. 考虑到光伏并网逆变器的显著特点是输入电压由光伏阵列产生, 而光伏阵列电压会随阳光辐射强度、温度等因素发生较大范围的变化, 因此以光伏阵列电压为参数, 研究系统的分岔和混沌行为, 对于工程设计具有很强的实际意义.

慢变尺度分析时, 选取每个基波周期(0.02 s)中的一个固定相位点对信号进行采样, 分频采样的频率为50 Hz, 以光伏阵列输出电压为分岔参数作两级式光伏并网逆变器并网电流慢变尺度分岔图, 如图3所示. 与单级式光伏并网逆变器^[9,12]不同, 两级式光伏并网逆变器在 U_{pv} 为311.1—500 V范围内不全是周期运动, 而是存在一个混沌区域(295—355 V). 同时, 由于前级采用了具有升压变换功能的Boost变换器, 两级式光伏并网逆变器允

许输入电压可以低于311.1 V, 通常可以低至24 V左右, 但是在24—311.1 V区间, 也存在一个混沌区域(102—145.5 V). 对于快变尺度分析, 使用折叠图分析方法, 分频采样频率为4 kHz, 略去前面的迭代过程, 取稳定后的40个基波周期, 将40个基波周期信号按相位对齐折叠, 若系统稳定, 则折叠图显示出单一正弦波轨迹, 若出现快变尺度分岔, 则显示多个正弦波轨迹. 图4(a), (b)分别显示了周期和混沌运动时的快变尺度分岔图, 在混沌运动时, 并网电流出现了严重的快变尺度分岔现象.

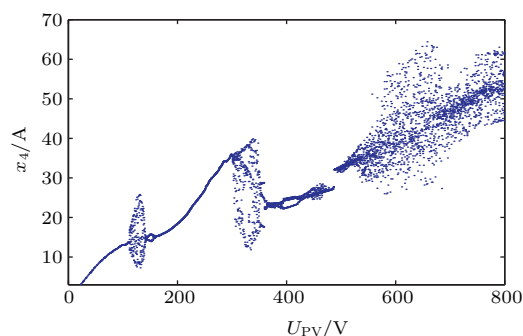
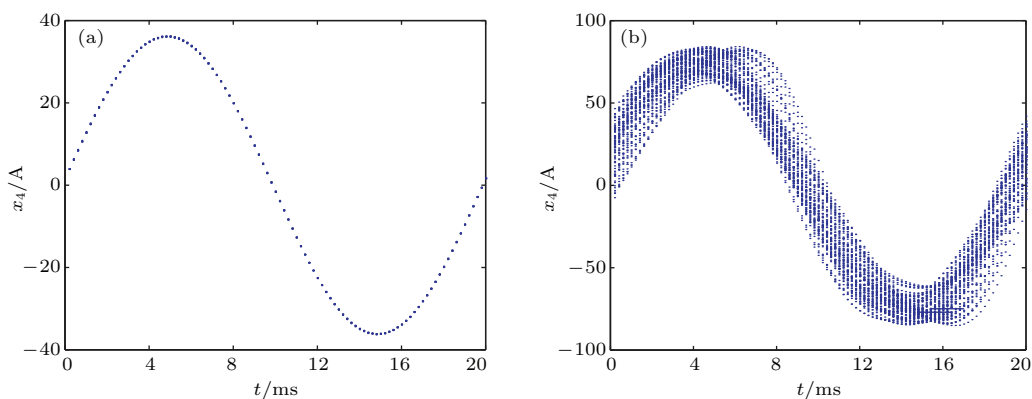


图3 以光伏阵列输出电压为分岔参数的两级式光伏并网逆变器并网电流慢变尺度分岔图

Fig. 3. Slow-scale bifurcation of two-stage photovoltaic grid-connected inverter current for changing values of U_{PV} .图4 两级式光伏并网逆变器并网电流快变尺度分岔图(分频采样频率取4 kHz) (a) $U_{PV} = 250.0$ V; (b) $U_{PV} = 650.0$ VFig. 4. Fast-scale bifurcation of two-stage photovoltaic grid-connected inverter current for different values of UPV (stroboscopic sampling frequency is 4 kHz): (a) $U_{PV} = 250.0$ V; (b) $U_{PV} = 650.0$ V.

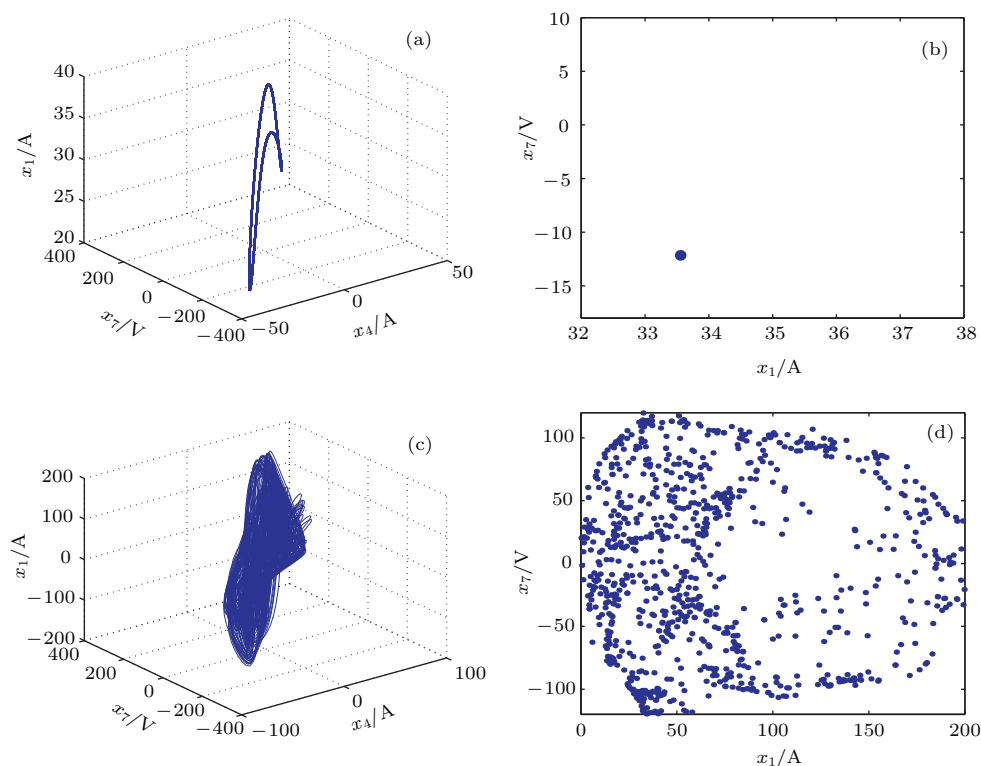


图5 两级式光伏并网逆变器三维相图及其 Poincaré 截面 (a) 周期相图, $U_{PV} = 250.0$ V; (b) Poincaré 截面, $U_{PV} = 250.0$ V; (c) 混沌相图, $U_{PV} = 650.0$ V; (d) Poincaré 截面, $U_{PV} = 650.0$ V

Fig. 5. (color online) 3-D phase diagram and Poincaré section of two-stage photovoltaic grid-connected inverter: (a) period phase diagram with $U_{PV} = 250.0$ V; (b) Poincaré section with $U_{PV} = 250.0$ V; (c) chaos phase diagram with $U_{PV} = 650.0$ V; (d) Poincaré section with $U_{PV} = 650.0$ V.

为了更直观地观察两级式光伏并网逆变器的动力学行为, 分别画出周期运动和混沌运动时的三维相图如图 5(a), (c) 所示. 以 $x_4 = 0$ A 作相应的 Poincaré 截面图进行分析, 如图 5(b), (d) 所示. 由 Poincaré 截面图可知, 选择光伏阵列电压参数 $U_{pv} = 250$ V 时, 以状态变量 x_1 , x_4 和 x_7 作三维相图, 其运动轨迹是单一的闭合曲线, 对应 Poincaré 截面上的一个点, 是一周期运动. 选择光伏阵列电压参数 $U_{pv} = 650$ V 时, 其运动轨迹是不规则的, 对应 Poincaré 截面上杂乱无章的点, 是混沌运动, 结果与图 3 所示的慢变尺度分岔图相符合.

由以上分析可知, 两级式光伏并网逆变器由于采用具有升压变换功能的 Boost 变换器作为前级, 与单级式光伏并网逆变器相比, 允许更宽的光伏阵列电压输入范围, 即光伏阵列电压最小值可低至 24 V 左右, 最大值约 500 V. 但是在 24—500 V 区间, 存在一些混沌区域, 在设计时需要采用一定的策略, 使系统运行时避免产生混沌. 例如, 根据光伏阵列电压进行分段控制的策略: 如图 1 所示, 电压分段控制逻辑模块根据光伏阵列输出电压值进

行分段控制, 产生的控制信号对开关 S_5 进行控制. 正常情况下, 开关 S_5 的 2 端与 3 端相连接, 在系统运行过程中, 若检测到光伏阵列电压值进入使两级式逆变器进入混沌运动的区域, 则开关 S_5 的 2 端与 1 端相连接, 前级 Boost 变换器选择恒压控制或恒定占空比控制, 控制信号由恒压/恒占空比控制模块产生, 此时 Boost 变换器无法做最大功率点跟踪; 当检测光伏阵列电压值进入使两级式逆变器进入周期运动的区域, 则开关 S_5 的 2 端与 3 端相连接, 返回正常的控制程序. 选择恒压控制时, 前级 Boost 变换器的输出电压控制在某个设定的电压值范围内 (选择能使后级 DC/AC 变换器处于周期运动区域的电压值范围). 选择恒占空比控制时, 恒占空比控制模块产生固定的控制信号, 使功率开关管的 PWM 控制信号占空比为一定值. 该控制策略虽然以损失最大功率点跟踪效率为代价, 但避免了系统由于产生混沌所引起的电磁兼容性能降低、转换效率降低、稳定性和鲁棒性变差、临界状态崩溃等问题 [4–6], 从而提高了系统的整体性能. 其控制效果如图 6 所示, 在原混沌区域 (102—145.5 V) 和

(295—355 V) 分别采用恒压控制和恒占空比控制后, 系统转变为周期运动, 两级式光伏并网逆变器允许的最佳输入电压范围进一步得到了很大拓展.

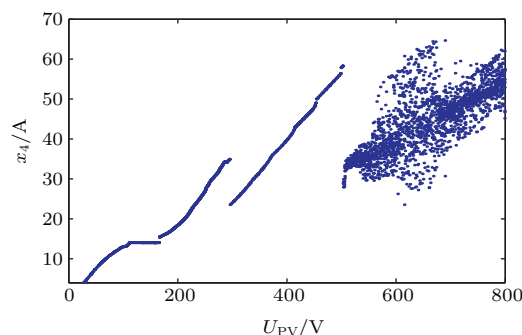


图6 采用改进策略后两级式光伏并网逆变器分岔图

Fig. 6. Slow-scale bifurcation of two-stage photovoltaic grid-connected inverter with proposed strategies.

3.2 内参数对两级式光伏并网逆变器非线性动力学行为的影响

除了光伏阵列电压会对两级式光伏并网逆变器的动力学行为产生影响外, 还有电路内部关键

器件参数也会对系统动力学行为产生影响. 图1所示的两级式光伏并网逆变器中, 对系统性能起重要作用的几个器件参数有前级输出电容 C_0 和电感 L_1 、后级输出电容 C 和电感 L . 为了研究这些电路内部参数对系统非线性动力学行为的影响, 首先在图3的周期运动区域中选择一个固定的光伏阵列电压值 $U_{PV} = 250$ V, 然后分别以 C_0 , L_1 , C 和 L 作为分岔参数, 作分岔图如图7所示. 从图7(a), (b) 可以看到, 前级Boost变换器的输出电容 C_0 和电感 L_1 在取值较小的区域 (C_0 取值小于 $236.0 \mu\text{F}$, L_1 取值小于 2.5 mH), 系统产生混沌. 而对于后级变换器的 C 和 L , 其混沌区域并非都在参数取值较小的区域, 比如, 参数 C 存在三个混沌区域: $0—17.0 \mu\text{F}$, $43—70.0 \mu\text{F}$, $79.0—115.0 \mu\text{F}$, 参数 L 则存在一个混沌区域: $16.64—26.52 \text{ mH}$. 由此可见, 在两级式光伏并网逆变器的工程设计中, 适当增加前级Boost变换器的惯性器件 C_0 和 L_1 的参数值, 可避免系统产生混沌, 而对于后级变换器的 C 和 L 则需要小心取值, 避免参数值落入混沌区域.

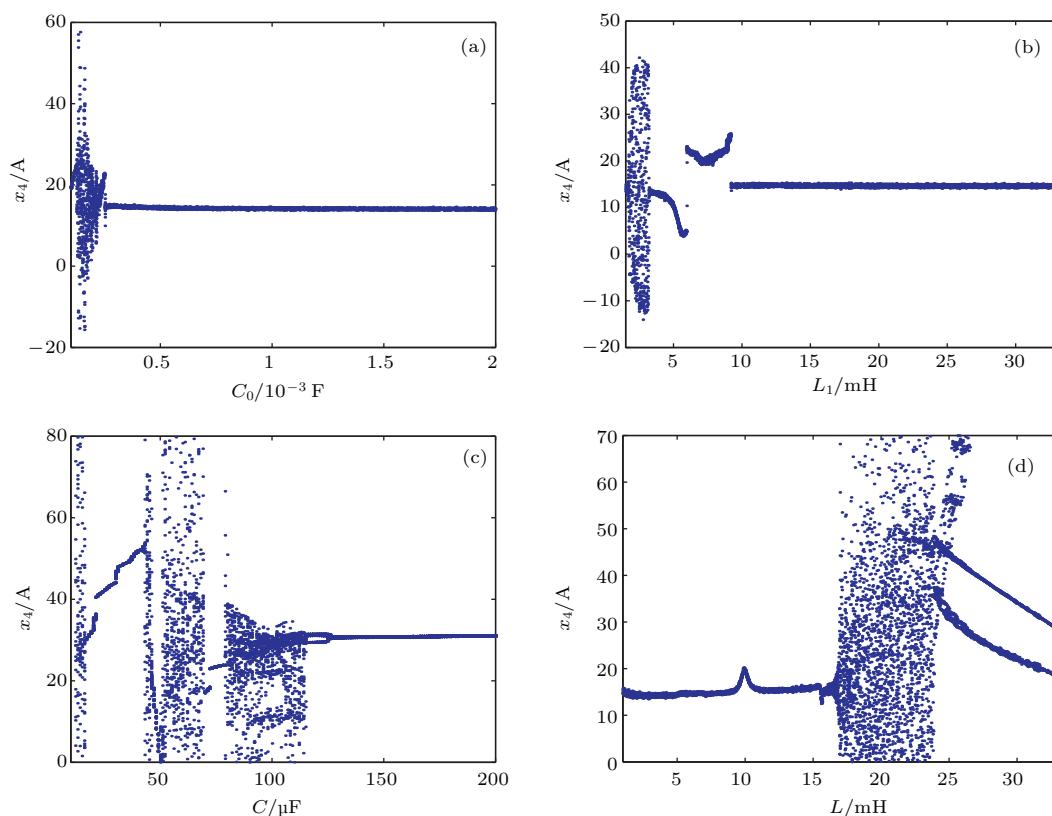


图7 以内参数为分岔参数画两级式光伏并网逆变器分岔图

Fig. 7. Slow-scale bifurcation of two-stage photovoltaic grid-connected inverter for changing values of C_0 , L_1 , C and L .

4 结 论

两级式光伏并网逆变器是一种强非线性系统, 其电路具有复杂的非线性动力学行为, 在一定的光伏阵列输出电压和电路内部参数条件下, 系统会产生混沌行为. 为了更好地了解两级式光伏并网逆变器的非线性动力学特性, 本文首先建立了两级式光伏并网逆变器严格的分段光滑状态方程, 用四阶龙格-库塔法解方程, 利用快变和慢变尺度分岔图、Poincaré 截面图等方法, 研究了两级式光伏并网逆变器的非线性动力学行为. 探讨了拓展两级式光伏并网逆变器允许光伏阵列电压输入范围的方法, 并研究了电路内部参数的取值对系统非线性动力学行为的影响. 研究表明, 两级式光伏并网逆变器中存在快变尺度和慢变尺度分岔现象, 与单级式光伏并网逆变器相比, 允许更宽的光伏阵列电压输入范围, 但是在 24—500 V 区间, 不全是周期运动, 而是存在一些混沌区域, 采用对光伏阵列电压进行分段控制的策略, 可避免系统产生混沌. 另外, 在两级式光伏并网逆变器的工程设计中, 适当增加前级 Boost 变换器的惯性器件 C_0 和 L_1 的值, 可避免系统产生混沌, 而对于后级变换器的 C 和 L 则需要小心取值, 避免两级式光伏并网逆变器落入混沌区域. 本文的研究结果对光伏并网逆变器的设计和调试具有较重要的指导意义和实用价值.

参考文献

- [1] Deivasundari P, Uma G, Santhi R 2014 *IET Power Electron.* **7** 340
- [2] Bao B C, Zhang X, Xu J P, Wang J P 2013 *IEEE Trans. Electron. Lett.* **49** 287
- [3] Bao B C, Zhou G H, Xu J P, Liu Z 2011 *IEEE Trans. Power Electron.* **26** 1968
- [4] Yucel A C, Bagci H, Michielssen E 2013 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **55** 1154
- [5] Xie R L, Hao X, Wang Y, Yang X, Huang L, Wang C, Yang Y H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 120510 (in Chinese)
- [6] Luo X S, Wang B H, Chen G R, Quan H J, Fang J Q, Zou Y L, Jiang P Q 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 12 (in Chinese) [罗晓曙, 汪秉宏, 陈关荣, 全宏俊, 方锦清, 邹艳丽, 蒋品群 2003 物理学报 **52** 12]
- [7] Freddy T K S, Rahim N A, Wooi-Ping H, Che H S 2014 *IEEE Trans. Power Electron.* **29** 5358
- [8] Yang Y H, Wang H, Blaabjerg F, Kerekes T 2014 *IEEE Trans. Power Electron.* **29** 6271
- [9] Liu H C, Yang S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 210502 (in Chinese) [刘洪臣, 杨爽 2013 物理学报 **62** 210502]
- [10] Parvathy Shankar D, Govindarajan U, Karunakaran K 2013 *IET Power Electron.* **6** 1956
- [11] Wu J K, Zhou L W, Lu W G 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 210202 (in Chinese) [吴军科, 周维维, 卢伟国 2012 物理学报 **61** 210202]
- [12] Liu H C, Su Z X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 010505 (in Chinese) [刘洪臣, 苏振霞 2014 物理学报 **63** 010505]
- [13] Herran M A, Fischer J R, Gonzalez S A, Judewicz M G, Carrica D O 2013 *IEEE Trans. Power Electron.* **28** 2816
- [14] Gu Y J, Li W H, Zhao Y, Yang B, Li C S, He X N 2013 *IEEE Trans. Power Electron.* **28** 793
- [15] Darwish A, Holliday D, Ahmed S, Massoud A M, Williams B W 2014 *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.* **2** 797
- [16] Hongrae K, Parkhideh B, Bongers T D, Gao H 2013 *IEEE Trans. Power Electron.* **28** 3788
- [17] Keyhani H, Toliyat H A 2014 *IEEE Trans. Power Electron.* **29** 3919
- [18] Ahmed M E S, Orabi M, AbdelRahim O M 2013 *IET Power Electron.* **6** 1812
- [19] Cecati C, Ciancetta F, Siano P 2010 *IEEE Trans. Ind. Electron.* **57** 4115
- [20] Chen L, Amirahmadi A, Zhang Q, Kutkut N 2014 *IEEE Trans. Power Electron.* **29** 3881
- [21] Yang B, Li W H, Zhao Y, He X N 2010 *IEEE Trans. Power Electron.* **25** 992
- [22] Chan F, Calleja H 2011 *IEEE Trans. Ind. Electron.* **58** 2683
- [23] Malik O, Havel P 2014 *IEEE Trans. Sustain. Energy* **5** 673
- [24] Xiao H, Xie S 2012 *IEEE Trans. Power Electron.* **5** 899
- [25] Liu H C, Li F, Su Z X, Sun L X 2013 *Chin. Phys. B* **22** 110501

Numerical modeling and research on nonlinear dynamic behaviors of two-stage photovoltaic grid-connected inverter^{*}

Liao Zhi-Xian Luo Xiao-Shu[†] Huang Guo-Xian

(College of Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

(Received 12 December 2014; revised manuscript received 5 February 2015)

Abstract

In this paper, the piecewise smooth state equation of a two-stage photovoltaic grid-connected (TPG) inverter is established and studied; based on the solution to the piecewise smooth state equation of the TPG inverter, effects of the photovoltaic array voltage on nonlinear dynamical behaviors of the TPG inverter are analyzed by using bifurcation diagram, folded diagram, 3D phase diagram, and Poincaré section. Then the nonlinear dynamical behaviors of TPG inverter are compared with the conventional one. And a strategy of expanding the input voltage range for the TPG inverter is explored. Finally, the nonlinear dynamical behaviors in it caused by the variation of main circuit parameters: such as the output inductance and capacitance of the front-stage, as well as those of the second-stage, are discussed through slow-scale bifurcation diagrams. Studies have found that it is effective to expand the input voltage range of the TPG inverter by segment control of the photovoltaic array voltage, and the chaotic phenomena in the TPG inverter can be avoided by increasing the parameter values of inertial devices such as output inductance and capacitance in the front-stage appropriately, but the values of output inductance and capacitance in the second-stage should be away from the multiple noncontiguous region, since it can cause chaotic behavior. The above work may have important guiding significance and application for improving the stability and efficiency of two-stage photovoltaic grid-connected inverter based photovoltaic power generation system.

Keywords: two-stage photovoltaic grid-connected inverter, piecewise smooth, bifurcation, chaos

PACS: 05.45.-a, 84.30.Jc, 47.20.Ky

DOI: 10.7498/aps.64.130503

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11262004) and the Science and Technology Development Program of Guangxi Province, China (Grant No. 1348017-2).

[†] Corresponding author. E-mail: lxz@mailbox.gxnu.edu.cn