

基于小世界网络模型的光伏微网系统同步方法研究

廖志贤 罗晓曙

Research on synchronous method for photovoltaic supplied micro-grid based on small-world network model

Liao Zhi-Xian Luo Xiao-Shu

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica 63, 230502 (2014) **DOI:** 10.7498/aps.63.230502

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.230502>

当期内容 View Table of Contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/volumn/home.shtml>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[参数不确定的分数阶混沌系统广义错位延时投影同步](#)

李睿, 张广军, 姚宏, 朱涛, 张志浩

2014, 63(23): 230501. 全文: [PDF](#) (303KB)

[基于扩张状态观测器的永磁同步电机混沌系统自适应滑模控制](#)

陈强, 南余荣, 邢科新

2014, 63(22): 220506. 全文: [PDF](#) (480KB)

[异质神经元的排列对环形耦合神经网络频率同步的影响](#)

孙晓娟, 杨白桦, 吴晔, 肖井华

2014, 63(18): 180507. 全文: [PDF](#) (335KB)

[峰值电流模式控制同步开关Z源变换器的动力学研究](#)

向俊杰, 毕闯, 向勇, 张千, 王京梅

2014, 63(12): 120507. 全文: [PDF](#) (7173KB)

[加权方式对网络同步能力的影响](#)

王丹, 井元伟, 郝彬彬

2012, 61(17): 170513. 全文: [PDF](#) (1763KB)

基于小世界网络模型的光伏微网系统 同步方法研究*

廖志贤 罗晓曙†

(广西师范大学电子工程学院, 桂林 541004)

(2014年5月28日收到; 2014年7月22日收到修改稿)

建立了光伏微网逆变器严格的分段线性状态方程, 分析其非线性动力学行为, 然后以光伏微网逆变器为网络节点, 研究基于小世界网络模型的光伏微网系统同步方法, 并与基于邻近耦合规则的光伏微网同步进行比较. 研究发现, 基于小世界网络模型的光伏微网系统比传统的基于邻近耦合规则的光伏微网系统具有更短的同步时间, 在外加扰动的情況下也具有更快的恢复时间.

关键词: 光伏微网系统, 小世界网络, 同步, 非线性动力学

PACS: 05.45.Xt, 05.45.-a, 05.45.Pq, 64.60.aq

DOI: 10.7498/aps.63.230502

1 引言

近年来, 光伏微网系统已经成为新能源和非线性动力学领域的研究热点之一^[1,2]. 光伏微网系统由多个光伏逆变器按照一定的拓扑结构相连接, 形成一个供电网络, 它既可以通过公共耦合点与公共电网相连接, 也可以脱离公共电网, 形成一个自治的孤岛供电网络^[3,4]. 光伏微网系统与公共电网相连接时, 其工作原理与传统的光伏并网发电系统一致. 可以孤岛运行是光伏微网系统的重要特性. 对于传统的光伏并网发电系统, 其运行依赖于公共电网的驱动, 当公共电网停止供电时, 系统也停止运行^[5,6]. 较之于传统光伏发电系统, 光伏微网发电系统具有更好的灵活性和更高的能源利用率. 在孤岛运行模式下, 光伏微网系统的 N 个逆变器作为电压源来分担共同的负载, 其关键在于逆变器之间输出电压相互同步, 以保证系统的可靠运行.

目前, 光伏微网系统在孤岛运行模式下的同步研究得到了科研工作者的广泛关注. 例如, 文献^[7]研究了一种孤岛运行模式下光伏微网系统同步方

法, 其原理是在每个光伏微网逆变器内部构建虚拟振荡器, 并通过微处理器控制光伏微网逆变器的输出以跟踪自身的虚拟振荡器, 而每个光伏微网逆变器的虚拟振荡器则通过电力线级联耦合, 实现光伏微网逆变器输出电压的同步, 通过对3个微网逆变器进行仿真实验, 结果证实了其方法的有效性. 文献^[8]通过在光伏微网系统中增加一定数量的混合发电机组, 将混合发电机组的输出电压作为参考电压源, 将所有光伏微网逆变器作为电流源, 光伏微网逆变器的输出跟踪参考电压源信号, 以实现光伏微网系统的同步. 当作为参考电压源的混合发电机组发生故障时, 整个光伏微网系统有可能会无法同步并停止工作. 文献^[9]在光伏微网发电系统中, 利用柴油发电机提供稳定的频率, 光伏微网逆变器提供稳定的电压幅度, 两者相互维持、跟踪, 实现系统的同步. 然而, 逆变器电路是一种强非线性系统, 存在非常复杂的非线性动力学行为^[10,11], 由多个光伏逆变器按照一定拓扑连接而成的光伏微网系统将会存在更复杂的动力学行为, 这对光伏微网系统的同步和控制的分析研究带来新的挑战, 只有通

* 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.

† 通讯作者. E-mail: lxs@mailbox.gxnu.edu.cn

过建立光伏微网系统严格的非线性动力学方程, 才能更全面地揭示光伏微网系统的物理性能, 如谐波抑制、稳定性、鲁棒性、同步等.

小世界网络是一种介于规则网络和随机网络之间的网络结构, 其构建方法是将规则网络中的每条边以概率 p 重新连接, 重新连接的边称为捷径, 当 $p = 0$ 时, 小世界网络成为规则网络, 当 $p = 1$ 时则是完全随机的网络. 一些新的研究表明, 现实世界中许多系统都具有小世界网络的结构特性, 如脑神经网络 [12,13], Web 网络 [14], 电力能源网络 [15], 无线传感器网络 [16] 等. 由于小世界网络能很好地描述真实世界的复杂网络, 其同步问题引起了广大学者的研究兴趣 [17-19]. 研究发现, 小世界网络中的捷径使得网络同步性能得到增强. 随着光伏微网系统规模的不断扩大, 有必要建立光伏微网系统的小世界网络模型, 从复杂网络同步的角度对其进行深入研究, 从而为光伏微网系统新型网络拓扑、新控制方法的探索提供理论基础. 因此, 本文首先建立光伏微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, 其次, 以光伏微网逆变器为节点, 建立光伏微网系统的小世界网络模型, 并研究基于小世界网络模型的光伏微网系统的同步.

2 模型与方法

2.1 光伏微网逆变器的电路结构

图 1 是一种采用双极性正弦脉冲宽度调制策略控制的光伏微网逆变器电路结构. U_{PV} 是光伏电

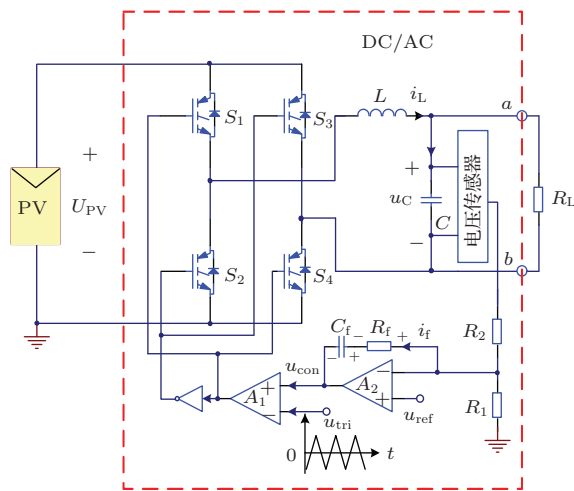


图 1 光伏微网逆变器电路图

池 (PV) 阵列的直流电压; S_1-S_4 为全桥电路的 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; R_L 为负载等效电阻.

图 1 中, u_{ref} 是光伏微网逆变器的参考信号, 表达式如下:

$$u_{ref} = A \sin(\omega t), \quad (1)$$

式中, A 和 ω 分别是参考电压信号的幅值和频率. 参考信号和逆变器输出电压反馈信号之差经由运算放大器 A_2 构成的比例积分单元后得到控制信号 u_{con} . 控制信号 u_{con} 与三角波 u_{tri} 进行比较后, 得到开关 (S_1-S_4) 的控制逻辑. 三角波 u_{tri} 的表达式如下:

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

式中, V_H 为三角波的峰值, T 为三角波信号的周期.

S_1-S_4 的开关控制逻辑表示为 $S_{1,4} = S, S_{2,3} = \bar{S}$, 其中

$$S = \begin{cases} 0 & (u_{tri} > u_{con}), \\ 1 & (u_{tri} < u_{con}). \end{cases} \quad (3)$$

2.2 光伏微网逆变器的分段光滑状态方程

由基尔霍夫电流定律, 基尔霍夫电压定律及欧姆定律, 并考虑理想运算放大器的特性, 通过理论推导, 令 $\tau = R_L C, \tau_f = R_f C_f, \delta = \frac{R_f}{R_2}, \gamma = \frac{R_f}{R_1}, \vartheta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_m \cos(\omega t)$, 得到图 1 所示逆变器的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{i}_L = \frac{(2S-1)}{L} U_{PV} - \frac{1}{L} u_C, \\ \dot{u}_C = \frac{1}{C} i_L - \frac{1}{\tau} u_C, \\ \dot{u}_{con} = -\frac{\delta}{C} i_L + \delta \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_f} \right) u_C \\ \quad + (1 + \delta + \gamma) \omega \vartheta + \frac{1}{\tau_f} (\delta + \gamma) u_{ref}, \\ \dot{\vartheta} = -\omega \vartheta, \\ \dot{u}_{ref} = \omega \vartheta, \end{cases} \quad (4)$$

令

$$\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T = [i_L \ u_C \ u_{con} \ \vartheta \ u_{ref}]^T,$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{\tau} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\delta}{C} & \delta\left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_f}\right) & 0 & (1+\delta+\gamma)\omega & \frac{1}{\tau_f}(\delta+\gamma) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega \\ 0 & 0 & 0 & \omega & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \left[\frac{(2S-1)}{L} U_{PV} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \right]^T,$$

则(4)式变为

$$\dot{\mathbf{X}} = f(\mathbf{X}) = \mathbf{B}\mathbf{X} + \mathbf{C}. \quad (5)$$

为了更好地了解光伏微网逆变器的非线性动力学行为,以PV电压为分岔参数,给出光伏微网逆变器输出电压的分岔图如图2所示.由图2可知,在一定的参数条件下,光伏微网逆变器会进入混沌运动状态.

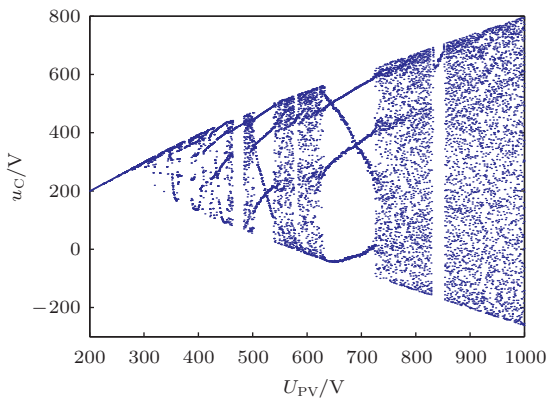


图2 以输入电压为参数的光伏微网逆变器输出电压分岔图

2.3 光伏微网系统的小世界网络模型

考虑一个由 N 个逆变器节点构成的光伏微网系统小世界网络,每个节点是由(5)式确定的动力学系统,耦合点为图1中的 a 和 b ,采用线性耦合方式,那么光伏微网系统小世界网络的状态方程为

$$\dot{\mathbf{X}}_i = f(\mathbf{X}_i) + k \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij} \mathbf{\Gamma}(\mathbf{X}_j - \mathbf{X}_i) \quad (i = 1, 2, \dots, N), \quad (6)$$

式中,节点 i 的状态变量

$$\mathbf{X}_i = [x_{i1} \ x_{i2} \ x_{i3} \ x_{i4} \ x_{i5}]^T \in \mathbf{R}^5,$$

k 是耦合强度,内耦合矩阵 $\mathbf{\Gamma} \in \mathbf{R}^{5 \times 5}$, $(a_{ij})_{N \times N} = \mathbf{A} \in \mathbf{R}^{N \times N}$, \mathbf{A} 为耦合矩阵.为了简化分析, $\mathbf{\Gamma}$ 取对角矩阵, $\mathbf{\Gamma} = \text{diag}(r_1, r_2, \dots, r_n, \dots, r_5)$, $r_n = 1$ 表示两个节点的第 n 个状态变量间有耦合, $r_n = 0$ 则表示两个节点的第 n 个状态变量间没有耦合.

耦合矩阵 \mathbf{A} 中,除了对角元素 a_{ii} 之外的所有元素的值为“0”或“1”,当 $a_{ij} = a_{ji} = 1$,表明 i 节点与 j 节点有耦合,反之则没有耦合.令

$$a_{ii} = - \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij} = - \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ji} \quad (i = 1, 2, \dots, N), \quad (7)$$

则(6)式可写成如下形式:

$$\dot{\mathbf{X}}_i = f(\mathbf{X}_i) + k \sum_{j=1}^N a_{ij} \mathbf{\Gamma} \mathbf{X}_j \quad (i = 1, 2, \dots, N). \quad (8)$$

3 数值计算和分析

3.1 邻近耦合网络与小世界网络光伏微网系统的同步时间比较

构造一个度数是4,节点数为 N 的邻近耦合规则网络,则其耦合矩阵 $\mathbf{A}_{nc} = (a_{ij})_{N \times N}$,由邻近耦合规则网络的耦合矩阵 \mathbf{A}_{nc} 出发,可以构造出一个相应的小世界网络:在 \mathbf{A}_{nc} 中,若 $a_{ij} = 1$,则以概率 p 将 a_{ij} 和 a_{ji} 修改为0,并随机选择一个为0的 $a_{ij'}$ 和 $a_{j'i}$,令 $a_{ij'} = a_{j'i} = 1, j' = 1, 2, \dots, N$ 且 $j' \neq i$,再根据(7)式计算对角元素,得到对应的小世界网络耦合矩阵 \mathbf{A}_{sc} .下面对邻近耦合网络与小世界网络光伏微网系统的同步时间进行比较分析.

数值计算采用四阶龙格-库塔法对光伏微网逆变器节点微分方程进行求解,积分步长 $h = 0.000001$,取网络参数为 $N = 56, k = 200, \mathbf{\Gamma} = \text{diag}(0, 0, 0, 0, 1)$,采用数值方法计算得耦合矩阵 \mathbf{A}_{sc} 的最大特征值 $\lambda_{\max} = -1.6 \times 10^{-15} < 0$,表明网络是可同步的^[20];节点参数的取值为 $U_{PV} = 400.0 \text{ V}, R_L = 10.0 \Omega, L = 11.6 \text{ mH}, C = 4.7 \mu\text{F}, R_1 = 10.0 \Omega, R_2 = 990.0 \Omega, R_f = 100.0 \Omega, C_f = 55.0 \mu\text{F}, U_m = 311.08 \text{ V}, \omega = 100.0\pi \text{ rad/s}$,

三角波的峰值 $V_H = 4.0 \text{ V}$, 三角波信号的周期 $T = 392.0 \text{ } \mu\text{s}$. 本文使用方差来描述光伏微网系统网络的同步性能, 定义方差如下:

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{in} - \bar{x}_n)^2} \quad (n = 1, 2, \dots, 5), \quad (9)$$

式中, \bar{x}_n 表示网络中所有节点的第 n 个状态变量的平均值, 当网络同步时, $\sigma_n = 0$. 邻近耦合网络与小世界网络光伏微网系统的同步时间比较如图 3 和

图 4 所示, 基于小世界网络的光伏微网系统具有更快的同步时间和更小的同步误差. 图 4 为光伏微网系统的电压信号时域波形. 其中图 4(a) 为基于邻近耦合规则网络的光伏微网系统电压波形, 由图 4(a) 可见, 系统没有达到完全同步, 同步时间大于 500 ms; 图 4(b) 为基于小世界网络的光伏微网系统电压波形, 系统可达到完全同步状态, 同步时间为 100 ms.

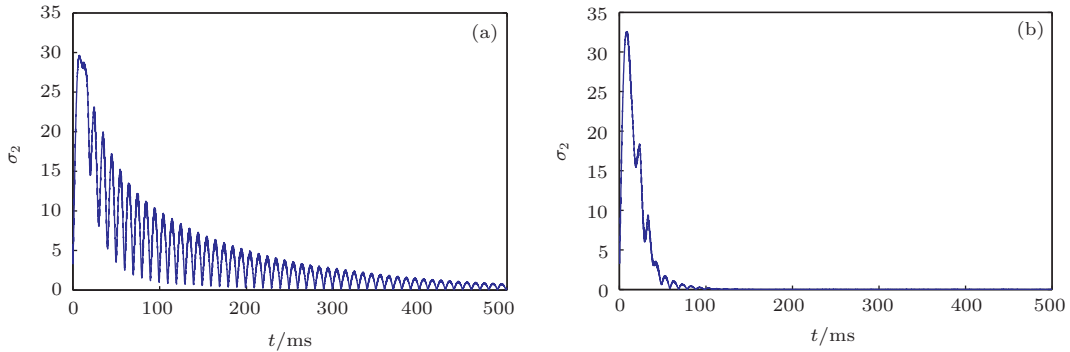


图 3 利用方差图显示同步性能 (a) 邻近耦合规则网络; (b) 小世界网络

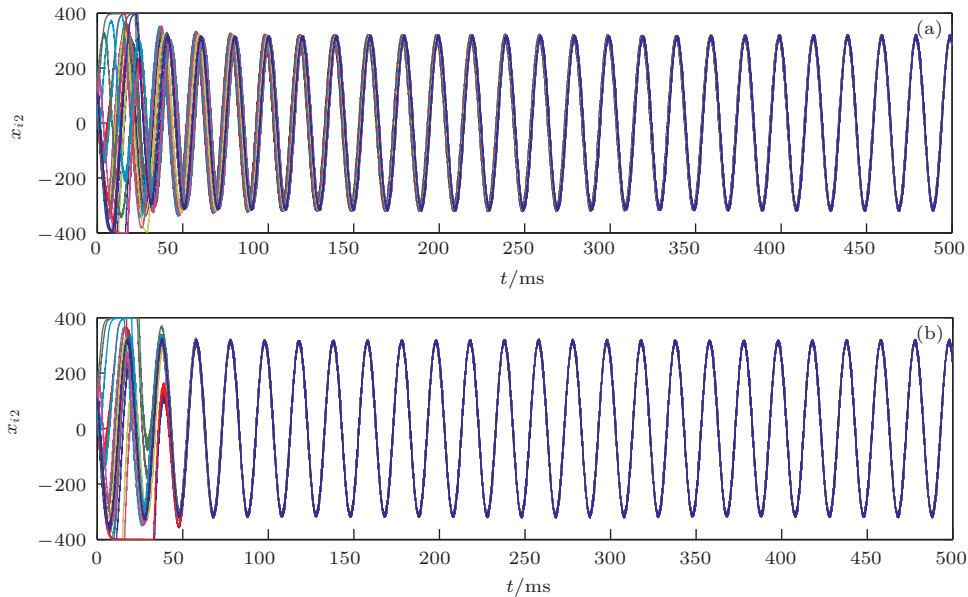


图 4 (网刊彩色) 光伏微网系统的电压信号时域波形 (a) 邻近耦合规则网络; (b) 小世界网络

3.2 邻近耦合网络与小世界网络光伏微网系统受到随机扰动后的恢复时间比较

光伏微网系统同步运行后, 对系统施加随机扰动, 在数值模拟时用 rand() 函数产生扰动信号 $\mathbf{Z}_i = [z_{i1} \ z_{i2} \ z_{i3} \ z_{i4} \ z_{i5}]^T \in \mathbf{R}^5$, 则光伏微网系统

网络状态方程为

$$\dot{\mathbf{X}}_i = f(\mathbf{X}_i) + k \sum_{j=1}^N a_{ij} \Gamma \mathbf{X}_j + \mathbf{D} \mathbf{Z}_i \quad (i = 1, 2, \dots, N). \quad (10)$$

取扰动系数矩阵 $\mathbf{D} = \text{diag}(1, 1, 1, 1, 1)$, 网络参数和节点参数取值与 3.1 节相同, 对受到随机扰动后

的邻近耦合网络与小世界网络光伏微网系统进行数值计算, 结果如图 5 和图 6 所示, 在 50 ms 处加入外部扰动. 图 5(a) 表示基于临近耦合规则网络

的光伏微网系统恢复时间, 其同步的时间点大于 500 ms; 图 5(b) 表示基于小世界网络的光伏微网系统恢复时间, 同步时间小于 125 ms.

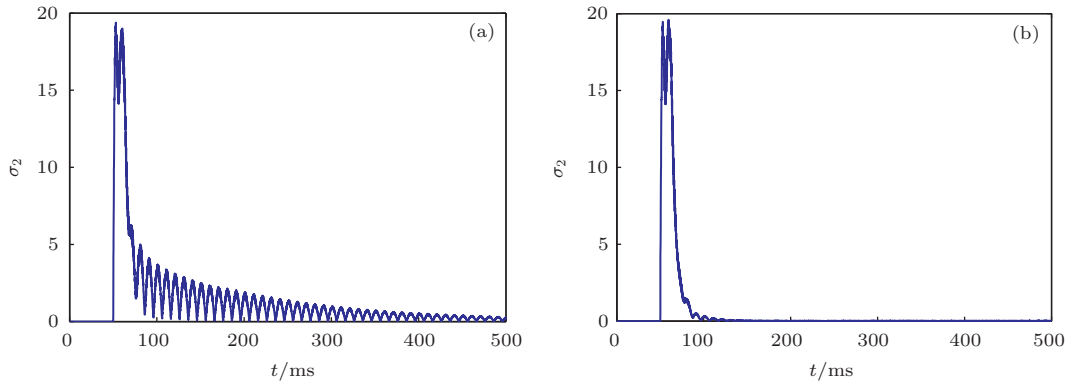


图 5 利用方差图显示扰动后的恢复时间 (a) 邻近耦合规则网络; (b) 小世界网络

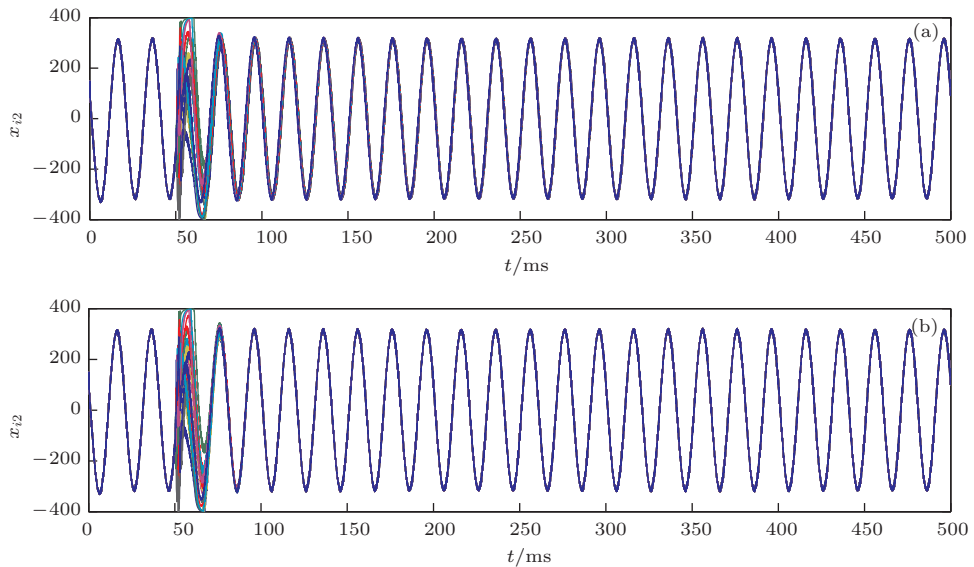


图 6 (网刊彩色) 加扰动后的恢复时间时域图 (a) 邻近耦合规则网络; (b) 小世界网络

3.3 小世界网络节点数 N 对同步时间的影响

为进一步研究基于小世界网络模型的光伏微网系统的同步性能, 以节点数 N 为变化参数, 通过数值模拟的方法研究同步性能随节点数 N 的变化规律. 图 7 显示了基于小世界网络模型 ($p = 0.1$) 和规则网络模型的光伏微网系统同步时间随节点数 N 的变化规律. 由图 7 可知, 随着节点数 N 的增加, 基于小世界网络模型的光伏微网系统的同步时间 T_{syn} 几乎维持不变, 而基于规则网络模型的光伏微网系统同步时间有明显的上升趋势. 总体上看, 小世界网络模型光伏微网系统同步时间远远小于规

则网络模型光伏微网系统同步时间.

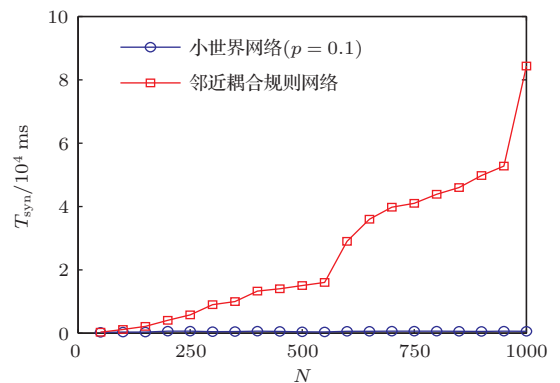


图 7 基于小世界网络和规则网络的光伏微网系统同步时间随着网络节点数 N 的变化

4 结 论

光伏微网逆变器是一种强的非线性系统,其内部电路具有复杂的非线性动力学行为,在一定参数条件下,光伏微网逆变器会进入混沌运动状态.为了更好地研究光伏微网系统的同步,本文建立光伏微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,分岔图显示光伏微网逆变器有着复杂的非线性动力学行为.以光伏微网逆变器作为网络节点,基于小世界网络模型和邻近耦合规则网络模型,研究光伏微网系统的同步方法.结果表明,在节点数较小的情况($N < 100$)下,基于小世界网络模型的光伏微网系统的同步时间和受扰动后恢复时间比基于邻近耦合规则网络的光伏微网系统快5—6倍,两者在同一数量级;而随着网络节点数的增加,前者比后者快1—2个数量级.本文的研究结果丰富了小世界网络在实际强非线性系统同步中的应用研究,对光伏微网系统的同步控制方法设计具有较重要的指导意义和实用价值.

参考文献

- [1] Kuo C L, Lin C H, Yau H T, Chen J L 2013 *IEEE Trans. Emerg. Sel. Topics Circ. Syst.* **3** 459
- [2] Chatterjee A, Keyhani A 2012 *IEEE Trans. Smart Grid* **3** 1860
- [3] Ou T C, Hong C M 2014 *Energy* **66** 314
- [4] Ye L, Sun H B, Song X R, Li L C 2012 *Renew. Energ.* **39** 96
- [5] Meza C, Biel D, Jeltsema D, Scherpen J M A 2012 *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* **20** 520
- [6] Agorreta J L, Borrega M, López J, Marroyo L 2011 *IEEE Trans. Power Electron.* **26** 770
- [7] Johnson B B, Dhople S V, Cale J L, Hamadeh A O, Krein P T 2014 *IEEE J. Photovolt.* **4** 387
- [8] Serban E, Serban H 2010 *IEEE Trans. Power Electron.* **25** 2981
- [9] Mishra S, Ramasubramanian D, Sekhar P C 2013 *IEEE Trans. Power Syst.* **28** 4393
- [10] Hu N H, Zhou Y F, Chen J N 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 130504 (in Chinese) [胡乃红, 周宇飞, 陈军宁 2012 物理学报 **61** 130504]
- [11] 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]
- [12] Wei D Q, Zhang B, Qiu D Y, Luo X S 2010 *Chin. Phys. B* **19** 100513
- [13] Zhang Y, Liu J, Li L C, Du M, Fang W X, Wang D X, Jiang X X, Hu X P, Zhang J, Wang X Y, Fang J 2014 *Magn. Reson. Imaging* **32** 359
- [14] Liu F M, Wang L, Gao L, Li H X, Zhao H F, Men S K 2014 *Knowl.-Based Syst.* **57** 161
- [15] Dassisti M, Carnimeo L 2013 *Energ. Policy* **63** 887
- [16] Li Q, Zhang B H, Cui L G, Fan Z, Vasilakos A V 2012 *Chin. Phys. B* **21** 050205
- [17] Yu H T, Wang J, Liu C, Deng B, Wei X L 2013 *Physica A* **392** 5473
- [18] Wang D, Jing Y W, Hao B B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 170513 (in Chinese) [王丹, 井元伟, 郝彬彬 2012 物理学报 **61** 170513]
- [19] Wang X H, Jiao L C, Wu J S 2010 *Chin. Phys. B* **19** 020501
- [20] Wang X F, Chen G R 2002 *Int. J. Bifurcat. Chaos* **12** 187

Research on synchronous method for photovoltaic supplied micro-grid based on small-world network model*

Liao Zhi-Xian Luo Xiao-Shu[†]

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

(Received 28 May 2014; revised manuscript received 22 July 2014)

Abstract

Based on the solution to the strictly piecewise linear state equation of a photovoltaic (PV) supplied micro-grid inverter, the nonlinear dynamic behavior of PV supplied micro-grid inverter is analyzed in this paper, and each PV supplied micro-grid inverter is considered as a network node, then a synchronous method for PV supplied micro-grid is studied using the small-world network model. Studies have found that, compared with the nearest-neighbor coupling network model, the PV supplied micro-grid based on the small-world network model has a faster synchronization time, and also has a faster recovery time in case of plus disturbance.

Keywords: photovoltaic micro-grid system, small-world network, synchronization, nonlinear dynamics

PACS: 05.45.Xt, 05.45.-a, 05.45.Pq, 64.60.aq

DOI: [10.7498/aps.63.230502](https://doi.org/10.7498/aps.63.230502)

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

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