

# 智能电网的失稳与混沌

杨 珺<sup>1</sup>, 王雅光<sup>1</sup>, 孙秋野<sup>1</sup>, 钟 瑞<sup>2</sup>

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 国家电网抚顺供电公司, 辽宁 抚顺 113008)

**摘 要:** 由于智能电网含有大量的分布式新能源逆变并网, 故使智能电网的潮流流向和电压分布特性发生改变, 影响了智能电网的稳定性. 首先建立智能电网的动态模型, 采用下垂控制策略来表征新能源并网逆变器的功频特性, 利用等值发电机和动态负荷模型分析智能电网的失稳过程和混沌现象. 在不同的初值下, 针对该模型的仿真研究表明, 智能电网存在渐近稳定、周期运行、准周期运行、混沌、超混沌以及电压崩溃的运行状态. 在研究过程中发现, 分岔、混沌、超混沌以及电压崩溃都是智能电网失稳的中间过程. 为了防止失稳事故的发生, 必须在临界失稳点之前对其进行及时有效的控制.

**关 键 词:** 智能电网; 失稳; 混沌; 动态模型; 下垂控制

中图分类号: TM 712

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)01-0006-05

## Instability and Chaos of Smart Grid

YANG Jun<sup>1</sup>, WANG Ya-guang<sup>1</sup>, SUN Qiu-ye<sup>1</sup>, ZHONG Rui<sup>2</sup>

(1. School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. State Grid Fushun Electric Power Supply Company, Fushun 113008, China. Corresponding author: YANG Jun, E-mail: yangjun@ise.neu.edu.cn)

**Abstract:** A large number of distributed new energy incorporated in the grid through inverters is one of the characteristics of smart grid, resulting in the change of the power flow and the voltage distribution characteristics of smart grid, which will influence the stability of the smart grid. A dynamic model to analyze the process of instability and chaotic behavior of smart grid was firstly presented by using droop control strategy, equivalent generator and dynamic load model. With the simulation results, the asymptotically stable, cycle operation, quasi-periodic operation, chaos, hyperchaos and voltage collapse could be obtained under different initial conditions in smart grid. And it was found that the bifurcation, chaos, hyperchaos and voltage collapse were the middle processes of instability in smart grid. To prevent the instability accidents, the timely and effective control should be taken before the critical point.

**Key words:** smart grid; instability; chaos; dynamic model; droop control

近年来,随着电力系统稳定性问题的深入研究,许多学者相继发现,电力系统是一种典型的强耦合、多变量、非线性的动态系统,电力系统在失稳之前往往要经历一段时间的振荡,而在这一过程中可能存在着大量的分岔和混沌现象<sup>[1-4]</sup>. 目前,人们对电力系统的混沌振荡机理进行了广泛的研究,如 Wei 等<sup>[5]</sup>通过理论分析和数值仿真发现,在系统负荷扰动和有界噪声的作用下,电力系统更易出现混沌现象. Qin 等<sup>[6]</sup>的研究表明电力

系统在随机相位扰动下会发生混沌振荡现象. 这些文献的研究成果对于发现电力系统失稳现象,提高电网稳定性具有重要意义,但它们所涉及的均为传统电力系统. 而在智能电网中,为了实现新能源的灵活控制,提高供电可靠性和电能质量,普遍使用逆变器作为新能源与电网之间的接口,这使得传统电网的发电机模型与经逆变器并网的新能源模型在功频特性上有较大差异<sup>[7]</sup>. 因此,有关传统电网的混沌与稳定性研究在智能电网领域

收稿日期: 2015-03-20

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N130404008, N130104001); 国家电网公司科技项目(GWKJ2013-005); 国家自然科学基金资助项目(61433004, 61374124).

作者简介: 杨 珺(1976-),男,辽宁沈阳人,东北大学副教授.

已不适用,但关于这方面的研究还未见报道.

为了研究智能电网的失稳问题,本文首先对智能电网进行建模.在研究过程中,将逆变器作为新能源与主网络之间的接口,采用下垂控制理论<sup>[8-9]</sup>来表征逆变电源的功频特性,提出了一种含有新能源及逆变器的智能电网动态模型.对该模型进行仿真研究,结果表明,在不同的初始条件下,智能电网的运行轨迹呈现渐近稳定、周期运行、准周期运行、混沌和超混沌以及电压崩溃的演化过程.进而利用 Lyapunov 指数讨论智能电网运行状态随负荷无功功率变化所经历的从稳定走向分岔到发生混沌及超混沌,最终导致电压崩溃的整个过程,找出不同运行状态之间的内在联系.所得结果证明混沌、超混沌以及电压崩溃是智能电网失稳的一个中间环节,并提出了不同的运行状态下,预防智能电网失稳应采取的措施.

## 1 智能电网动态模型

新能源发电通常接入智能电网末端,影响负荷端的供电稳定性,使之较传统电网更易进入非稳定运行状态.下面将以传统电网<sup>[10]</sup>为基础,建立如图 1 所示的智能电网,并讨论一个稳定的智能配电系统经由 Hopf 分岔、倍周期分岔进入超混沌直至电压崩溃的全过程,并揭示不同运行状态的产生机理及其内在联系.

如图 1 所示,母线 1 连接主电网电源,母线 2 连接配电侧的新能源,所发出的电能经逆变器转换为交流电后并入电网.设母线 1,2 处的电压分别为  $E_0 \angle \delta_0$  和  $E_2 \angle \delta_2$ ,母线的电能经由 2 条阻抗分别为  $y_0 \angle \alpha_0$  和  $y_2 \angle \alpha_2$  的输电线路注入电压为  $u \angle \theta$  的母线 3,  $Z \angle \alpha$  为逆变器等效输出阻抗和线路阻抗之和.设逆变器电压为  $u_m \angle \varphi_m$ ,其中,  $\varphi_m$  为逆变器等效内电动势  $u$  与母线 2 电压  $E_2$  之间的夹角.

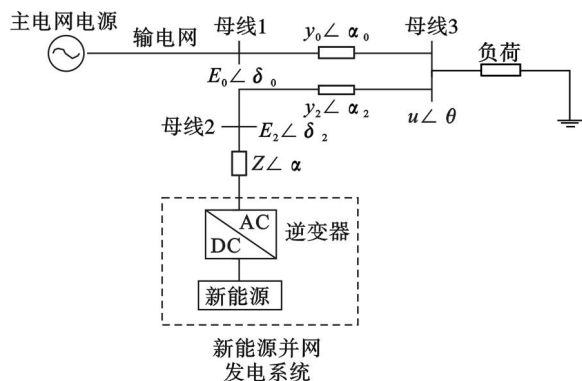


图 1 典型智能电网结构

Fig. 1 Typical smart grid structure

逆变器拟采用下垂控制策略,它的基本原理是模拟同步发电机组的外特性来实现负荷功率在逆变器间的均匀分配,目前该方法已被广泛应用到逆变器并网控制器中.由图 1 可得,逆变器输出的有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  分别为

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{u_m E_2}{Z} \cos(\alpha - \varphi_m) - \frac{E_2^2}{Z} \cos \alpha, \\ Q &= \frac{u_m E_2}{Z} \sin(\alpha - \varphi_m) - \frac{E_2^2}{Z} \sin \alpha. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

阻抗特性是设计下垂控制特性的主要因素,当等效输出阻抗和线路阻抗之和呈感性,即  $Z = jx$  时假设  $\varphi$  较小,那么式(1)可以简化为

$$\left. \begin{aligned} P &= -\frac{u_m E_2}{x} \varphi_m, \\ Q &= \frac{u_m E_2 - E_2^2}{x}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由式(2)可以看出,逆变器输出的有功功率主要取决于  $\varphi_m$ ,输出的无功功率主要取决于  $u_m$ .也就是说,逆变器输出的有功功率和无功功率分别与输出电压的相位和幅值近似呈线性关系.由此设计  $P - \omega_m$  和  $Q - u_m$  下垂特性,通过控制输出有功功率来调节输出频率,控制无功功率来调节输出电压.因此,其下垂控制调节关系为

$$\left. \begin{aligned} u_m &= u_m^* - k_{du} Q_m, \\ \omega_m &= \omega_m^* - k_{d\omega} P_m. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:  $u_m^*$  和  $\omega_m^*$  分别为逆变器的电压基准幅值和角频率基准值;  $P_m$  和  $Q_m$  分别为逆变器有功功率和无功功率的实际输出值与基准值之差;  $k_{du}$  和  $k_{d\omega}$  为对应的下垂控制系数.

由逆变器的下垂控制理论可知,典型智能电网可由等值发电机等效替代.设等值发电机角频率  $\omega$  为发电机实际角频率  $\omega_0$  与逆变器角频率  $\omega_m$  之差,即  $\omega = \omega_0 - \omega_m$ ,等值发电机采用二阶经典的模型,母线 2 处的电压  $E_2$  可由逆变器输出的电压  $u_m$  等效代替,由此可得智能电网的等值发电机模型为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\delta} &= \omega, \\ M\dot{\omega} &= T_m - D\omega + (u_m^* - k_{du} Q_m)^2 y_2 \sin \alpha_2 + \\ &u(u_m^* - k_{du} Q_m) y_2 \sin(\theta - \delta - \alpha_2). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中:  $\delta$  为等效发电机功角;  $T_m$  为等效发电机输入转矩;  $M, D$  为等效发电机惯量和阻尼系数.

母线 3 处的负荷采用动态模型:

$$\left. \begin{aligned} P_d &= P_0 + P_1 + k_{p\omega} \dot{\theta} + k_{pu}(u + T\dot{u}), \\ Q_d &= Q_0 + Q_1 + k_{q\omega} \dot{\theta} + k_{qu} u + k_{qu2} u^2. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中:  $k_{p\omega}, k_{pu}, k_{q\omega}, k_{qu}, k_{qu2}$  为对应负荷系数;  $P_0, Q_0$

分别代表感应电动机的恒定有功和无功功率; $P_1$ ,  $Q_1$  假设为恒定的  $P-Q$  负荷. 联立式(4)和式(5), 经过推导, 可以得到智能电网动态模型如下:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\delta} &= \omega, \\ M\dot{\omega} &= T_m - D\omega + \\ &u(u_m^* - k_{du}Q_m)y_2\sin(\theta - \delta - \alpha_2) + \\ &(u_m^* - k_{du}Q_m)^2y_2\sin\alpha_2, \\ k_{q\omega}\dot{\theta} &= -k_{qu}u - k_{qu2}u^2 + E_0uy_0\cos(\theta + \alpha_0) + \\ &(u_m^* - k_{du}Q_m)uy_2\cos(\theta - \delta - \alpha_2) - \\ &(y_0\cos\alpha_0 + y_2\cos\alpha_2)u^2 - Q_0 - Q_1, \\ T_mk_{q\omega}k_{pu}\dot{u} &= k_{p\omega}k_{qu2}u^2 + (k_{p\omega}k_{qu} - k_{q\omega}k_{pu})u + \\ &k_{p\omega}[Q_0 + Q_1 - E_0uy_0\cos(\theta + \alpha_0) - \\ &(u_m^* - k_{du}Q_m)uy_2\cos(\theta - \delta + \alpha_2) + \\ &(y_0\cos\alpha_0 + y_2\cos\alpha_2)u^2] - \\ &k_{q\omega}[P_0 + P_1 + E_0uy_0\sin(\theta + \alpha_0) + \\ &(u_m^* - k_{du}Q_m)uy_2\sin(\theta - \delta + \alpha_2) - \\ &(y_0\sin\alpha_0 + y_2\sin\alpha_2)u^2]. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

考虑智能电网的特性, 式(6)中的智能电网参数值由电力系统模型参数衍生得到. 其中,  $k_{q\omega} = -0.003$ ,  $k_{qu} = -2.8$ ,  $k_{qu2} = 2.1$ ,  $k_{qu} = 0.3$ ,  $k_{p\omega} = 0.4$ ,  $k_{du} = -0.8$ ,  $y_0 = 8$ ,  $y_2 = 5$ ,  $\alpha_0 = -12$ ,  $\alpha_2 = -5$ , 其余参数的标幺值  $T_m = 1$ ,  $D = 0.05$ ,  $M = 0.3$ ,  $T = 8.5$ ,  $E_0 = 2.5$ ,  $u_m^* = 0.52$ ,  $P_0 = 0.6$ ,  $P_1 = 0$ ,  $Q_m = 0.6$ ,  $Q_0 = 1.3$ ,  $y_2 = 5$ .

## 2 智能电网动态模型仿真

智能电网的失稳过程, 是一种从稳态走向分岔的过程. 从式(6)可以看到智能电网的数学描述较为冗长, 存在较强的非线性. 参数之间的相互作用所引起的状态响应的变化难以预测. 因此, 为

了研究智能电网受无功负荷影响所引起的运行状态变化, 将式(6)写成微分方程的形式, 即

$$\dot{\mathbf{x}} = F(\mathbf{x}, \mu). \quad (7)$$

其中: 状态变量  $\mathbf{x}^T = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T = (\delta, \omega, \theta, u)^T$ ; 控制量  $\mu = Q_1$ .

在不同  $\mathbf{x}$  和  $\mu$  的条件下对式(7)进行仿真, 可以得到一系列不同的运行状态. 随着  $(\mathbf{x}, \mu)$  初值的变化, 智能电网呈现渐近稳定、二周期振荡、准周期、混沌、四周期振荡、超混沌以及电压崩溃的运行状态. 各运行状态所对应的初始值  $(\mathbf{x}, \mu)$  及 Lyapunov 指数如表 1 所示. 各运行状态的  $u-t$  轨迹及  $u-\delta$  相图如图 2 所示.

## 3 智能电网运行状态分析

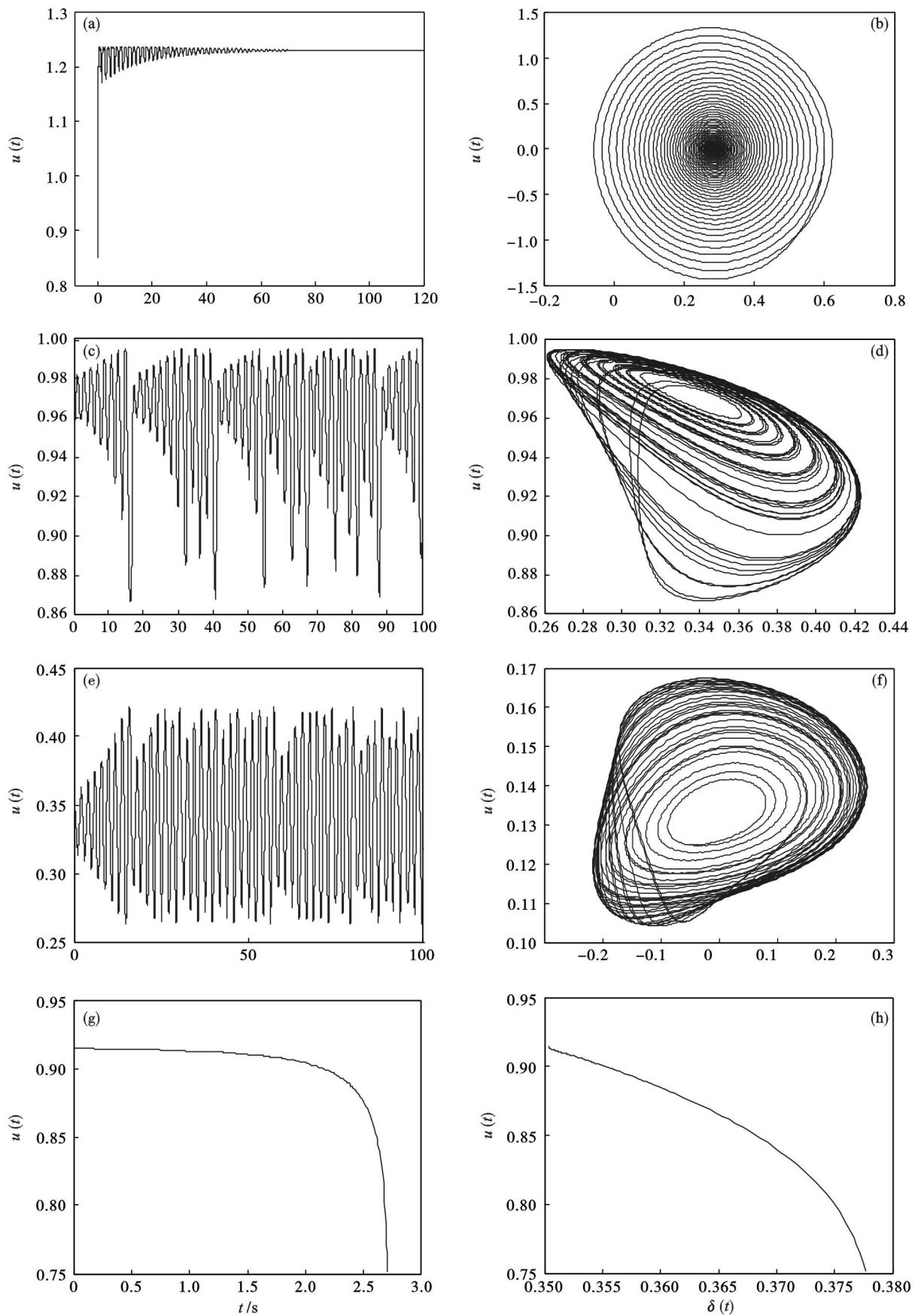
当智能电网处于渐近稳定运行状态时, 母线 3 处的电压经一段时间的减幅振荡后, 最终稳定在一个定值, 如图 2a, 2b 所示. 此时整个智能电网能够满足全部约束条件, 各电气设备都在规定范围内运行.

随着  $(\mathbf{x}, \mu)$  初值的变化, 母线 3 处的电压在 2 个值之间来回振荡, 随着极限环的出现, 智能电网发生了 Hopf 分岔. 由于新能源发电(如风力发电、光伏发电等)受自然条件影响很大, 所发电能难免会存在间歇性、波动性等特点. 这会导致智能电网中总的备用裕度减少、安全水平降低, 使智能电网进入警戒状态. 此时处于警戒状态的智能电网是欠安全的, 应及时采取预防措施, 使其恢复正常状态.

当  $(\mathbf{x}, \mu)$  初值进一步变化, 智能电网将进入准周期或四倍周期振荡状态. 这种情况的产生往往是由于逆变器中的晶闸管出现故障, 导致智能电网中某些新能源注入电网中的电压波形出现畸变, 或者由于小幅的电压波动没有得到适时合理

表 1 各运行状态对应的初始值及 Lyapunov 指数  
Table 1 The corresponding initial values and Lyapunov exponents of each operating status

运行状态	$(\mathbf{x}, \mu)$ 初值	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$
渐近稳定	(0.6, 0.02, 0.1, 0.85, 10)	-0.731 2	-2.407 2	-0.435 8	-20.496 1
二周期振荡	(0.298 5, 0, 0.201 1, 1.12, 10.945)	-0.203 6	0	-1.375 5	-14.053 6
准周期	(0.3, 0, 0.2, 1.05, 10.995)	-1.235 5	0	0	-16.003 8
混沌	(0.350 3, 0.001, 0.138 99, 0.915, 11.378)	0.977 4	-0.157 3	0	-10.157 3
四周期振荡	(0.350 3, 0.001, 0.138 99, 0.915, 11.387)	0	-3.822 7	-2.573 5	-12.668 7
超混沌	(0.350 3, 0.001, 0.138 99, 0.915, 11.392)	0.371 4	0.207 2	0	-6.525 1
电压崩溃	(0.350 3, 0.001, 0.138 99, 0.915, 11.41)	1.526 5	1.534 6	-0.173 8	-0.625 5

图 2 各运行状态的  $u-t$  轨迹及  $u-\delta$  相图Fig. 2 The corresponding  $u-t$  track and  $u-\delta$  phase diagram of each operating status

(a),(b)—渐近稳定;(c),(d)—混沌;(e),(f)—超混沌;(g),(h)—电压崩溃.



的解决,导致更加剧烈的电压振荡所造成.如不及时对其采取有效的控制措施,将会导致发电机跳闸、新能源断网或甩掉大量负荷,使有功平衡、无功平衡的等式约束条件遭到严重破坏.

混沌及超混沌的产生是由于逆变器在将直流变换成交流时会产生许多频率不同的谐波,当某一频率的谐波恰好使得电容和电感的电抗互为相反数时,其所在支路会发生串联或并联谐振,导致电气参数瞬时值发生大幅波动.此时智能电网已不能维持稳定,必须采取防止事故进一步扩大的紧急控制措施,如有计划的解列等以避免电压崩溃的发生.

智能电网在给定运行点遭受干扰后,该点的电压低于可接受的极限值,这种现象称为电压崩溃.事实上,由于新能源在并网后需要吸收一定的无功功率,导致智能电网中的无功裕度大幅减小.当负荷无功需求突然增加时,由无功-电压静态特性可知,电压会由于无功的不足而迅速跌落.

因此,为了防止供电事故的发生,必须在临界失稳点之前对其进行及时有效的控制.针对本文提出的智能电网模型,应在 Hopf 分岔发生之前采取相应的措施以提高智能电网稳定性.

## 4 结 论

本文采用逆变器的下垂控制策略以及动态负荷模型建立了智能电网动态模型.通过数值仿真和 Lyapunov 指数分析系统,初始条件对智能电网运行状态的影响证明,混沌、超混沌及电压崩溃是智能电网失稳的一个中间环节.不同运行状态取决于发电机功角、负荷端母线相角及负荷无功功率所处的不同运行域.同时给出了引起智能电网运行状态变化的原因,这为增强智能电网稳定性提供了理论依据.

### 参考文献:

[1] 闵富红,马美玲,翟炜,等.基于继电特性函数的互联电力

系统混沌控制[J].物理学报,2014,63(5):70-77.

(Min Fu-hong, Ma Mei-ling, Zhai Wei, et al. Chaotic control of the interconnected power system based on the relay characteristic function [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(5):70-77.)

[2] Zhao H, Ma Y J, Liu S J. Controlling chaos in power system based on finite-time stability theory [J]. *Chinese Physics B*, 2011, 20(12):105-112.

[3] 杨珺,孙秋野,杨东升.基于多项式模型的混沌系统平方和算法脉冲控制[J].物理学报,2012,61(20):159-163.

(Yang Jun, Sun Qiu-ye, Yang Dong-sheng. Sum-of-square-based impulsive control for chaotic system based on polynomial model [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(20):159-163.)

[4] Wu B, Liu Y, Lu J Q. Impulsive control of chaotic systems and its applications in synchronization [J]. *Chinese Physics B*, 2011, 20(5):188-194.

[5] Wei D Q, Luo X S, Qin Y H. Studying chaos in power system under load perturbation and bounded noise [C]// 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering. Wuhan: IEEE Conference Publications, 2010: 2185-2188.

[6] Qin Y H, Luo X S, Wei D Q. Random-phase-induced chaos in power systems [J]. *Chinese Physics B*, 2010, 19(5):145-149.

[7] Anderson P M, Fouad A A. Power system control and stability [M]. Piscataway, New Jersey: IEEE Press, 2012: 45-50.

[8] Lee C T, Chu C C, Chen P T. A new droop control method for the autonomous operation of distributed energy resource interface converters [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(4):1980-1992.

[9] Bottrell N, Prodanovic M, Timothy C G. Dynamic stability of a microgrid with an active load [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(11):5107-5119.

[10] Ginarsa I M, Soeprijanto A, Purnomo M H. Controlling chaos and voltage collapse using an ANFIS-based composite controller-static var compensator in power systems [J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2013, 46:79-88.