



第五届全国网络科学论坛报告

随机噪声扰动下电力系统、电力网络的响应分析

韦 笃 取 罗 晓 曙

广西师范大学电子工程学院

华南理工大学电力学院

2009/12/22



报告内容

- 一、研究背景与研究内容
- 二、噪声诱导电力系统混沌振荡运动
- 三、随机噪声扰动下复杂电力网络响应分析
- 四、总结



研究背景与研究内容

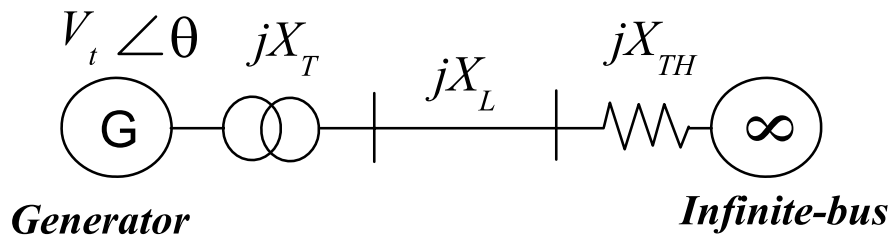
- 电力系统、电力网络的稳定运行是当今国民经济发展中需要解决的重大问题。近几十年来，国内外一些大电网相继发生电压、频率振荡失稳甚至崩溃的事故，这些事故给国民经济和人们的生活造成了巨大损失和严重危害
- 已有的研究表明,电力系统振荡失稳原因中除了低频振荡外，还存在混沌振荡，其外在表现为非周期、无规则、突发性或阵发性的病态机电振荡。
- 因此研究电力系统与电力网络的复杂非线性动力学行为对保证其稳定运行具有极其重要的理论探索价值和应用参考价值。目前对电力系统与电力网络非线性动力学的研究主要集中在研究其确定性分岔和混沌行为。然而，现实中受到随机噪声干扰是不可避免的，考虑随机噪声对电力系统与电力网络特性的影响更为本质和真实
- 本工作研究电力系统、电力网络在噪声作用下的非线性动力学行为，发现稳定运行的电力系统在噪声作用下转化为混沌振荡运动，电力网络在噪声作用下由稳定运行转化为混沌振荡运动，最后引发电压崩溃引发电压崩溃，



噪声诱导电力系统混沌振荡运动

1. 电力系统结构图以及数学模型

➤ 单机电力系统结构图



➤ 数学模型

$$M\ddot{\theta} + D\dot{\theta} + P_{max} \sin \theta = P_m$$

$$\rightarrow \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -cx_2 - \beta \sin x_1 + f \sin \omega t \end{cases}$$

θ 为发电机转过的角度

M, D 分别表示发电机转动惯量和系统阻尼

其中

$$x_1 = \theta, x_2 = \dot{\theta}, c = D / M, \beta = P_{max} / M, f = A / M$$

P_m 为发电机的功率并且有

$$P_m = A \sin \omega t$$



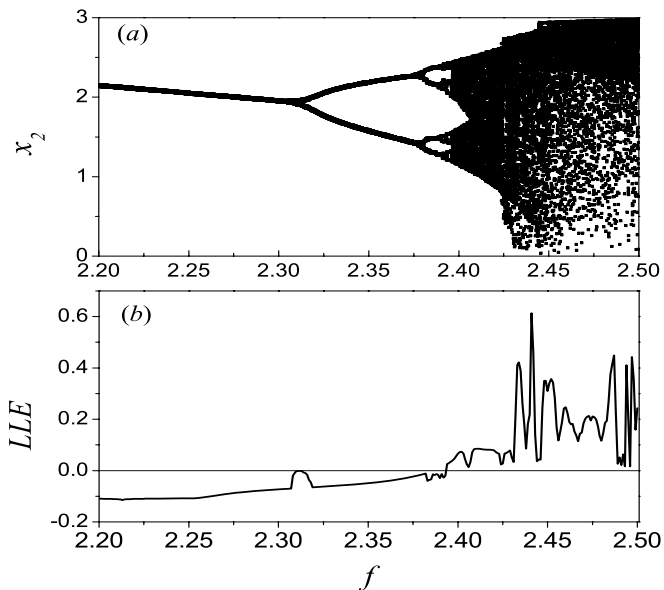
噪声诱导电力系统混沌振荡运动

2. 考虑有噪声作用的电力系统数学模型:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -cx_2 - \beta \sin x_1 + f \sin \omega t + \sigma \xi(t) \end{cases} \quad (3)$$

σ 是高斯白噪声 $\xi(t)$ 的强度

3. 没有噪声作用电力系统非线性动力学:

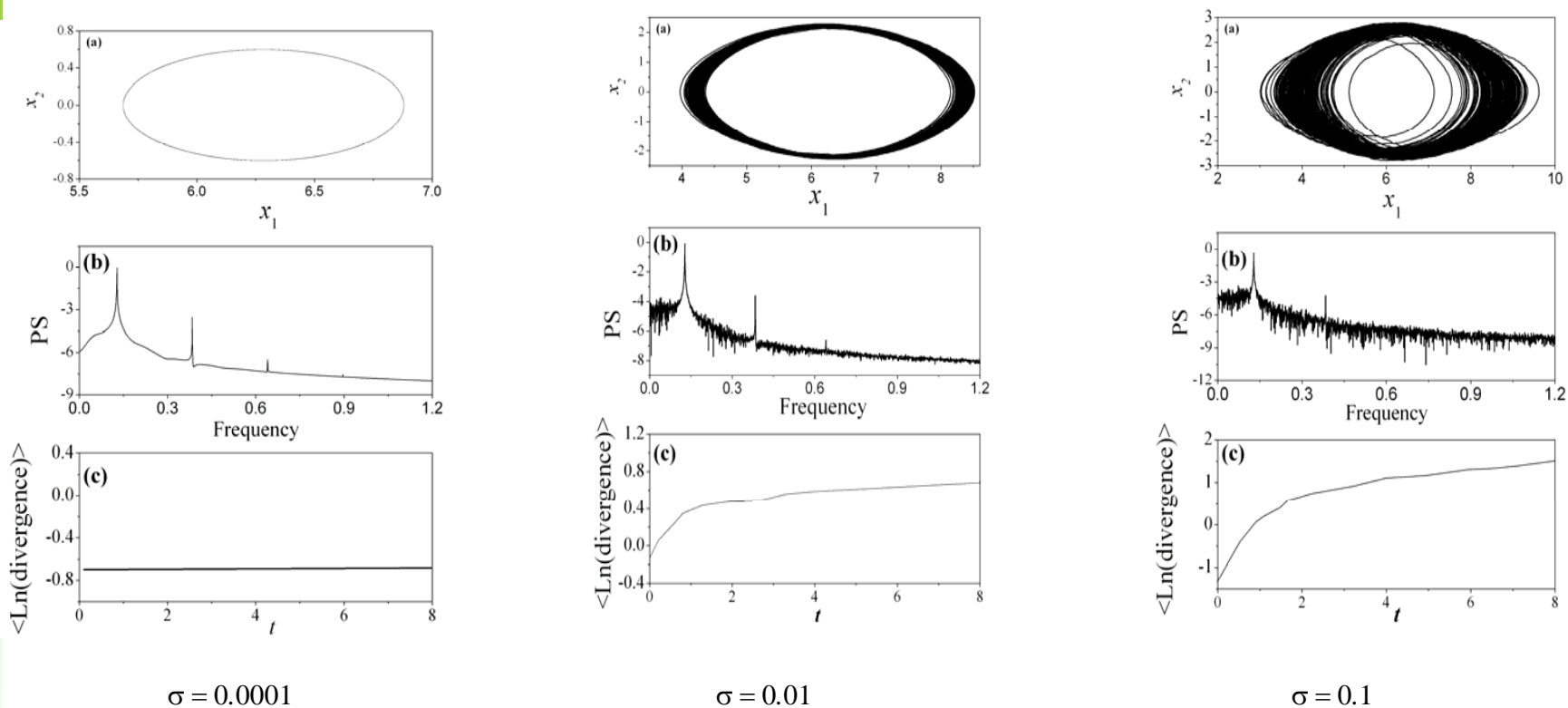


本文中,为了研究随机噪声对单机电力系统稳定性的影响,我们取系统参数 $f=2.2$ 使系统初始状态为稳定的周期-1运动



噪声诱导电力系统混沌振荡运动

4. 主要数值结果 (相图, 功率谱, Lyapunov指数谱)





随机噪声诱导电力系统混沌的可能物理机制

5. 利用Melnikov 方法解释随机噪声诱导电力系统混沌的可能物理机制

- **Melnikov**函数用来近似度量系统的稳定流形和不稳定流形之间的距离，它能给出两流形间的最小距离。如果**Melnikov**函数存在简单零点，则其稳定流形和不稳定流形横截相交，一旦相交就有无数次相交，吸引子的相空间将发生形变，不停的伸缩与折迭，系统可能出现**Smale**马蹄意义下的混沌。所以可以通过求出**Melnikov**函数简单零点来确定系统失稳时系统参数的阈值
- 首先,引入一个小参数 $0 < \varepsilon \ll 1$ 使得 $c = \varepsilon c_1, f = \varepsilon f_1, \sigma = \varepsilon \sigma_1$ 使得(3)式变成

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\beta \sin x_1 + \varepsilon(-c_1 x_2 + f_1 \sin \omega t + \sigma_1 \xi(t)), \end{cases} \quad (4)$$

- 当 $\varepsilon = 0$ (4) 式退化为Hamiltonian系统
$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = -\beta \sin x_1 \end{cases} \quad (5)$$



随机噪声诱导电力系统混沌的可能物理机制

- 且其Hamiltonian方程为

$$H(x, y) = x_2^2 / 2 + (1 - \cos x_1) \quad (6)$$

- 计算可得系统 (6) 异宿轨道异宿轨参数方程为

$$\begin{cases} x_{10}(t) = \pm 2 \arcsin(\text{th}(\sqrt{\beta}t)) \\ x_{20}(t) = \pm 2 \text{sec h}(\sqrt{\beta}t) \end{cases} \quad (7)$$

- 下面通过随机Melnikov过程方法分析电力系统产生混沌的必要条件。

系统 (4) 随机Melnikov方程如下：

$$\begin{aligned} M(t_0) &= \int_{-\infty}^{+\infty} [-c_1 x_{20}(t) + f_1 \sin \omega(t + t_0) + \sigma_1 \xi(t + t_0)] x_{20}(t) dt \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} [-c_1 x_{20}^2(t) + f_1 \sin \omega(t + t_0) x_{20}(t)] dt + \int_{-\infty}^{+\infty} [\sigma_1 \xi(t + t_0) x_{20}] dt \\ &= M + \bar{M}(t_0) \end{aligned} \quad (8)$$



随机噪声诱导电力系统混沌的可能物理机制

- 通过求出Melnikov函数简单零点来确定系统失稳时系统参数的阈值.

对 (8) 式积分,从能量学理论知, 系统 (5) 进入混沌的判据为

$$\sigma^2 \frac{16\pi\sqrt{\beta}}{\beta} S_0 + (2f \frac{\pi_1}{\sqrt{\beta}} \operatorname{sech}(\frac{\omega\pi}{2\sqrt{\beta}}))^2 > (\frac{8c}{\sqrt{\beta}})^2 \quad (9)$$

对于 $\sigma = 0$ (9) 变成

$$f \geq \frac{4c}{\pi \operatorname{sech}(\frac{\omega\pi}{2\sqrt{\beta}})}$$

系统出现混沌阈值是

$$f_1^* = \frac{4c}{\pi \operatorname{sech}(\frac{\omega\pi}{2\sqrt{\beta}})}$$

对于 $\sigma \neq 0$ 不等式 (9) 变成

$$f \geq \frac{\sqrt{(4c)^2 - \sigma^2 4\pi\sqrt{\beta}S_0}}{\pi \operatorname{sech}(\frac{\omega\pi}{2\sqrt{\beta}})}$$

系统出现混沌阈值是

$$f_2^* = \frac{\sqrt{(4c)^2 - \sigma^2 4\pi\sqrt{\beta}S_0}}{\pi \operatorname{sech}(\frac{\omega\pi}{2\sqrt{\beta}})}$$

- 很显然 $f_1^* > f_2^*$ 表明在噪声作用下, 电力系统出现混沌振荡阈值减少, 即噪声使电力系统更易于产生混沌运动



二. 随机噪声扰动下复杂电力网络响应分析

1. 外噪声作用下的电力网络模型如下

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = 2\pi f_0 \omega_i \\ M \dot{\omega}_i = -d \omega_i + P_T - \frac{E'}{x'_d + x} \sin \delta_i \\ T'_{d0} \dot{E}'_i = -\frac{x_d + x}{x'_d + x} E'_i + \frac{x_d - x'_d}{x'_d + x} \cos \delta_i + E_{fd_i} + D \xi_i(t) \\ T_A \dot{E}_{fd_i} = -K_A \left(\frac{C}{N} \sum_{j=1}^N a_{ij} (V_i - V_j) - V_{ref} \right) - (E_{fd_i} - E_{fd0}) \end{cases}$$

δ, ω, E' 分别表示发电机转子相对角度、相对角速度和发电机定子侧暂态电势

励磁限制器的输出 E_{fd} 严格限制在 $E_{fd_{\min}}$ 和 $E_{fd_{\max}}$ 之间

V 表示发电机端电压，它由下式描述：

$$V = \frac{1}{x + x'_d} \sqrt{[(x'_d + x E' \cos \delta)^2 + (x E' \sin \delta)^2]}$$



电力网络模型

这里, $i = 1, \dots, N$, 表示发电机的个数, 其中 $\xi_i(t)$ 是满足均值为零且 $\langle \xi_i(t) \xi_j(s) \rangle = D \delta_{ij} \delta(t-s)$ 的高

斯白噪声^[1], D 为功率, 表示噪声的强度. $\frac{C}{N} \sum_{j=1}^N a_{ij} (V_i - V_j)$ 为电力网络中的耦合项, C 是耦合强度,

采用 NW 型小世界网

矩阵 a_{ij} 定义连接拓扑: 如果神经元 i 和 j 之间有连接, 则

$a_{ij} = a_{ji} = 1$; 否则 $a_{ij} = a_{ji} = 0$, 对所有的 i 有 $a_{ii} = 0$; 网络耦合模型的

构造简述如下: 从最近邻网开始 (每个节点有 6 个近邻),

然后随机地在两个不相连的节点之间添加一条长程连接边

(即一条捷径), $p = 0$ 时是最近邻网, $p = 1$ 时是全局耦合网



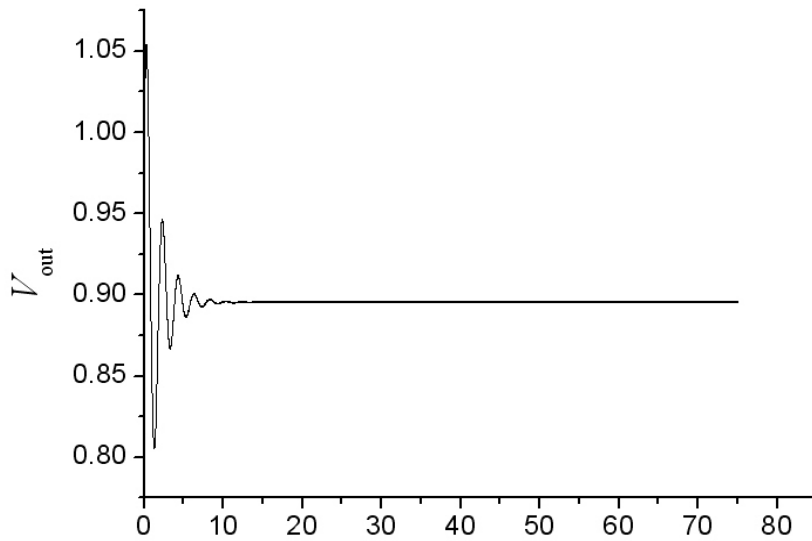
电力网络模型

考虑励磁限制的电力系统参数的符号含义及其在本章数值仿真中的取值

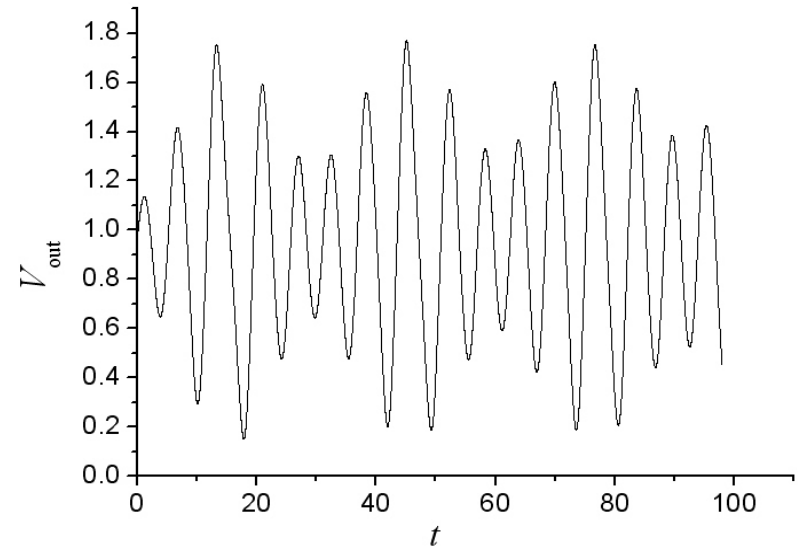
符号 值	参数含义	数值	符号	参数含义	数值
M	发电机转动惯量	10	$E_{fd_{max}}$	励磁控制器输出上限	5
f_0	系统电压频率	60	x	输电线路电抗	0.5
T'_{d0}	发电机 d 轴励磁绕组时间常数	10	V_{ref}	励磁控制器参考电压	1.05
x_d	发电机 d 轴同步电抗	1	E_{fd0}	限制器输入参考电压	2
x'_d	发电机 d 轴瞬变电抗	0.4	T_A	励磁控制器时间常数	1
$E_{fd_{min}}$	励磁控制器输出下限	0	K_A	励磁控制器增益	190



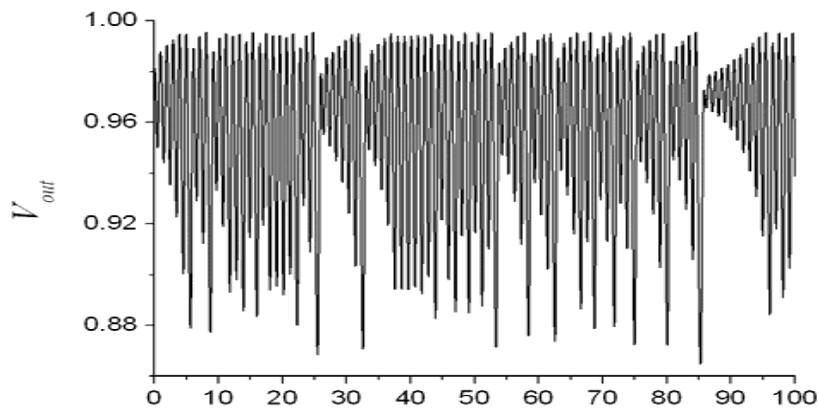
仿真结果



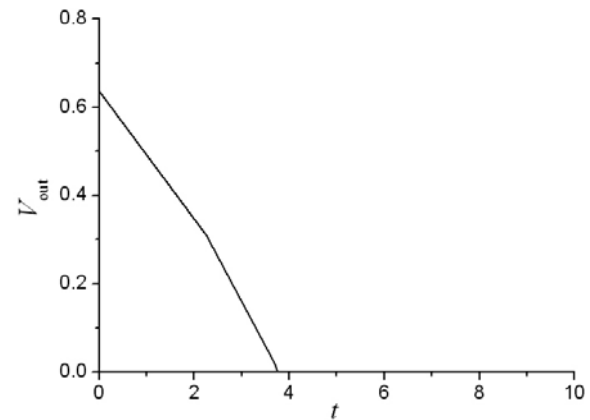
$D=0$



$D=0.05$



$D=0.3$



$D=1.0$ 时电压崩溃



小 结

本工作研究确定性电力系统、电力网络在噪声作用下的非线性动力学行为，发现稳定运行的电力系统在噪声作用下转化为混沌振荡运动，电力网络在噪声作用下由稳定运行转化为混沌振荡运动，最后引发电压崩溃引发电压崩溃



第五届全国网络科学论坛

谢 谢 ！