

# 基于多尺度熵的电力能量流复杂性分析\*

苟竞<sup>1)†</sup> 刘俊勇<sup>1)</sup> 魏震波<sup>1)‡</sup> Gareth Taylor<sup>2)</sup> 刘友波<sup>1)</sup>

1)(四川大学电气信息学院, 成都 610065)

2)(布鲁内尔大学电力系统研究所, 伦敦 UB8 3PH, 英国)

(2014年4月21日收到; 2014年6月16日收到修改稿)

电力能量流复杂性主要体现于其动态行为的实时性、非线性及不确定性等, 网络动力学行为分析是关键. 本文在电力系统动力学平衡方程基础上, 构建了系统势能与支路势能函数模型; 通过提取扰动(或故障)后系统的能量信息, 利用多尺度熵对扰动(或故障)后系统能量流演化过程进行了研究. 结果表明: 1) 稳定运行状态下系统复杂度较低, 且随着故障持续时间的增加, 系统故障后呈现出更高的复杂度; 2) 不稳定运行状态下, 系统在小尺度时间上表现出更强的不确定性, 而在大尺度时间上表现出相对更明显的规则性; 3) 临界稳定运行状态与临界不稳定运行状态下, 故障后的系统复杂度在不同时间尺度上呈现出较明显的差异, 这对动态过程中临界点的识别有着积极的参考价值. 本文研究揭示了电力能量流在物理动态过程中的演化机制, 为电力系统动力学行为分析提供了新思路与新方法.

**关键词:** 电力能量流, 网络动力学, 多尺度熵, 复杂性分析

**PACS:** 84.70.+p, 88.80.H-, 05.45.-a

**DOI:** 10.7498/aps.63.208402

## 1 引言

作为由大规模动态元件构成的复杂动力学系统——电力系统具有非线性、时变性、脆弱性<sup>[1]</sup>、自组织临界性<sup>[2]</sup>等复杂系统的典型特征. 当电力系统遭受扰动或发生故障时, 事故的扩散往往伴随着潮流转移、功率振荡、电压波动等诸多复杂现象, 系统的外在运行风险与内在结构短板为条件相依的事故扩散提供了传播载体. 目前, 分析上述动态过程的方法主要有两类: 一类是简化等效的数学理论模型与时域仿真方法<sup>[3]</sup>, 从确定性角度对系统故障后的动力学行为进行模拟分析; 另一类是基于复杂网络理论<sup>[4,5]</sup>的系统脆弱性研究, 从网络结构特性分析了系统演化特征. 由于分析角度的局限性, 上述两种方法并不能较全面地揭示电力系统中的复杂动力学特性. 如何从故障后系统的能量信号中提

取与故障传播密切相关的特征量并分析其复杂度, 是进一步认识电力系统故障后的动力学特性及辨识故障失稳模式的关键所在.

另一方面, 从非线性动力学角度研究电力能量流的复杂度, 它反映了电力系统运行状态的相关特征, 其变化预示着系统状态的改变, 因此通过复杂度的变化可以揭示故障在系统中的扩散方式. 而作为系统复杂性和规则性的一种测度, “熵”及各种演化熵算法在生理、医学、交通等领域得到了广泛应用. 庄建军等<sup>[6]</sup>利用两种非线性复杂度测度——近似熵(approximate entropy, ApEn)<sup>[7,8]</sup>和样本熵(sample entropy, SampEn)<sup>[9,10]</sup>, 比较了专业射击运动员在休息和练习赛两种不同状态下心率变异性信号的复杂度, 同时证明样本熵比近似熵更适用于复杂信号分析. 2002年, Costa等<sup>[11,12]</sup>基于样本熵提出多尺度熵(multi-scale entropy, MSE)的概念, 通过心率变异性(heart rate variability, HRV)

\* 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(批准号: 51261130472)和国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 51207098)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: scu\_goujing@163.com

‡ 通讯作者. E-mail: weizhenbo@scu.edu.cn

研究发现多尺度熵比样本熵能更好地解释心房颤动 (atrial fibrillation, AF) 和充血性心力衰竭 (congestive heart failure, CHF) 两种疾病与健康状态之间的差别. 在此基础上, Wang 和 Ma 等<sup>[13]</sup>通过多尺度熵分析心电图的复杂特性有助于心脏疾病的早期诊断. 何亮等<sup>[14]</sup>用多尺度熵方法研究了金属铝互连中的电迁移不同阶段的复杂特性. 而向郑涛等<sup>[15]</sup>利用多尺度熵方法来分析交通流演化的复杂性, 三种不同交通流下复杂性的定量度量有助于理解交通系统的内在演化规律. 可见, 多尺度熵可以在不同时间尺度下分析系统中信息序列的复杂度, 从而表征系统在不同状态下的复杂特性.

综上, 本文在电力系统动力学模型基础上, 建立系统与支路的能量函数模型; 通过提取扰动(故障)后系统的能量信息, 利用多尺度熵分析系统不同运行状态下能量流的复杂性. 进而揭示电力能量流在物理动态过程中的演化机制, 为电力系统动力学行为研究提供新的思路和方法.

## 2 能量函数模型

### 2.1 系统动力学方程

设某电力网络含有  $n_G$  个发电机节点、 $n_B$  个母线节点和  $l$  条输电线路, 当发电机采用经典模型、负荷采用恒阻抗模型时, 计入发电机暂态电抗后增广网络的含有  $n = n_G + n_B$  个节点和  $L = n_G + l$  条支路, 惯性中心坐标系 (center of inertia, COI) 下的系统动态方程<sup>[16]</sup>为

$$\begin{cases} M_i \frac{d\omega_i}{dt} = P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI}, \\ \frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i, \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $M_i$  为发电机  $i$  惯性系数;  $\omega, \delta$  表示相对于惯性中心的转速与转角;  $P_{mi}, P_{ei}, P_{COI}$  为分别机械功率 (极短时间内视为衡量)、电磁功率和惯性中心加速功率, 其分别满足:

$$P_{ei} = E_i^2 G_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n (E_i E_j B_{ij} \sin \delta_{ij} + E_i E_j G_{ij} \cos \delta_{ij}), \quad (2)$$

$$M_T = \sum_{i=1}^{n_G} M_i, \quad (3)$$

$$P_{COI} = \sum_{i=1}^{n_G} (P_{mi} - P_{ei}), \quad (4)$$

其中,  $E$  为发电机恒定内电势;  $G_{ij}, B_{ij}$  分别为收缩到发电机内节点的网络电导与电纳.

### 2.2 能量函数

当电力系统遭受扰动(故障)时, 系统中机械功率与电磁功率不再保持平衡, 不平衡功率的出现导致发电机转子速度变化, 系统中产生扰动能量, 该暂态能量由扰动(故障)激发, 并在故障阶段形成, 包括发电机转子动能与由位置势能、磁能、耗散能量构成的网络势能. 扰动(故障)发生时, 系统的暂态动能和势能增加. 扰动或故障清除后, 转子动能开始减少并不断转化为网络势能, 而势能持续增加. 若故障持续时间较短, 系统能吸收剩余动能, 则系统可以过渡到新的稳定运行状态; 相反, 若故障持续时间较长, 系统不能吸收剩余动能, 则系统会失去稳定<sup>[17,18]</sup>. 因此, 两种暂态能量的交织变化及系统阻尼作用构成了一个复杂的能量转化、消耗过程.

根据多机系统李雅普诺夫能量函数<sup>[19]</sup>, 选取惯性中心参考坐标下的多机暂态能量模型:

$$\begin{aligned} V &= V_K + V_P \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i \omega_i^2 + \sum_{i=1}^n \int_{\delta_{si}}^{\delta_i} -(P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI}) d\delta_i, \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $V_K = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i \omega_i^2$  为系统总动能,

$$V_P = \sum_{i=1}^n \int_{\delta_{si}}^{\delta_i} -(P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI}) d\delta_i$$

为系统暂态势能;  $\delta_s$  为故障清除后稳定平衡点相对于惯性中心的转角.

基于李雅普诺夫稳定的能量函数将系统对动能的吸收情况, 即动能与势能的转换态势作为系统暂态稳定判别的依据, 并衍生出不同的能量函数处理方法<sup>[20,21]</sup>. 若设线路  $l$  两端节点  $i, j$  的电压相角差为  $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ , 则故障清除后线路两端的暂态势能可表示为

$$V_P(\theta_{ij}) = \int_{\theta_{i,j,s}}^{\theta_{ij}} [P_{ij}(u) - P_{i,j,s}] du, \quad (6)$$

式中,  $P_{ij}(u)$  输电线路  $l$  的有功潮流,  $P_{i,j,s}, \theta_{i,j,s}$  分别为线路  $k$  故障后稳定平衡点的有功潮流与相角差.

因此, 在忽略阻尼的多机系统结构保留型李亚普诺夫能量函数模型下, 故障清除后全系统的势能

可以用每条支路分担的势能之和表示为

$$V_P = \sum_{l=1}^L \int_{\theta_{ij,s}}^{\theta_{ij}} [P_{ij}(u) - P_{ij,s}] du, \quad (7)$$

式中,  $L$  为系统结构保持型增广网络中支路总数.

利用上述故障切除后系统势能与网络支路势能信息, 可进一步通过各支路势能的首次极大、极小值, 建立支路势能综合指标, 对系统中的临界集群和失稳模式进行辨识<sup>[22]</sup>. 然而这样的分析只能从确定性的角度分析了故障后系统的能量大小, 并不能反映故障后系统整体能量的演化具体过程, 因此还需要从宏观角度分析故障后系统内部能量流变化的复杂性.

### 3 多尺度熵

#### 3.1 样本熵

多尺度熵用于描述时间序列在多个时间尺度上的复杂性, 它的基础是样本熵, 而样本熵则是在近似熵的基础上对自身数据统计误差的改进. 对一个长度为  $N$  的原始时间序列  $\mathbf{X} = \{u(i), u(i+1), \dots, u(N)\}$ , 对其进行重组构造  $m$  维矢量:

$$\mathbf{X}^m(i) = \{u(i), u(i+1), \dots, u(i+m-1)\} \\ (i = 1, 2, \dots, N-m+1). \quad (8)$$

对每一个标量  $i$ , 计算矢量  $\mathbf{X}(i)$  与所有  $\mathbf{X}(j)$  ( $j = 1, 2, \dots, N-m+1$ ) 矢量之间的距离

$$d[\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(j)] \\ = \max_{k=0-m-1} |u(i+k) - u(j+k)|. \quad (9)$$

设容限  $r > 0$ , 统计  $d[\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(j)] < r$  的数目与总矢量数目  $N-m+1$  之间的比值

$$C_i^m(r) = \frac{1}{N-m+1} \text{num}\{d[\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(j)] < r\} \\ (j = 1, 2, \dots, N-m+1). \quad (10)$$

对  $C_i^m(r)$  取对数再求和, 然后求其对所有  $i$  的平均值  $\phi^m(r)$ :

$$\phi^m(r) = \frac{1}{N-m+1} \sum_{i=1}^{N-m+1} \ln C_i^m(r). \quad (11)$$

将矢量的所有维数增加 1 变为  $m+1$ , 重复上述过程计算  $\phi^{m+1}(r)$ , 则此原始时间序列的近似熵可表示为

$$\text{ApEn}(m, r) = \lim_{N \rightarrow \infty} [\phi^m(r) - \phi^{m+1}(r)]. \quad (12)$$

实际计算中, 时间序列长度不可能为无限, 因此对有限序列  $N$ , 常采用以下公式来计算近似熵的估计值:

$$\text{ApEn}(m, r, N) = \phi^m(r) - \phi^{m+1}(r). \quad (13)$$

由于近似熵在计算  $C_i^m(r)$  时计及了与自身信息的比较, 会带来一定误差. 为降低此类误差对最终结果的影响, 在样本熵中, 统计  $d[\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(j)] < r$  的数目与总矢量数目的比值时去除与自身信息的比较:

$$B_i^m(r) = \frac{1}{N-m} \text{num}\{d[\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(j)] < r\} \\ (j = 1, 2, \dots, N-m+1, j \neq i). \quad (14)$$

计算  $\Phi^m(r)$ ,

$$\Phi^m(r) = \frac{1}{N-m+1} \sum_{i=1}^{N-m+1} B_i^m(r), \quad (15)$$

将维数增加 1 变为  $m+1$ , 重复上述过程计算  $\Phi^{m+1}(r)$ , 则此原始时间序列的样本熵可表示为

$$\text{SampEn}(m, r) \\ = \lim_{N \rightarrow \infty} \{-\ln[\Phi^{m+1}(r)/\Phi^m(r)]\}. \quad (16)$$

实际计算时, 也常采用下面近似值:

$$\text{SampEn}(m, r, N) = -\ln[\Phi^{m+1}(r)/\Phi^m(r)]. \quad (17)$$

通过以上改进, 在不同维数与容限参数下, 样本熵比近似熵表现出更好的一致性. 即若  $\text{SampEnA}(m_1, r_1) > \text{SampEnB}(m_1, r_1)$ , 则  $\text{SampEnA}(m_2, r_2) > \text{SampEnB}(m_2, r_2)$ , 也就是说序列  $A$  在一对参数  $m, r$  下表现出比序列  $B$  更高的复杂性, 那么在其他参数对时也会表现出相同特性.

#### 3.2 多尺度熵

多尺度熵 (MSE) 首先将原始时间序列作粗粒化变换, 设尺度变换因子为  $\tau$ , 则原始时间序列粗粒化后为

$$y_j^\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{i=(j-1)\tau+1}^{j\tau} u(i) \quad (1 \leq j \leq N/\tau), \quad (18)$$

其中, 新时间序列长度为  $N/\tau$ . 当尺度因子为 1 时, 即为原始时间序列; 当尺度因子不为 1 时, 粗粒化为新的时间序列  $y_j^\tau$ . 对于粗粒化后的时间序列, 计算相应的样本熵  $\text{SampEn}(m, r, N)$ , 由此得到原始时间序列在各个时间尺度下的样本熵值. 需要说明

的是, 多尺度熵并不是分别计算粗粒化后新时间序列的样本熵, 其容限  $r$  取值一般与原始时间序列的标准差相关(一般取  $r = 0.1-0.25SD$ ,  $SD$  为原始时间序列标准差), 因此反映的是原始时间序列在不同时间尺度上的复杂度. 此外对于对参数  $m$ , 研究表明当取维数  $m = 2$  时<sup>[7,15]</sup>, 计算结果的准确性对序列长度  $N$  的依赖性最小.

因此, 多尺度熵可以比较不同时间序列的复杂度: 若某时间序列的样本熵值随着尺度的增大而单调减小, 则表明该时间序列的复杂度随着尺度的增加而降低; 如果一个时间序列的样本熵值在绝大多数尺度上高于另一个时间序列, 则其复杂度较高.

那么, 通过提取不同扰动或故障模式下的支路与系统能量信息样本, 分析不同时间尺度上的系统能量流变化复杂度, 刻画系统动态过程即机组失步过程(稳定  $\rightarrow$  临界稳定  $\rightarrow$  临界不稳定  $\rightarrow$  不稳定), 以揭示电力系统可能的动态演化过程.

### 4 算例分析

以 IEEE 标准测试系统——New England 10 机 39 节点系统<sup>[19]</sup> 作为仿真算例, 系统拓扑结构如图 1 所示.

发电机采用经典模型, 忽略原动机、调速器及励磁系统, 负荷采用恒定阻抗模型. 设置系统扰动

为线路 4\*—14 (“\*”表示故障近端) 母线三相短路故障, 故障清除时间分别为: 0.10, 0.15, 0.21, 0.22, 0.25 和 0.30 s. 经时域仿真后观察系统发电机功角特性曲线, 前 2 组为故障后系统稳定运行状态, 中间 2 组为故障后系统临界稳定与临界不稳定运行状态, 后 2 组为故障后系统不稳定运行状态. 根据李雅普诺夫稳定理论, 以组成网络重要割集线路 8—9<sup>[21,23]</sup> 为观察对象, 其线路两端的相角差  $\theta$  相对于角速度  $\omega$  的变化曲线如图 2 所示.

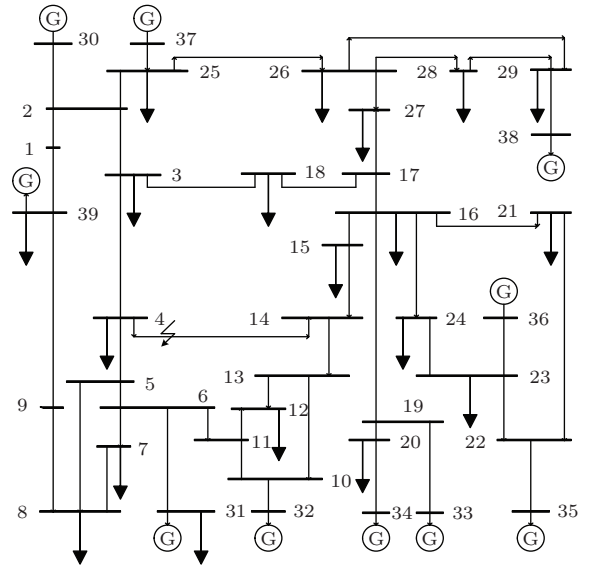


图 1 New England 10 机 39 节点系统

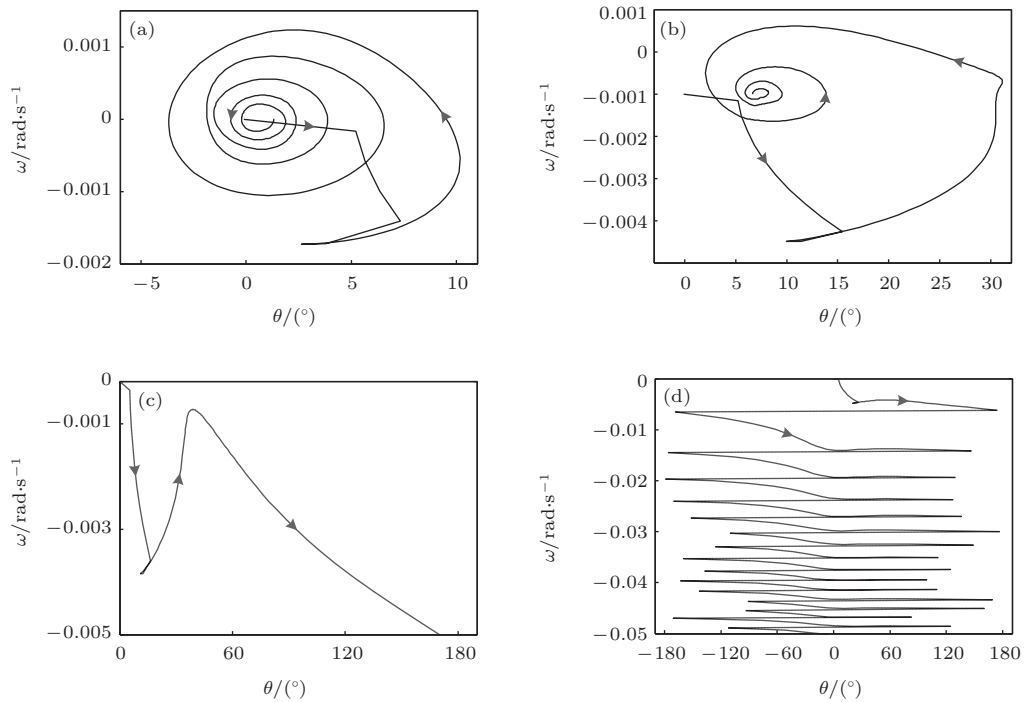


图 2 支路 4—14 故障后支路 8—9 变化轨迹 (a) 稳定状态; (b) 临界稳定状态; (c) 临界不稳定状态; (d) 不稳定状态



从图2可以看出,当故障后系统处于稳定运行状态时(如图2(a)所示),网络中支路8—9两端相角差 $\theta$ 和角速度 $\omega$ 在一个有界的范围内收缩到系统稳定运行平衡点;当故障后系统处于不稳定运行状态时,支路8—9两端相角差 $\theta$ 和角速度 $\omega$ 不断增大且趋于无界(如图2(d)所示,其中由于计算时将相角差限制于 $\pm 180^\circ$ 之间,因此在 $\pm 180^\circ$ 时表现为折转突变);在系统处于临界稳定或临界不稳定状态时,两者的相关特征量与稳定状态或不稳定状态并不能被快速明显区分,如临界稳定状态与稳定状态均为有界收缩到新平衡点(如图2(a)与(b)),临界不稳定状态与不稳定状态均为快速分离至无界(如图2(c)与(d)).因此,基于李雅普诺夫稳定性理论利用系统相关状态特征量并不能充分体现系统故障后的不同状态的演化特性.

为表征上述特性,本文采用能量函数模型,提取系统在不同故障持续时间下的能量流序列样本,利用多尺度熵分析相应的复杂性.仿真仍采用上述测试系统模型,仿真计算时间为10 s,采样频率为

200 Hz,通过前文中的故障清除时间分别提取不同故障模式下系统中各支路能量序列.根据采样得到的不同故障清除时间下系统中各支路能量序列样本,利用(7)式计算故障后系统能量.进一步取维数参数 $m = 2$ ,容限参数 $r = 0.25SD$ ,尺度变换因子 $1 \leq \tau \leq 20$ ,基于多尺度熵的电力能量流复杂性计算结果如图3和表1所示.

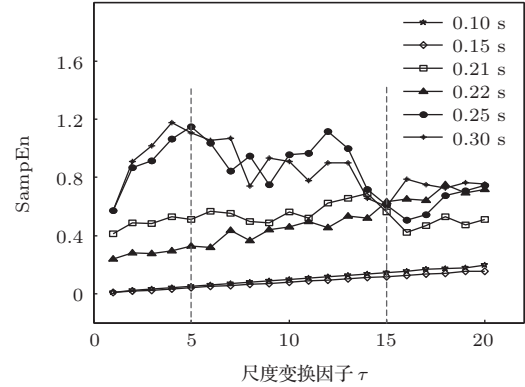


图3 不同故障持续时间下系统总电力能量流的多尺度熵结果

表1 故障后不同状态下系统总电力能量流的多尺度熵结果

尺度变换因子	稳定状态		临界状态		不稳定状态	
	$T_c = 0.10 \text{ s}^{-1}$	$T_c = 0.15 \text{ s}^{-1}$	$T_c = 0.21 \text{ s}^{-1}$	$T_c = 0.22 \text{ s}^{-1}$	$T_c = 0.25 \text{ s}^{-1}$	$T_c = 0.30 \text{ s}^{-1}$
1	0.0110	0.0082	0.4135	0.2382	0.5695	0.5721
3	0.0321	0.0247	0.4835	0.2783	0.9157	1.0180
5	0.0514	0.0407	0.5129	0.3290	1.1474	1.1069
8	0.0788	0.0633	0.4988	0.3647	0.9464	0.7416
11	0.1068	0.0879	0.5193	0.4958	0.9663	0.7778
15	0.1463	0.1178	0.5614	0.6308	0.6097	0.5979
18	0.1744	0.1413	0.5287	0.7494	0.6758	0.7284
20	0.1956	0.1535	0.5093	0.7156	0.7452	0.7527

从图3和表1可以得出以下结论:

1) 在不同尺度变换因子下,随着故障持续时间的增加,系统故障后能量流的多尺度熵值均增大,即不稳定运行状态的熵值大于临界运行状态熵值,临界运行状态熵值大于稳定运行状态熵值,这表明系统在长故障持续时间下会表现更高的复杂度,其主要原因在于故障持续时间越长,系统中注入的扰动能量越多,同时由于受系统中的发点机组动力学特性的影响,系统能量分布更复杂,因此增加了故障后系统的复杂度;

2) 故障后稳定运行状态下,系统故障后能量

流的熵值较小,且在不同时间尺度范围内表现为较平稳增长,表明故障后稳定运行状态下,系统中注入扰动能量较少,此时系统距离稳定极限较远,因此这部分能量很快被系统吸收,系统的复杂度增加不大;

3) 故障后不稳定运行状态下,系统故障后能量流的熵值在尺度变换因子较小 $\tau \leq 5$ 的情况下快速增大,在尺度变换因子 $5 \leq \tau \leq 15$ 时会表现出一定的波动特性,而在尺度变换因子 $\tau \geq 15$ 时则会相对平稳,表明当系统中注入的扰动能量远超过其稳定吸收极限时,系统的中能量在小时间尺度上呈现出

无序分布, 而从大时间尺度上呈现出一定的有序, 表明故障后系统能量的复杂性在小尺度时表现为更强的不确定性, 而在大尺度时则表现为相对更明显的规则性;

4) 故障后临界稳定运行状态下, 系统的能量熵值在  $1 \leq \tau \leq 14$  会随时间尺度增加而增加, 但在大时间尺度  $\tau \geq 15$  后相对平稳, 且小于不稳定运行状态时的大尺度熵值; 这种变化趋势说明临界稳定时系统的复杂性表现出在大部分时间尺度范围内稳定运行状态呈现的慢速增长特性, 也体现了其低于不稳定运行状态下系统在较大时间尺度时的复杂性; 而在临界不稳定运行状态下, 系统的能量熵值虽然在  $1 \leq \tau \leq 14$  范围内小于临界稳定运行状态时的熵值, 但在  $\tau \geq 15$  时接近或超过不稳定运行状态的熵值, 说明临界不稳定运行状态下系统复杂度虽然在小时尺度范围内体现了较低的不确定性, 但在大时间尺度范围了呈现出与不稳定状态一致的较高复杂性; 该差异很好地说明了临界稳定与临界不稳定之间存在一个临界点, 该点是区分临界稳定运行状态与临界不稳定状态的重要时间节点, 这与李雅普诺夫稳定理论是相符合的, 同时也验证了本文方法的合理性.

进一步, 为说明故障后不同运行状态下系统内

部的能量流复杂性, 以故障后各支路能量为观察对象, 计算不同故障持续时间下系统各支路能量流的多尺度熵值, 结果如图 4 所示.

从图 4 可以看出, 四种运行状态下系统中各支路能量流的多尺度熵存在明显差异. 稳定运行状态下各支路能量流熵值最小 ( $0 < \text{SampEn} < 0.6$ ), 且各支路的能量熵值随尺度变换因子的增大而集中式一致性增加, 因此在系统总能量上体现出较低的复杂度. 临界稳定运行状态下各支路能量熵值随尺度变换因子的增大呈现波动形增长趋势, 部分支路能量熵值在尺度变换因子  $1 \leq \tau \leq 15$  下波动范围较大, 因此系统总能量上体现出相对较高的复杂度. 而临界不稳定运行状态下各支路能量熵值随尺度变换因子的增大相对集中式振荡, 且在时间尺度因子较小时快速增大. 相比较而言, 不稳定运行状态下各支路能量的多尺度熵与临界不稳定运行状态有相同趋势, 但其熵值在同一时间尺度下均较大, 且少数线路会呈现出与系统中其他支路不同的变化趋势, 这些支路上能量的分布与聚集增加了系统的整体复杂性. 可见, 上述系统各支路的多尺度熵值变化趋势从另外一个角度反映出了故障后系统整体能量流的复杂性.

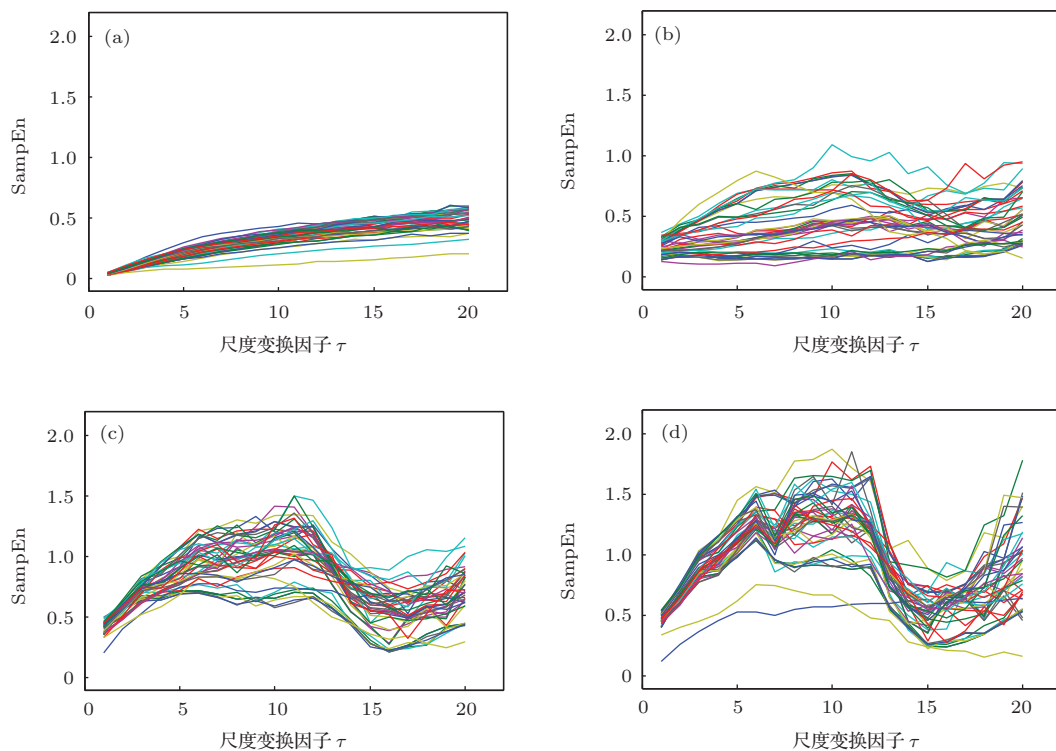


图 4 (网刊彩色) 不同故障持续时间下系统各支路电力能量流的多尺度熵结果 (a) 稳定状态; (b) 临界稳定状态; (c) 临界不稳定状态; (d) 不稳定状态

进一步,为验证本文所提方法的普适性,选取不同的IEEE标准测试系统(3机9节点系统、50机145节点系统)的不同故障模式进行仿真计算分析,结果如图5所示.其中IEEE 9节点系统中故

障线路为7\*—8, IEEE 145节点系统中故障线路为6\*—7.对比图3与图5可以看出,扰动或故障后不同运行状态下系统能量流在不同时间尺度上呈现相似特性,说明了本文方法的普适性.

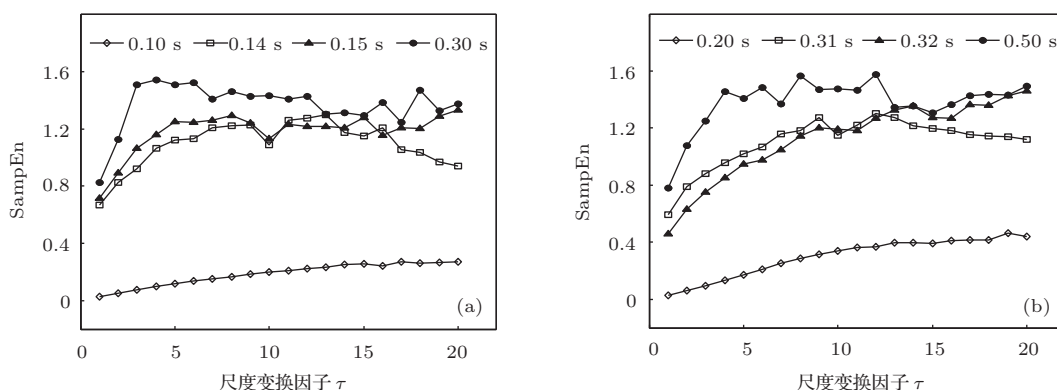


图5 不同故障持续时间下系统总电力能量流的多尺度熵结果 (a) IEEE 3机9节点系统; (b) IEEE 50机145节点系统

## 5 结 论

本文提出了一种结合能量函数与多尺度熵函数的系统动态行为过程复杂性的分析方法,并通过扰动(或故障)后电力系统不同运行状态下的能量流复杂性分析进行了验证.结果表明,随着故障持续时间的增加,系统故障后呈现出更高的复杂度;不稳定运行状态下,系统在小尺度时间上表现出更强的不确定性,而在大尺度时间上表现出相对更明显的规则性;临界运行状态下故障后的系统复杂度在不同时间尺度上呈现出较明显的差异.这些结果较好地说明了电力系统能量流在动态行为过程中的物理演化机制.另外,由于本文着眼于分析不同运行状态下系统能量的复杂度和挖掘在扰动或故障后系统状态演化的相关特征,而对扰动能量注入后系统中各支路能量的复杂特性及其能量流的传播路径未做解析.且动态过程中少数支路表现出较为异常的复杂特性,这些支路在系统动态过程中的作用如何?研究这些内容对复杂系统级联效应发生过程有着重要的揭示意义,将是下一步的研究工作.

## 参考文献

[1] Arianos S, Bompard E, Carbone A, Xue F 2009 *Chaos* **19** 013119  
 [2] Mei S W, Xue A C, Zhang X M 2008 *Sci. China E* **51** 209

[3] Tang C K, Graham C E, El-Kady M, Alden R T H 1994 *IEEE Trans. Power Syst.* **9** 031524  
 [4] Strogatz S H 2001 *Nature* **410** 268  
 [5] Liu X, Liu T Q, Wang H, Li X Y 2010 *Chin. Phys. B* **19** 070204  
 [6] Zhuang J J, Ning X B, Zou M, Sun B, Yang X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2805 (in Chinese) [庄建军, 宁新宝, 邹鸣, 孙飙, 杨希 2008 物理学报 **57** 2805]  
 [7] Pincus S M 1991 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **88** 2297  
 [8] Cao B, Xiang Y P, Lv X Q, Zeng M, Huang S S 2008 *Chin. Phys. B* **17** 865  
 [9] Lake D E, Richman J S, Griffin M P, Moorman J R 2002 *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* **283** R789  
 [10] Richman J S, Moorman J R 2000 *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* **278** 2039  
 [11] Costa M, Peng C K, Goldberger A L, Jeffrey M H 2003 *Physica A* **330** 53  
 [12] Costa M, Goldberger A L, Peng C K 2005 *Phys. Rev. E* **71** 021906  
 [13] Wang J, Ma Q L 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4424  
 [14] He L, Du L, Zhuang Y Q, Li W H, Chen J P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6545 (in Chinese) [何亮, 杜磊, 庄奕琪, 李伟华, 陈建平 2008 物理学报 **57** 6545]  
 [15] Xiang Z T, Chen Y F, Li Y J, Xiong L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 038903 (in Chinese) [向郑涛, 陈宇峰, 李昱瑾, 熊励 2014 物理学报 **63** 038903]  
 [16] Ni Y X, Chen S S, Zhang B L 2002 *Dynamic Power System Theory and Analysis* (Beijing: Tsinghua University Press) pp135–215 (in Chinese) [倪以信, 陈寿孙, 张宝霖 2002 动态电力系统的理论和分析 (北京: 清华大学出版社) 第135—215页]  
 [17] Liu S, Wang J 1996 *Energy Function Analysis of Power System Transient Stability* (Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press) pp2–5 (in Chinese) [刘笙, 汪静 1996 电力系统暂态稳定的能量函数分析 (上海: 上海交通大学出版社) 第2—5页]

- [18] Fang D Z, Zhang Y, Song W N, Chung T S 1998 *Proceedings of the CSEE* **18** 030200 (in Chinese) [房大中, 张尧, 宋文南, 钟德成 1998 中国电机工程学报 **18** 030200]
- [19] Pai M A 1989 *Energy Function Analysis for Power System Stability* (USA: Kluwer Academic Publisher) pp26–33
- [20] Padiyar K R, Krishna S 2006 *IEEE Trans. Power Deliv.* **21** 46
- [21] Liu Y B, Liu J Y, Wang M K, Yang J S 2011 *Proceedings of the CSEE* **31** 130040 (in Chinese) [刘友波, 刘俊勇, 王明昆, 杨嘉澍 2011 中国电机工程学报 **31** 130040]
- [22] Cai G W, Chan K W, Yuan W P, Mu G 2007 *Int. J. Elec. Power* **29** 199
- [23] Lin J K, Yang J, Li Y C, Zheng W H, Wang H L 2008 *J. Tianjin Univ.* **41** 060660 (in Chinese) [林济铿, 杨静, 李杨春, 郑卫红, 王海林 2008 天津大学学报 **41** 060660]

## Complexity analysis of power system energy flow based on multi-scale entropy\*

Gou Jing<sup>1)†</sup> Liu Jun-Yong<sup>1)</sup> Wei Zhen-Bo<sup>1)‡</sup> Gareth Taylor<sup>2)</sup> Liu You-Bo<sup>1)</sup>

1) (School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

2) (Brunel Institute of Power Systems, Brunel University, London UB8 3PH, United Kingdom)

( Received 21 April 2014; revised manuscript received 16 June 2014 )

### Abstract

Complexity of power system energy flow is mainly reflected in the features of dynamic behavior such as real-time, nonlinear, uncertainty, etc. The analysis of dynamics on network is a critical means. The potential energy function models of system and branches are established, which are based on power system dynamic equilibrium equation to extract the system energy information after the fault duration. And the complexity of the system energy flow evolution is analyzed by using the multi-scale entropy method. The analysis results show that the system complexity under steady operation is much low. In addition, the complexity of the fault system increases with the increase of fault duration. Moreover, the system complexity under unstable operation shows a strong uncertainty in a small time scale and obvious regularity in a large time scale. And the most important is that the system complexities of the critical stable state and the critical unstable state are clearly distinct in different time scales. Such a difference can be used as a positive reference to the identification of the critical point in the dynamic state. Research results reveal the evolution of power energy flow in physical dynamic process. This can provide new ideas and methods for analyzing the dynamics behavior of power system.

**Keywords:** power system energy flow, dynamics on networks, multi-scale entropy, complexity analysis

**PACS:** 84.70.+p, 88.80.H-, 05.45.-a

**DOI:** 10.7498/aps.63.208402

\* Project supported by the Funds for International Cooperation and Exchange of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51261130472) and the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51207098).

† Corresponding author. E-mail: scu\_goujing@163.com

‡ Corresponding author. E-mail: weizhenbo@scu.edu.cn