

## 电网脆弱性评价的灵敏度分析法

孟绍良<sup>1</sup>, 吴军基<sup>2</sup>, 王 虎<sup>3</sup>

(1. 东南大学电气工程学院, 南京 210096; 2. 南京理工大学动力工程学院, 南京 210094;  
3. 宿迁供电公司, 宿迁 223800)

**摘要:** 从灵敏度分析出发, 针对负荷波动的情况, 通过综合考虑母线电压关于系统负荷无功功率波动的受扰动程度以及母线当前运行电压与额定电压、电压上下限之间的关系, 提出了母线电压脆弱性评价指标; 另外, 又通过分析电力网络趋近临界运行时, 支路无功损耗与负荷变化区无功功率波动之间的关系, 提出了支路脆弱性评价指标。采用文中所提出的评价指标, 对 IEEE30 系统进行脆弱性评价, 验证了指标在评估母线和支路脆弱性方面是有效的和可行的。

**关键词:** 灵敏度分析; 广义特勒根定理; 母线脆弱性; 支路脆弱性

**中图分类号:** TM761 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8930(2011)05-0089-05

## Power Grid Vulnerability Assessment Based on Sensitivity Analysis

MENG Shao-liang<sup>1</sup>, WU Jun-ji<sup>2</sup>, WANG Hu<sup>3</sup>

(1. Electrical Engineering School, Southeast University, Nanjing 210096, China;  
2. School of Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology,  
Nanjing 210094, China;  
3. Suqian Power Supply Company, Suqian 223800, China)

**Abstract:** Based on sensitivity analysis, the power grid vulnerability assessment is carried out in this paper. Bus vulnerability index mainly considers two factors: one is the sensitivity of bus voltage, when reactive load changes, the other is the relationship between current value, upper and lower limits, rated voltage of the bus; besides, the definition of the index for the branch vulnerability assessment is accomplished, by analyzing the relationship between branch power losses and reactive load of the load area in network, when the voltage is closed to the critical point. In the research, bus and branch vulnerability assessment of the network IEEE 30 is conducted by the above-mentioned method and index. The result shows that the assessment method and index is effective and feasible.

**Key words:** sensitivity analysis; generalized Tellegen's theorem; branch vulnerability; bus vulnerability

电力网络作为世界上最复杂、最庞大的人工网络之一, 结构上不可避免地会出现某些难以预料的脆弱特性<sup>[1,2]</sup>; 同时, 由于电网承担着大量电能生产、转换和传输的任务, 在运行过程中, 一些突发性的故障都会影响电网的安全运行, 加重电网的脆弱特性<sup>[3]</sup>。因此, 对电力网络的脆弱性做出正确评价, 有助于调度人员及早地采取相应的预防控制措施以保障电网的安全运行。

目前国内外对于电力系统脆弱性的研究处于初始阶段, 还没有广泛认可和采用的指标体系<sup>[4]</sup>。根据电网脆弱源的不同或分析侧重点的不同, 研究人员提出了不同的电网脆弱性评估方法: ① 基于复杂网络理论的电网脆弱性研究; ② 基于风险理论的电网脆弱性研究; ③ 强外力骚扰环境下的电网脆弱性研究; ④ 基于暂态稳定分析的电网脆弱性研究。上述评估方法的深入研究为电网脆弱性评

收稿日期: 2010-02-04; 修回日期: 2010-06-12

价提供了重要的依据。

本文从灵敏度分析的角度出发,结合母线电压当前运行情况,提出将母线电压关于该波动的敏感程度作为母线脆弱性评价指标;并以系统趋近临界时,支路无功损耗关于负荷波动的灵敏度作为电力网络支路脆弱性评价尺度。

## 1 基于广义特勒根定理的改进灵敏度算法

当控制变量和参数变量发生微小变化时,系统的状态变量或输出变量都会发生微小变化,两者之间的变化关系可以通过灵敏度分析法来描述<sup>[5]</sup>。灵敏度分析能够清晰准确地描述电力系统中众多参数对系统状态变量影响的重要程度<sup>[6,7]</sup>,将灵敏度分析法用于电网脆弱性评估中,可以准确快速地判断出电网的薄弱母线或薄弱区域<sup>[7]</sup>。

从电力系统灵敏度的物理意义考虑,将灵敏度指标分为三类<sup>[34]</sup>:母线灵敏度指标、支路灵敏度指标和发电机灵敏度指标。通过灵敏度指标来评估电网的脆弱性主要有以下几种方法:① 利用指标的变化率来判别薄弱母线<sup>[5,8]</sup>;② 利用指标的大小来判定薄弱母线和薄弱支路<sup>[8]</sup>;③ 利用指标的综合判别式来判定脆弱母线<sup>[1,3]</sup>。

基于灵敏度分析法评估电网的脆弱性时,关键在于两点:评价指标的选择和灵敏度指标的计算。本文灵敏度指标的计算采用基于广义特勒根定理的改进算法。对于由  $n$  节点组成的电力网络,网络可以描述为

$$\mathbf{D}_{kk} = \begin{bmatrix} d_{kkx} & d_{kky} \\ d_{kky} & -d_{kkx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{P_k(V_{xk}^2 - V_{yk}^2) + 2Q_k V_{xk} V_{yk}}{|V_k|^4} & \frac{-Q_k(V_{xk}^2 - V_{yk}^2) + 2P_k V_{xk} V_{yk}}{|V_k|^4} \\ \frac{-Q_k(V_{xk}^2 - V_{yk}^2) + 2P_k V_{xk} V_{yk}}{|V_k|^4} & \frac{-(P_k(V_{xk}^2 - V_{yk}^2) + 2Q_k V_{xk} V_{yk})}{|V_k|^4} \end{bmatrix}$$

式中: $P_k$ 、 $Q_k$  表示节点  $k$  的有功和无功注入功率; $V_{xk}$ 、 $V_{yk}$  表示节点电压  $V_k$  的实部和虚部。在下面的推导中,还将涉及到  $\mathbf{D}_{ii}$ ,同理, $\mathbf{D}_{ii}$  也只与节点电压  $V_i$  和节点注入功率  $S_i$  有关,对于式(4)中各元素的

$$\Delta V_i + \tilde{V}_i(i) \frac{\dot{S}_i}{\tilde{V}_i^2(i)} \Delta_i = \begin{bmatrix} 1 + \tilde{V}_{ix}(i)d_{iix} - \tilde{V}_{iy}(i)d_{iyy} & \tilde{V}_{ix}(i)d_{iyy} + \tilde{V}_{iy}(i)d_{iix} \\ \tilde{V}_{ix}(i)d_{iyy} + \tilde{V}_{iy}(i)d_{iix} & 1 - \tilde{V}_{ix}(i)d_{iix} + \tilde{V}_{iy}(i)d_{iyy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{ix} \\ \Delta V_{iy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1(i) & M_3(i) \\ M_3(i) & M_2(i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{ix} \\ \Delta V_{iy} \end{bmatrix} = \mathbf{M}(i) \begin{bmatrix} \Delta V_{ix} \\ \Delta V_{iy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $\tilde{V}_{ix}(i)$ 、 $\tilde{V}_{iy}(i)$  表示伴随网络中节点的电压实部和虚部。

定义  $\mathbf{M}(i)$  为节点  $i$  的电压修正系数矩阵,其

$$\mathbf{YV} = \mathbf{I} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{Y}$  表示节点导纳矩阵; $\mathbf{V}$  表示节点电压向量; $\mathbf{I}$  表示节点注入电流, $\mathbf{I}^T = [I_1, \dots, I_i, \dots, I_n]$ ,  $I_i = \dot{S}_i / \tilde{V}_i$ ,  $\dot{S}_i$  表示节点  $i$  注入复功率的共轭,  $\tilde{V}_i$  表示节点  $i$  电压的共轭。

与式(1)所描述的电力网络相对应的伴随网络的数学模型可表示为

$$\tilde{\mathbf{Y}}\tilde{\mathbf{V}} = \tilde{\mathbf{I}} \quad (2)$$

式中: $\tilde{\mathbf{Y}}$  与  $\mathbf{Y}$  互为结构伴随矩阵,且  $\tilde{\mathbf{Y}} = \mathbf{Y}^T$ ;  $\tilde{\mathbf{V}}$  和  $\tilde{\mathbf{I}}$  分别表示伴随网络节点电压和电流矩阵。取  $[\tilde{\mathbf{I}}(i)]^T = [0, \dots, 1, \dots, 0]$ ,即只有节点  $i$  有伴随电流流入时,通过方程(2)就可以求解出伴随网络各节点的电压矩阵  $\tilde{\mathbf{V}}(i)$ 。

参照广义特勒根定理的差形式可以得到节点  $i$  电压变化  $\Delta V_i$  与扰动之间的关系<sup>[9,10]</sup> 为

$$\Delta V_i = -\tilde{\mathbf{V}}^T(i)\Delta\mathbf{YV} + \tilde{\mathbf{V}}^T(i)\tilde{\mathbf{V}}^{-1}\Delta\tilde{\mathbf{S}} - \tilde{V}_i(i) \frac{\dot{S}_i}{\tilde{V}_i^2(i)} \Delta V_i - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \tilde{V}_k(i) \mathbf{D}_{kk} \Delta V_k \quad (3)$$

式中: $\mathbf{V}$  表示电力网络节点电压,由潮流计算获得; $\tilde{\mathbf{V}}$  表示其共轭; $\Delta\mathbf{Y}$  表示电网线路参数的变化; $\Delta\tilde{\mathbf{S}}$  表示节点注入功率变化量  $\Delta\mathbf{S}$  的共轭; $\tilde{V}_i(i)$  表示伴随网络只有节点  $i$  有伴随电流流入时,节点  $i$  的电压; $\tilde{V}_k(i)$  表示除节点  $i$  之外的其他节点的伴随电压; $\mathbf{D}_{kk}$  与节点电压  $V_k$  和节点注入功率  $S_k$  有关,在  $V_k$  和  $S_k$  已知时,其计算式为

计算,只需要用  $V_i$ 、 $S_i$  替换  $\mathbf{D}_{kk}$  中的对应量即可。

$$\mathbf{D}_{ii} = \begin{bmatrix} d_{iix} & d_{iyy} \\ d_{iyy} & -d_{iix} \end{bmatrix} \quad (4)$$

将式(3)右边第三项移到式子的左边,整理得

中  $M_1(i)$ 、 $M_2(i)$  称为对角线元素,  $M_3(i)$  称为非对角线元素。

前人在采用广义特勒根定理计算灵敏度时认

为母线  $i$  的电压修正系数矩阵中的非对角线元素  $M_3(i)$  近似为  $0^{[9,10]}$ , 这种观点是片面的。通过计算发现某些电力网络母线电压修正系数矩阵中的非对角元素与 0 相差较大, 以 IEEE 5 母线系统为例, 计算其 PQ 母线电压修正系数矩阵, 数据采用文献 [10] 给出的标准数据, 计算结果见表 1。

表 1 IEEE 5 系统负荷母线电压修正系数矩阵  
Tab. 1 PQ bus voltage correction coefficient matrix of IEEE 5

母线	$M_1$	$M_2$	$M_3$
1	1.254 1	0.745 9	0.637 0
2	0.785 3	1.214 7	0.490 4
3	1.058 6	0.941 4	0.110 8

从表 1 可以发现, 对于 PQ 母线 1 和 2, 其非对角线元素不等于零并且与对角线元素差异较小。如果采用前人的观点, 会导致灵敏度计算结果出现较大误差甚至是错误, 因此在采用广义特勒根定理计算灵敏度时, 必须考虑非对角线元素的实际值。在研究过程中, 分别计算了 IEEE14 和 IEEE30 母线系统的负荷母线电压修正系数, 结果表明非对角线元素  $M_3$  并非全部为零。

在计算灵敏度时, 需将式 (5) 代入式 (3) 可得 PQ 母线电压实部和虚部关于线路参数、系统负荷以及 PV 节点电压的灵敏度计算方法。

## 2 电力网络脆弱性评价

电网中系统负荷对电压稳定存在较大的影响, 母线电压能反映母线的脆弱性情况。因此, 本文针对系统注入功率发生波动时, 从灵敏度分析的角度分别对电网母线和支路的脆弱性评价进行研究。

### 2.1 母线脆弱性评价指标

母线脆弱性评价既考虑系统负荷功率波动时

$$S_{Li} = \begin{cases} \sum_{j=1}^n \left| \frac{\partial V_i}{S_B r_{Lj} \sin \varphi_j \partial Q_{Lj}} \right| \left( \frac{|V_i| - |V_{i0}|}{|V_{i, \max}| - |V_{i0}|} \right) & |V_i| \geq |V_{i0}| \\ \sum_{j=1}^n \left| \frac{\partial V_i}{S_B r_{Lj} \sin \varphi_j \partial Q_{Lj}} \right| \left( \frac{|V_{i0}| - |V_i|}{|V_{i0}| - |V_{i, \min}|} \right) & |V_i| < |V_{i0}| \end{cases} \quad (8)$$

母线脆弱性评价指标可以按照上式进行计算, 计算出的值越大, 说明对应母线的脆弱度越高。系统中任意一条母线所带负荷发生波动时, 都会对母线的脆弱性产生影响, 只考虑单一负荷或者几个负荷波动, 都不能准确评价电网母线脆弱性, 必须综合考虑系统所有负荷都波动时的情况, 因此采用式 (7) 来衡量电网母线脆弱性。

每条母线的脆弱性指标都是在同一个基础上

母线电压变化趋势, 又要考虑母线电压当前运行情况。所以, 定义母线电压敏感度指标表征电压变化趋势; 定义母线电压波动指标反映电压当前情况。

#### 1) 母线电压敏感度指标

由于电压稳定与系统的无功功率存在直接的关系, 因此在定义母线电压敏感度指标时选择电压关于无功功率变化的灵敏度。当系统母线所带负荷都发生波动时, 考虑负荷功率波动大小, 母线  $i$  的电压敏感度指标定义为

$$S_{Qi} = \sum_{j=1}^n \left| \frac{\partial V_i}{S_B r_{Lj} \sin \varphi_j \partial Q_{Lj}} \right| \quad (6)$$

式中:  $S_B$  为基准视在功率;  $r_{Lj}$  为母线  $j$  所带负荷的变化率;  $\varphi_j$  为母线  $j$  所带负荷的功率因数角。

#### 2) 母线电压波动指标

系统正常运行时, 母线电压一般保持在一个正常的范围。对于脆弱母线, 系统受外界干扰时, 更容易受到影响, 波动的范围更大。因此, 可以定义一个指标, 用来衡量当前母线电压运行情况。以母线当前电压值与母线电压上下限的距离作为母线电压波动指标, 其表达式为

$$\alpha_{Li} = \begin{cases} \frac{|V_i| - |V_{i0}|}{|V_{i, \max}| - |V_{i0}|} & |V_i| \geq |V_{i0}| \\ \frac{|V_{i0}| - |V_i|}{|V_{i0}| - |V_{i, \min}|} & |V_i| < |V_{i0}| \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $|V_i|$ 、 $|V_{i0}|$ 、 $|V_{i, \max}|$  和  $|V_{i, \min}|$  分别为母线  $i$  当前电压幅值、额定幅值、上限值和下限值。

#### 3) 母线脆弱性评价指标

在定义母线脆弱性评价指标时, 既要考虑母线电压的变化趋势, 又要关注母线电压当前的运行情况, 因此, 综合考虑母线电压敏感度指标和电压波动指标, 则母线  $i$  的脆弱性指标可以定义为

产生的——电网发生全网性的负荷波动, 在这种情况下可以保证各条母线脆弱性指标具有可比性。

### 2.2 支路脆弱性评价指标

电力网络在靠近临界点运行时, 支路的无功损耗对负荷变化比较敏感, 这些支路无功损耗本身不大, 但是其关于功率波动的变化率会很大。如果综合考虑每条母线所带负荷变化对支路无功损耗的影响, 可得支路脆弱性评价指标, 用来衡量支路  $K$

的脆弱性,该值越大,表示该支路越容易受影响,脆弱度越高。定义支路  $K$  的脆弱性指标为

$$S_{VK} = \sum_{j=1}^n \left| \frac{\partial Q_{\text{loss}}(K)}{\partial Q_{L,j}} \right| \quad (9)$$

$K = 1, 2, \dots, l$

式中: $l$  为支路总数; $Q_{\text{loss}}(K)$  为支路  $K$  无功损耗,假设支路  $K$  连接节点  $m, n$ ,其功率损耗为  $P_{\text{loss}}(K) + jQ_{\text{loss}}(K) = (V_m - V_n)^2 Y_{mn}$ ,则支路脆弱性评价指标中无功损耗关于无功注入功率波动的灵敏度可以转化为节点电压关于注入无功的灵敏度了,而该指标可以通过式(3)和式(5)来计算。

支路脆弱性评价的前提是系统已经接近临界状态,这时系统运行情况已接近不稳定状态,当系统无功负荷波动时,网络中越脆弱支路所受影响越大,因此式(9)能真实体现支路脆弱性情况。

### 3 算例分析

#### 3.1 IEEE 30 系统母线脆弱性评价

由于母线脆弱性评价指标是针对系统负荷功率发生波动时定义的,因此在对系统进行脆弱性评价前,需预设负荷变化率。研究表明:负荷变化率的选取条件比较宽松,只要负荷的波动不导致系统达到或者越过临界状态。这里选择变化率  $r_{Lj} = \pm 2\%$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) 表示母线  $j$  所带负荷在原来基础上增加或者减少  $2\%$ 。研究侧重于 PQ 母线的脆弱性评价,IEEE 30 系统母线脆弱性变化情况如图 1 所示。

图 1 中横坐标母线编号从 2 ~ 30,表示系统中除了平衡节点以外的其他节点;纵坐标表示母线脆弱性指标的归一化值;为了曲线绘制方便和保持曲线的连续性,横坐标中包括 PV 和 PQ 节点,但是 PV 节点所对应的脆弱性指标没有实际意义。无论负荷需求是增加,还是减少,采用本文所提出的评价指标都可以得到较为一致的脆弱性评价结果。

从图 1 中可以看出,母线 10 的脆弱度比较高,其本身自带负荷功率虽然不大,但通过多条支路和变压器与其他母线相连,承担系统中大量功率交换和传输的任务,一旦遇到故障切除该母线或者母线检修,对整个系统产生极大影响,可以判定脆弱性情况比较严重;母线 4 自身所带负载较轻,但是通过与变压器相连承担着区域之间功率传输的重任,当其不正常工作时,对系统稳定性影响较大,所以脆弱度较高;母线 21 和 30 由于自身功率较大,且距离电源点较远,功率需要长距离的传输,当系统

发生波动时,易受影响;母线 7 自身功率较大,但是靠近电源点,功率很容易得到满足,脆弱度较低。

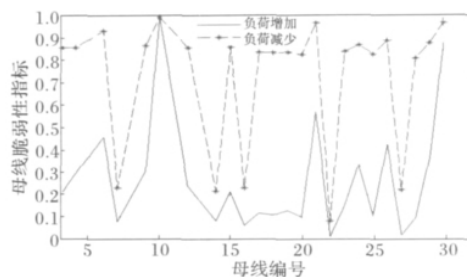


图 1 IEEE 30 系统母线脆弱性评价  
Fig. 1 Bus vulnerability assessment of IEEE 30

#### 3.2 IEEE 30 系统支路脆弱性评价

本文在研究系统支路脆弱性的前提是系统趋近于临界状态,在逼近 IEEE30 母线系统的电压临界点时,选择以该系统所有 PQ 节点构成负荷变化区,逐步增加变化区中各节点的负荷,并保证负荷增加前后节点的功率因数保持不变。在考虑了 PV 节点无功出力达到极限后节点类型转化的情况后,当负荷变化区有功功率增加 1.184 20 倍时,系统电压趋近临界,这时 IEEE 30 母线系统的支路脆弱性指标参照式(9)计算。IEEE 30 系统支路脆弱性评价结果如图 2 所示。

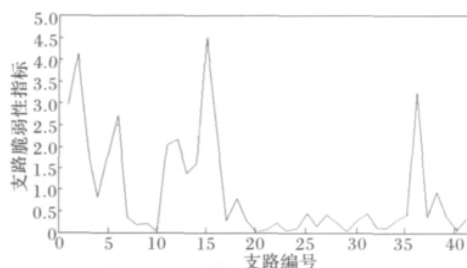


图 2 IEEE 30 母线系统支路脆弱性评价  
Fig. 2 Branch vulnerability assessment of IEEE 30

支路脆弱性指标的正确性可以通过分析支路断线对系统的影响来验证:从图 2 中可以看出脆弱度较高的支路有 1、2、6、12、15、36 等,参照 IEEE 30 母线系统接线可以发现支路 1 和支路 2 都与平衡节点相连,平衡节点承担着系统中大量的有功出力,这部分有功出力的传输完全依靠支路 1 和 2,这两条支路上的任务较重,一旦断线,会导致电网供电能力下降,对系统的影响很大,因此是脆弱的;支路 15 作为区域功率交换的重要支路,对维持系统稳定的作用很大,当发生断线时,系统稳定性会受到很大的危害;支路 36 一旦发生断线故障,25、26、

27、29、30等母线与电源点的电气距离就会加大,同时供电方式由断线前的双端供电变为单端供电,当这些节点的功率需求增大时,导致与这些节点相连支路的潮流容易越限,因此支路36对维持网络的安全运行很重要,是比较脆弱的。

#### 4 结语

本文在灵敏度分析的基础上,研究电网的脆弱性。灵敏度分析采用基于广义特勒根定理的改进算法,并以IEEE5、IEEE14、IEEE30系统验证了改进算法的正确性。文中母线和支路脆弱性指标计算是基于广义特勒根定理的改进算法,该算法可以保证指标计算的快速性和准确性;同时,本文中所提出的评价指标的可行性已经得到验证,所以采用本文的算法和评价指标可以实现电网母线和支路脆弱性的快速、准确的评价。对于脆弱性指标较高的母线和支路,可以根据指标的计算值来寻找对电网影响较大的负荷波动,针对这些负荷做相应的控制和调节,有助于提高系统的安全性和可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 赵莹莹(Zhao Yingying). 基于轨迹灵敏度的电网脆弱域分析(The Study of Vulnerability Region of Power Grid Based on Trajectory Sensitivity)[D]. 北京:华北电力大学电气与电子工程学院(Beijing: School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University), 2007.
- [2] Fouad A A, Zhou Qin, Vittal V. System vulnerability as a concept to assess power system dynamic security [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2):1009-1015.
- [3] 王乐(Wang Le). 脆弱性分析在电力系统安全防护中的应用研究(Application Study on Vulnerability Assessment in Power System Security Defense System)[D]. 北京:华北电力大学电气与电子工程学院(Beijing: School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University), 2005.
- [4] 白加林,刘天琪,曹国云,等(Bai Jialin, Liu Tianqi, Cao Guoyun, *et al*). 电力系统脆弱性评估方法综述(A Survey on vulnerability assessment method for power system)[J]. 电网技术(Power System Technology), 2008, 32(S2):26-30.
- [5] 周晓渊(Zhou Xiaoyuan). 电力系统电压稳定分析与控制研究(Research on Power System Voltage Stability and Control)[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院(Hang Zhou: College, Electrical Engineering of Zhejiang University), 2006.
- [6] 王尔智,赵玉环. 电力网络灵敏度分析与潮流计算[M]. 北京:机械工业出版社, 1992.
- [7] 段献忠,袁骏,何仰赞,等(Duan Xianzhong, Yuan Jun, He Yangzan, *et al*). 电力系统电压稳定灵敏度分析方法(Sensitivity analysis methods on voltage stability of electric power systems)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(4):9-12.
- [8] 袁骏,段献忠,何仰赞,等(Yuan Jun, Duan Xianzhong, He Yangzan, *et al*). 电力系统电压稳定灵敏度分析方法综述(Summarization of the sensitivity analysis method of voltage stability in power systems)[J]. 电网技术(Power System Technology), 1997, 21(9):7-10.
- [9] 鲁宝春,刘毅,马文阁,等. 广义 Tellegen 定理及其在电力系统中的应用[M]. 沈阳:东北大学出版社, 2003.
- [10] 鲁宝春,郭志忠,柳焯(Lu Baochun, Guo Zhizhong, Liu Zhuo). 基于广义特勒根定理进行电力系统灵敏度计算(Computing network sensitivity of power system based on generalized Tellegen theorem)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(10):17-20.
- [11] 刘君华,方鸽飞,吕岩岩(Liu Junhua, Fang Gefei, Lü Yanyan). 基于灵敏度法确定无功补偿地点(Allocation of reactive compensation using sensitivity analysis approach)[J]. 电力系统及其自动化学报(Proceedings of the CSU-EPSCA), 2006, 18(4):58-61.
- [12] 曹一家,刘美君,丁理杰,等(Cao Yijia, Liu Meijun, Ding Lijie, *et al*). 大电网安全性评估的系统复杂性理论研究(Research on system complexity theory for security evaluation of large power grids)[J]. 电力系统及其自动化学报(Proceedings of the CSU-EPSCA), 2007, 19(1):1-8.

#### 作者简介:

孟绍良(1975—),男,讲师,博士,主要从事电力系统及其自动化等方面的研究工作。Email:mengshaoliang@163.com  
 吴军基(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统及其自动化、电力市场等方面的教学与研究工作。Email:wjj807@126.com  
 王虎(1986—),男,硕士研究生,主要从事电力系统变电运行方面的工作。Email:tigerls1227@163.com