

# 基于能量灵敏度矩阵和多阈值搜索的电压控制分区

郑武<sup>1</sup> 康勇<sup>2</sup> 李华强<sup>3</sup>

(1. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021;

2. 国网四川省电力公司物资分公司, 四川 成都 610052; 3. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:**目前,能量函数的方法用于电压稳定评估、电网可靠性分析已获得较为深入的研究。由于节点的能量信息能综合反映节点的无功注入以及电压水平,提出一种基于静态能量函数法和多阈值搜索进行电压控制分区的新方法。从节点的能量信息出发,提出节点能量相关度指标用于量化节点间无功联系的紧密程度,并基于此构建系统的能量灵敏度矩阵,最后利用多阈值分解方法对该矩阵进行电压控制区域划分。IEEE 30节点系统、118节点系统的仿真结果以及和传统分区方法的比较验证了所提方法的有效性和可行性。

**关键词:**静态能量函数; 能量信息; 节点能量相关度指标; 能量灵敏度矩阵; 多阈值分解

**Abstract:** Since the energy information can synthetically reflect the reactive injection and the voltage of node bus, a new voltage control partitioning method is proposed based on static energy function and multi-threshold search. With the energy information of node, the node energy correlation degree index (NECDI) is proposed to evaluate the reactive relevance between two nodes. Based on the NECDI, the energy sensitivity matrix (ESM) is established. In the end, the ESM is decomposed to get the voltage control area (VCR) by multi-thresholds search method. Simulation results in IEEE 30 and IEEE 118 bus systems and the comparison with the traditional partitioning method verifies the validity and practicability of the proposed method.

**Key words:** static energy function; energy information; node energy correlation degree index; energy sensitivity matrix; multi-threshold search

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)05-0005-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.05.002

## 0 引言

无功电压控制是电网安全控制的重要组成部分,对确保系统安全、稳定和经济运行具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。

由于无功传输的本地特性,系统内电压分布呈现明显的区域特点<sup>[3-4]</sup>,为保证各区域内电压运行在合理范围,充分发挥无功电源的控制作用,提高系统运行的安全性和经济性,将系统划分为多个相互解耦的无功电压控制区域已成为一个重要问题。

迄今为止,国内外学者对电压控制分区做了一定的研究,已经取得的研究成果主要包括:基于启发式方法的Tabu搜索法<sup>[5-6]</sup>,以分区中的节点数以及线路作为目标函数,以分区中的变压器、电容器数量作为约束条件进行优化,但该方法未考虑网络的物理特征且在系统较大时其计算量比较大。为减少大系统的优化分区计算量,文献[7]提出基于遗传算

法的两层搜索方法用于无功分区控制并取得了较好的效果。文献[8-10]利用图论的基本理论,提出阈值和多阈值分解法研究电压分区,该类方法可直接依据灵敏度矩阵来分析,简单直接,且具有实际意义<sup>[11]</sup>。文献[12-13]提出利用聚类算法研究电压控制分区,该方法将负荷节点映射到发电机节点组成的空间中,并基于此类空间数据对象的坐标定义电气距离,但映射后节点坐标的物理意义并不清晰。

以上方法为进一步研究电力系统的电压控制分区提供了极其重要的借鉴作用。由于节点能量状态能反映节点的无功注入及电压水平<sup>[13]</sup>,基于静态能量函数法,这里提出节点能量相关度指标(node energy correlation degree)量化节点间无功联系的紧密程度,并定义一个能够反映系统节点间无功、电压联系疏密程度的能量灵敏度矩阵(energy sensitivity matrix),最后利用多阈值分解方法对该能量灵敏度矩阵进行电压控制区域(voltage control area, VCA)划分。所提方法和思路的有效性和可行性在IEEE

30、IEEE 118 母线系统的仿真结果中得到了验证。

## 1 静态能量函数法和能量灵敏度矩阵

### 1.1 静态能量函数的数学模型

根据线路功率输送关系,多母线中各节点功率平衡等式<sup>[11]</sup>为

$$f_i(\delta, U) = P_{Li} - U_i \sum_{j=1}^n U_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (1)$$

$$g_i(\delta, U) = (U_i)^{-1} [Q_{Li} - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j))] \quad (2)$$

式中:  $P_{Li}$  为节点  $i$  的注入有功;  $Q_{Li}$  为节点  $i$  的注入无功;  $G_{ij}$  为节点  $i, j$  之间的电导;  $B_{ij}$  为节点  $i, j$  之间的电纳;  $\delta_i, \delta_j$  分别是节点  $i, j$  的电压相角。

静态能量函数表达式为<sup>[13]</sup>

$$E = \int_{(\delta^s, U^s)}^{(\delta, U)} [f(\delta, U) \quad g(\delta, U)] \begin{bmatrix} d\delta \\ dU \end{bmatrix} \quad (3)$$

对于具体的某个节点  $i$ , 基于功率平衡的静态能量函数表达式为

$$E_i = \int_{(\delta_i^s, U_i^s)}^{(\delta_i, U_i)} [f_i(\delta_i, U_i) \quad g_i(\delta_i, U_i)] \begin{bmatrix} d\delta_i \\ dU_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中  $f_i(\delta_i, U_i)$ 、 $g_i(\delta_i, U_i)$  分别为节点  $i$  的有功功率及无功功率平衡表达式。

将式(1)、式(2)代入式(4), 可得多母线系统中第  $i$  节点的静态能量函数  $E_i$  的表达式为

$$\begin{aligned} E_i &= \int [f_i \quad g_i] \cdot \begin{bmatrix} d\delta_i \\ dU_i \end{bmatrix} = \int_{(\delta_i^s, U_i^s)}^{(\delta_i, U_i)} [f_i \quad g_i] \cdot \begin{bmatrix} d\delta_i \\ dU_i \end{bmatrix} \\ &= P_{Li}(\delta_i - \delta_i^s) - U_i \sum_{j=1}^n U_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \Big|_{\delta_i^s}^{\delta_i} - \\ &U_i \sum_{j=1}^n U_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \Big|_{\delta_i^s}^{\delta_i} + \sum_{j=1}^n U_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \cdot \\ &U_i \Big|_{U_i^s}^{U_i} + Q_{Li} \ln \frac{U_i}{U_i^s} - \sum_{j=1}^n U_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \cdot U_i \Big|_{U_i^s}^{U_i} \quad (5) \end{aligned}$$

式中:  $(U_i, \delta_i)$  为当前运行情况下各个负荷节点电压值;  $(U_i^s, \delta_i^s)$  为系统处于稳定运行点的电压值。若代入临界参数值, 则  $E_i$  表示节点临界能量。

如果考虑并联电容器补偿, 式(5)修改为

$$\begin{aligned} E_{ci} &= \int_{(\delta_i^s, U_i^s)}^{(\delta_i, U_i)} [f_i \quad g_i] \cdot \begin{bmatrix} d\delta_i \\ dU_i \end{bmatrix} \\ &= P_{Li}(\delta_i - \delta_i^s) - U_i \sum_{j=1}^n U_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \Big|_{\delta_i^s}^{\delta_i} + \\ &Q_{Li} \ln \frac{U_i}{U_i^s} - U_i \sum_{j=1}^n U_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \Big|_{\delta_i^s}^{\delta_i} + \end{aligned}$$

$$\sum_{j=1}^n U_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) U_i \Big|_{U_i^s}^{U_i} - \sum_{j=1}^n U_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) U_i \Big|_{U_i^s}^{U_i} - \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{2} [(U_i)^2 - (U_i^s)^2] \quad (6)$$

### 1.2 能量灵敏度指标构建

依据式(5)、式(6), 无功注入集合  $Q$ 、电压  $U$  与能量  $E$  之间存在如图1的联系<sup>[13]</sup>。

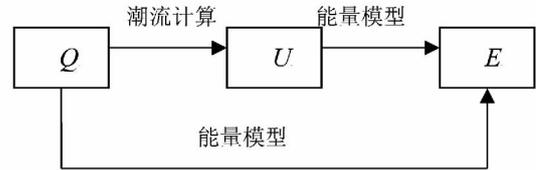


图1 无功注入集合、电压与能量之间的联系

利用静态能量函数法, 式(5) 可得到各负荷节点在稳定运行点时的能量值  $E_i$  及临界条件下的能量值  $E_{ci}$ 。随着负荷的持续增长, 电压呈不断下降的趋势, 稳态能量值亦逼近其极限能量值  $E_{ci}$ <sup>[14]</sup>。由图1, 节点电压通过能量模型影响节点的能量值, 同时节点的无功注入作为变量直接影响该节点的能量值。节点能量与电压以及无功注入之间的相互关系表征了该节点电压随能量变化的趋势。由能量函数模型确定的节点能量状态与节点的无功、电压水平密切相关, 节点能量值能综合体现该节点的无功及电压状态。

文献[14]提出节点能量灵敏度指标表示节点电压随能量的变化趋势, 并由该节点的能量/电压趋势指标判定系统的电压弱节点, 该能量灵敏度指标重在表征节点电压  $U_i$  变化对节点  $i$  能量值  $E_i$  的影响。

为进一步研究邻近节点电压  $U_j$  波动对节点  $i$  能量值的影响, 提出节点能量相关度指标  $\tau_{ij}$  来表示邻近节点间电压变化对本节点能量的影响:

$$\tau_{ij} = \frac{\partial E_i}{\partial U_j} (j = 1, 2, \dots, n, j \neq i) \quad (7)$$

由于能量值  $E_i$  综合反映了该节点的电压和无功注入水平,  $\tau_{ij}$  的大小表征了不同节点电压的变化对本节点能量值的影响, 因此  $\tau_{ij}$  的大小能够指示相邻节点与本节点无功相关的紧密程度, 亦即无功电压耦合程度。

### 1.3 能量灵敏度矩阵

由于节点的能量状态综合反映了该节点的无功以及电压水平, 基于这一思想, 构建一个与无功/电压水平紧密相关的能量灵敏度矩阵, 并基于此灵敏度矩阵进行 VCA 划分。

利用文献[14]构建的能量灵敏度指标及式(7)构建能量灵敏度矩阵D:

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\partial E_1}{\partial U_1} & \frac{\partial E_1}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial E_1}{\partial U_{n-1}} & \frac{\partial E_1}{\partial U_n} \\ \frac{\partial E_2}{\partial U_1} & \frac{\partial E_2}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial E_2}{\partial U_{n-1}} & \frac{\partial E_2}{\partial U_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial E_n}{\partial U_1} & \frac{\partial E_n}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial E_n}{\partial U_{n-1}} & \frac{\partial E_n}{\partial U_n} \end{bmatrix} \quad (8)$$

D是一个  $n \times n$  矩阵( $n$ 为系统节点数),其实质是以能量对电压灵敏度的形式反映了系统电压和无功的动态特性,该矩阵能分辨各相邻负荷点电压扰动对系统其他节点无功影响的差异。基于这一差异的大小,可将系统划分为若干解耦的区域。

D内各元素  $\tau_{ij}$ 反映的是节点  $i$  的电压波动对节点  $j$  能量值的影响,其大小表征了节点  $i, j$  的无功电压耦合程度。一般情况下  $\tau_{ij} \neq \tau_{ji}$ ,考虑到两节点的电气耦合对称性,基于能量信息的无功电压耦合函数为

$$S_{ij} = S_{ji} = \sqrt{\tau_{ij}^2 + \tau_{ji}^2} \quad (9)$$

式中  $S_{ij}$ 为节点  $i, j$  间的电气距离,其值反映了节点  $i, j$  间的电气距离大小。 $S_{ij}$ 越大,对应节点间的电气距离越小;反之节点间的电气距离越大。

## 2 多阈值的分区方法

阈值搜索分区方法是利用图论的基本理论并结合电力系统的结构特点来研究大系统的结构建模问题。其基本思想是<sup>[8]</sup>:将系统的变量用图的节点表示,各变量间的相互关系用连接相应节点的边表示,各变量间的耦合强度用赋予每一条边的权重系数表示,从而可将一给定系统用图的形式表示;然后给定一个阈值  $\alpha$ ,消去图中那些权重小于  $\alpha$  的边,并对完成消去操作后图的节点进行重新安排,将其中不相连的各个子图区分出来,则这些子图实际上就表示相互间的耦合强度小于或等于于阈值  $\alpha$  的子系统。这样,就可将一个系统分成若干个子系统。

为避免孤立节点的形成并真实地反应电网的实际情况,文献[10]及文献[11]提出一种更加符合电网实际运行状况的多阈值分解法用于电压控制分区,在理论和实践应用中取得了较好的效果。为终止搜索过程,根据聚类思想,取分区数量的限制条件为  $N_{\min} \sim N_{\max}$  为  $2 \sim 2\ln n$ <sup>[10]</sup>。

下面利用文献[11]相关思路分解能量灵敏度

矩阵D。其具体算法是对一个  $n \times n$  阶矩阵  $S$  进行多阈值分解,由于  $S$  是对称矩阵,只考虑上三角阵:

1) 将  $S$  中的所有非零元素按其绝对值从大到小排列,得到  $m_1 > m_2 > \dots > m_k$ ;

2)  $k=1$ ,  $\alpha_1 = m_1 - \varepsilon$ ,  $\varepsilon$  为任意小的正数,利用基本的阈值分解法得到阈值  $\alpha_1$  下的一种划分。确定分区个数  $N_k$ ,若  $N_k < N_{\min}$  或  $N_k > N_{\max}$  就继续;

3)  $k=k+1$ ,重复步骤2)至步骤3),从节点集合中除去已被划分的节点,由新的阈值划分剩余的节点子集合,直到分区个数满足要求为止。

另外,由于电压灵敏度矩阵的各元素本身体现了电压对能量的灵敏度信息,在选取区域内主导节点时,可依据区域内各节点在电压灵敏度矩阵中值的大小确定,即将区域内电压对能量的变化最敏感者确定为该区域的主导节点。

## 3 算例仿真

以 IEEE 30、IEEE 118 母线系统进行算例分析,以验证上述分区算法的有效性。

### 3.1 30 节点系统的分区结果

在 IEEE 30 节点系统的能量灵敏度矩阵中,  $m_1 = \max(S_{ij}) = 0.5341$ ,  $\varepsilon = 0.002$ 。表1给出了在能量电压灵敏度矩阵下的多阈值分区结果。

表1 ESM 下的多阈值分区计算结果

$k$	$\alpha_k$	分解结果
1	0.5321	(1, 2)
2	0.2425	(1, 2, 3, 4), (5, 7)
3	0.1969	(1, 2, 3, 4), (5, 6, 7, 9)
4	0.1805	(1, 2, 3, 4), (5, 6, 7, 9, 10)
5	0.0792	(1, 2, 3, 4, 12), (5, 6, 7, 9, 10), (22, 24)
6	0.0735	(1, 2, 3, 4, 12, 13), (5, 6, 7, 9, 10), (14, 15), (22, 24)
7	0.0597	(1, 2, 3, 4, 12, 13, 14, 15), (5, 6, 7, 9, 10), (19, 20), (22, 23, 24)
8	0.0516	(1, 2, 3, 4, 12, 13, 14, 15), (5, 6, 7, 9, 10, 11), (19, 20), (22, 23, 24), (28, 29)
9	0.0380	(1, 2, 3, 4, 12, 13, 14, 15, 16), (5, 6, 7, 9, 10, 11, 19, 20), (8, 22, 23, 24), (28, 29)
10	0.0203	(1, 2, 3, 4, 12, 13, 14, 15, 16), (5, 6, 7, 9, 10, 11, 18, 19, 20), (8, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 30)

最终获得的分区结果与文献[15]的结果对比如图2所示,图中实线、虚线分别是表示所提方法和

文献[15]中的方法。

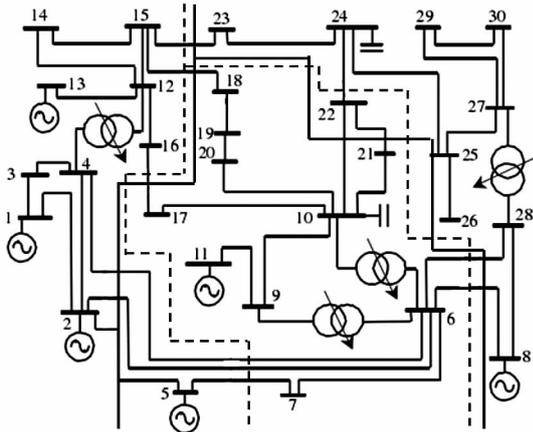


图2 IEEE 30节点系统分区结果

图2显示了基于ESM的分区结果和文献[15]的结果的差异。由图2可看出,两种分区方法结果基本一致,不同仅存在于对节点5和节点22的划分。这里将节点5和节点22分别归于区域2和区域3,而文献[15]将节点2和节点22分别归于区域1、2。

事实上仿真结果显示,电压能量灵敏度矩阵中  $S_{25} = 0.0025$ ,  $S_{57} = 0.4614$  表明节点7的电压波动对节点5将产生更大的影响,节点5和节点7之间的电气距离更近,节点2电压波动在节点5处产生的影响较节点7非常有限。因此,区域划分时应将节点5和7节点划归为一个区域。而文献[15]所

划分的区域1集中了6台发电机中的4台,为保证分区后各区域内发电机对本区域内电压的控制能力,所提方法将5号发电机归为区域2有其合理性。此外,文献[7]的分区结果在对节点5的处理上与所提方法一致。从另一侧面亦可验证所提方法结果的正确性。

### 3.2 118节点系统的分区结果

IEEE 118系统有54个发电机节点和64个负荷节点。利用ESM计算得到的最终分区数为6个,分区结果如图3虚线所示。

从图3所示的分区结果来看,利用ESM计算的仿真结果与文献[16]的基于复杂网络理论的分区算法及文献[17]利用的基于慢相关技术的分区结果基本一致。进一步分析区域间相联各支路的节点能量相关度指标  $\tau_{ij}$  发现,各相联节点间的  $\tau_{ij}$  已经非常小。以划分的区域1、2间的各边界支路为例,相联的各支路分别为(8,30)、(17,113)、(17,31)、(16,17)、(14,15),其  $\tau_{ij}$  值分别为0.0059、0.0005、0.0308、0.0048、0.0073。迭代终止时的阈值为0.0956。这些边界节点间的  $\tau_{ij}$  在迭代终止前依旧远小于迭代终止时的阈值,说明这些边界支路的电气距离很远,其相邻节点电压扰动对本节点的能量影响较小,因此各支路节点间的无功/电压的相互影响已非常有限。这一结果也说明所提分区方法能保

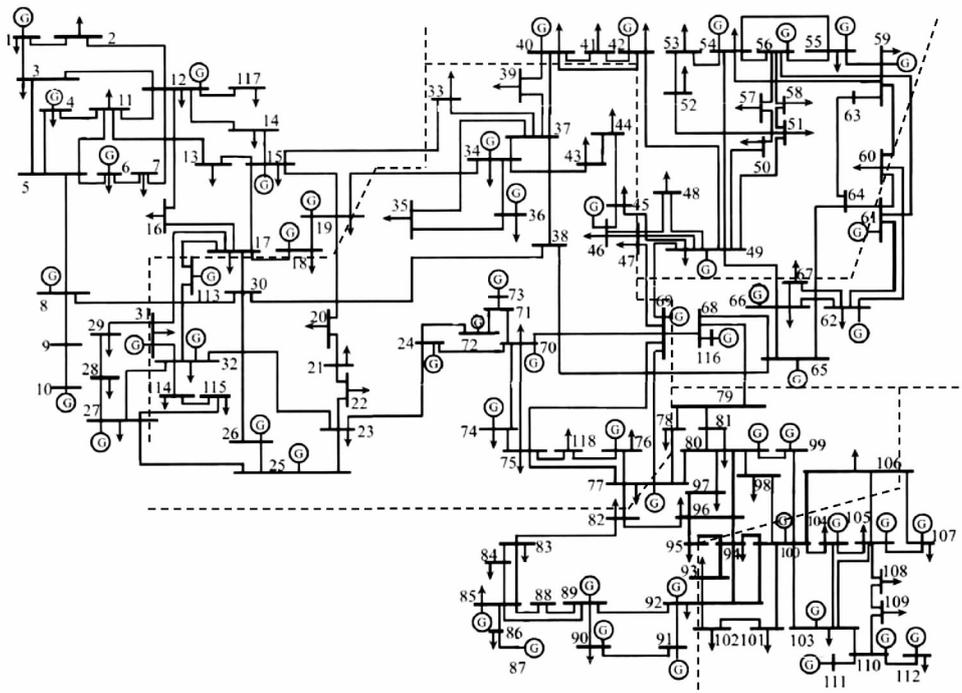


图3 IEEE 118节点系统分区结果

证划分的区域内部节点联系紧密,区域外部弱耦合。

### 3.3 分区时间

算法采用 MATLAB 6.1 编程实现,在 CPU 为 1.80 GHz、内存 1 GB 的 PC 机上运行。计算时间如表 2 所示(不包括潮流计算的时间,最终计算时间为多次计算后取均值)。

表 2 计算分区的时间

节点系统	计算时间/s
IEEE 30	0.856 0
IEEE 118	2.523 6

所提方法是基于静态能量函数的数学模型,得到 ESM 后进行 VCR 划分,静态能量函数的数学模型决定了利用所提算法进行分区的速度优越性。

## 4 结 论

基于静态能量函数的数学模型,提出节点相关度指标用于构建系统的能量灵敏度矩阵,基于此,利用多阈值分解法提出一种电压控制分区的新方法。理论分析和算例仿真结果表明:

1) 由静态能量函数构建的能量灵敏度矩阵能准确地反映各节点间电压和无功相关的紧密程度。最终划分的各区域满足“区域间弱耦合,区域内强联系”的分区要求,算例仿真的结果表明了该算法的有效性。

2) 静态能量函数的数学模型决定了所提算法在速度上的优越性。特别是在大型网络分区的计算上时间优势更加明显,可望用于分区的在线计算。

3) 所提出的基于能量灵敏度矩阵进行 VCR 划分的思想概念清晰,无需修改系统的网络模型,更接近实际运行的系统,较其他算法更易实现。

以上结论为无功电压控制分区方法提供了新的思路,对维护系统的电压稳定性具有现实意义。需要说明的是,由于能量函数的数学模型依赖系统的运行方式,其分区结果也取决于系统的运行方式。

### 参考文献

[1] 李宏仲,金义雄,程浩忠,等. 基于改进粒子群优化算法并计及静态电压稳定性的电力系统无功规划[J]. 电网技术, 2005, 29(22): 50-55.

[2] 盛戈峰,江秀臣. 基于多 Agent 的二级电压控制系统的实现及性能分析[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 42-

48.

[3] 冯光明,陆超,黄志刚,等. 基于雅可比矩阵的电压控制区域划分的改进[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(12): 7-11.

[4] Schlueter R A, Hu i, Chang M W, et al. Methods for Determining Proximity to Voltage Collapse [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1991, 6(1): 285-292.

[5] Chang C S, Lu L R, Wen F S. Power System Network Partitioning Using Tabu Search [J]. Electric Power Systems Research, 1999, 49(1): 55-61.

[6] 刘大鹏,唐国庆,陈珩. 基于 Tabu 搜索的电压控制分区[J]. 电力系统自动化, 2002, 18(3): 18-22.

[7] 胡泽春,王锡凡,王秀丽,等. 用于无功优化控制分区的两层搜索方法[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 37-41.

[8] 范磊,陈珩. 二次电压控制研究(一)[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(12): 20-24.

[9] 方鸽飞,刘君华,吕岩岩. 基于树形分布的电压控制分区[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(1): 83-87.

[10] 张忠静,陈刚,关仲,等. 基于阈值搜索和动态分散的电压/无功分区算法[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2006, 29(12): 52-55.

[11] 丁晓群,黄伟,章文俊,等. 基于电压控制区的主导节点电压校正方法[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 44-48.

[12] 夏道止. 电力系统分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[13] 刘群英,刘俊勇,刘起方. 基于能量信息的电压稳定性量化指标研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(8): 8-13.

[14] 郑武,李华强,陈静,等. 基于静态能量函数法确定交直流系统最优无功补偿点的确定[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(8): 45-49.

[15] Mori H, Takeda K. Parallel Simulated Annealing for Power System Decomposition [J]. IEEE Transactions on Power System, 1994, 9(2): 789-795.

[16] 倪向萍,阮前途,梅生伟,等. 基于复杂网络理论的无功分区算法及其在上海电网中的应用[J]. 电网技术, 2007, 9(31): 6-12.

[17] Yusof S B, Rogers G J, Alden R T H. Slow Coherency Based Network Partitioning Including Load Buses [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1993, 8(3): 1375-1382.

### 作者简介:

郑武(1986),研究方向为电力系统规划;  
康勇(1984),研究方向为计算机网络。

(收稿日期:2017-05-03)