

模糊聚类法在二级电压控制分区中的应用

王颖¹, 彭建春¹, 何禹清¹, 周春明¹, 张二飞¹, 郭冉²

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 湖南大学物理与微电子科学学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 电力网络分区常用于电力系统状态评估、稳定控制、电压控制等领域。使用模糊聚类分析方法解决二级电压控制中的分区问题。文章首先系统阐述了模糊聚类方法的原理, 然后基于无功源控制的思想, 以电网中的节点为分类对象, 每个无功源对其控制作用构成这个对象的特征指标, 并结合新英格兰 39 节点系统论证应用模糊聚类完成电网分区的步骤。验证结果表明该方法有效、可行。

关键词: 二级电压控制分区; 模糊聚类分析; 无功源控制

Application of fuzzy clustering in secondary voltage control partitioning

WANG Ying¹, PENG Jian-chun¹, HE Yu-qing¹, ZHOU Chun-ming¹, ZHANG Er-fei¹, GUO Ran²

(1. College of Electrical & Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. School of Physics & Microelectronics Science, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Power network partitioning can often be applied to state estimation, stability control, voltage control in electric power system. In this paper, an approach to solve the problem of voltage control decomposition by fuzzy clustering is proposed. This paper formulates the theory of fuzzy clustering. Based on the control of reactive power source, each node in electric network is regarded as a single object. A New England 39-bus system is used to verify the procedures of power network partitioning by fuzzy clustering, and the result show that the proposed method is effective and feasible.

Key words: reactive power/voltage control partitioning; fuzzy clustering analysis; control of reactive power source

中图分类号: TM715

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2008)11-0028-05

0 引言

随着电力互联网络的发展, 大型联合电网的出现, 使得电压稳定性问题日益突出, 各种防止电压失稳的措施被提出, 电压分级控制系统应运而生。该系统按照时间和空间将电压控制分为三个等级, 分别是: 设置在系统调度中心的三级电压控制; 设置在系统枢纽点的二级电压控制; 设置在发电厂、用户或各供电点的一级电压控制。作为连接三级电压控制和一级电压控制的二级电压控制, 是实现电力系统电压分级控制的关键环节^[1~3]。在二级电压控制中, 整个系统被划分若若干个近似解耦的控制区域, 如何分区成为一个重要课题。近年来, 用聚类方法研究分区已经成为一种趋势^[4~7]。文献[4]所提及的按照最大-最小电气距离合并的向上分级方法已经具有凝聚的系统聚类分析的思想, 只是并未从这一方面阐述。

本文借鉴文献[5]无功源控制的思想, 以电网中的节点为分类对象, 每个无功源对其的控制作用构成这个对象的特征指标, 然后使用模糊聚类分析方法对电网分区。文献[6]也使用模糊聚类方法分区, 本文与之不同点在于: 首先, 特征量的选取不同。文献[6]以节点间的电气距离为特征量, 而本文考虑了二级电压控制的具体过程, 以无功源对节点的控制作用为特征量。其次, 论域不同。本文考虑了 PV 节点与 PQ 节点响应过程的不同, 因此论域并非如文献[6]中的全体节点, 而只是 PQ 节点。

1 模糊聚类分析

1.1 概述

聚类就是按照一定的要求和规律对事物进行区分和分类的过程, 它把一个没有类别标记的样本集按某种准则划分成若干子类, 使相似的样本尽可能归为一类, 而不相似的样本尽量划分到不同的类中。

传统的聚类分析是一种硬划分,它把每个待辨识的对象严格地划分到某类中,具有“非此即彼”的性质,因此这种类别划分的界线是分明的。但实际上大多数对象并没有严格的属性,一个事物是否属于某一类,并不是泾渭分明的,这样模糊聚类分析就应运而生了。应用模糊数学的理论和进行分析的聚类分析就是模糊聚类分析^[8]。其在电力系统的应用主要集中在电力故障诊断、电力负荷预测、负荷建模等方面。

1.2 模糊聚类分析步骤

模糊聚类分析步骤可以概括为以下四步:原始数据准备,原始数据标准化,建立模糊相似矩阵,聚类。

原始数据准备是确定分类对象并抽取每个对象特性指标的过程。论域 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为被分类的对象,其中每个对象由能代表对象特征的 m 个数据表示,即

$x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\}, (i = 1, 2, \dots, n)$ 。这就形成了一个 $m \times n$ 的原始数据矩阵。

数据标准化是为了使量纲和数量级不同的特性指标统一。如果直接计算,可能会突出那些数量级特别大的特性指标对分类的作用,降低甚至排斥某些数量级较小的特性指标对分类的作用,导致分类结果不准确。目前常用的数据标准化方法有标准差标准化、极大值标准化、极差标准化、均值标准化、中心标准化、对数标准化等。本文在计算时采用均值标准化,下节详述。

建立模糊相似矩阵又称为标定,即用 $r_{ij} \in [0, 1] (i, j = 1, 2, \dots, n)$ 来衡量被分类对象 x_i, x_j 间的相似程度, $r_{ij} = 0$ 表示 u_i 和 u_j 截然不同, $r_{ij} = 1$ 表示 x_i 和 x_j 完全相同,这样就建立了论域 U 上的具有对称性和自反性的相似关系矩阵 R 。因为 R 具有对称性,在计算时可以只看对角线以下或以上部分。计算 r_{ij} 有多种方法,概括起来有相似系数法、距离法以及主观评分法。相似系数法包括数量积法、夹角余弦法、相关系数法、指数相似系数法、最大最小法、算术平均最小法、几何平均最小法。距离法包括绝对值倒数法、绝对值指数法、直接距离法。主观评分法是请专家直接对对象的相似程度评分,使用较少。具体计算时根据实际情况选择不同的方法即可。

聚类就是得到分类结果的动态过程,可以基于模糊相似矩阵直接聚类,也可以基于模糊等价矩阵聚类。具体说来基于模糊相似矩阵的直接聚类方法包括最大树法和编网法。基于模糊等价矩阵的方法

包括传递闭包法和布尔矩阵法,传递闭包法使用较多。对于相同的截值水平,以上几种方法得出的分类结果是相同的。本文使用传递闭包法,下面对此作较详细的说明。

1.3 基于模糊等价矩阵的传递闭包法

传递闭包法将模糊相似矩阵转换为模糊等价矩阵。具体方法是从 R 出发,依次求平方: $R \rightarrow R^2 \rightarrow R^4 \rightarrow \dots$,当第一次出现 $R^k \circ R^k = R^k$ 时,表明 R^k 已经具有传递性, R^k 就是所求的传递包 $t(R)$ 。对任意的 $\lambda \in [0, 1], [t(R)]_\lambda = (r_{ij}^\lambda)$ 为 $t(R)$ 的 λ 截矩阵,其中

$$r_{ij}^\lambda = \begin{cases} 1 & r_{ij} > \lambda \\ 0 & r_{ij} < \lambda \end{cases} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n)。$$

当 $r_{ij}^\lambda = 1$ 时,表示 i 节点与 j 节点归为一类。随着 λ 从大到小变化,分类从细到粗,是一个动态过程。

传递闭包法的运算量比较大,不适于手工分类,便于计算机程序设计。

2 模糊聚类方法在电压控制分区中的应用实例

2.1 概述

电力系统是一个相关联的整体,即使存在控制区域的划分,相邻的区域也必然是相互渗透、相互影响的,控制区域的划分是具有一定模糊性的。因此用模糊聚类分析方法解决电力系统无功电压控制分区问题具有实际意义。本文以新英格兰39节点系统为例,具体说明使用模糊聚类法解决电压分区问题的步骤。

2.2 原始数据准备

新英格兰39节点系统包括29个PQ节点,9个PV节点和1个平衡节点。忽略平衡节点影响,即把平衡节点也当作PV节点。待分类对象是系统中所有节点,但是在把修正方程转换为电压/无功灵敏度方程的过程时,PV节点是被当作PQ节点增广到方程中的,实际上PV节点与PQ节点的响应过程截然不同,所以本文的论域确定为系统中的29个PQ节点,即 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_{29}\}$ 。对PQ节点使用模糊聚类完成分区后,再考虑PV节点的归并。

然后确定描述每个待分类对象的特征向量,考虑到无功电压控制的实际过程,本文以每个发电机对负荷母线的控制能力为特征向量,即 $x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i10}\}$,其中 x_{ij} 表示第 j 号发电机对第 i 号负荷节点的灵敏度。具体解法如下:基于P-Q分解法的无功潮流迭代方程是

$$-L\Delta V = \Delta Q \quad (1)$$

这个方程中的 ΔV 和 ΔQ 都是对负荷母线 (PQ 节点) 的, 若将发电机母线 (PV 节点) 增广到上面的修正方程中, 并用下标 D、G 分别表示负荷母线和发电机母线, 于是有

$$-\begin{bmatrix} L_{DD} & L_{DG} \\ L_{GD} & L_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_D \\ \Delta V_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta Q_D \\ \Delta Q_G \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: L_{DD} 即为不包含平衡节点和 PV 节点对应行和列的导纳矩阵 B' , L_{DG} 和 L_{GD} 是发电机母线和负荷母线之间的互导纳, L_{GG} 是发电机母线自导纳。由式 (2) 求出 ΔV 和 ΔQ 的关系式

$$\begin{bmatrix} \Delta V_D \\ \Delta V_G \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} L_{DD} & L_{DG} \\ L_{GD} & L_{GG} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta Q_D \\ \Delta Q_G \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{令 } \begin{bmatrix} X_{DD} & X_{DG} \\ X_{GD} & X_{GG} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} L_{DD} & L_{DG} \\ L_{GD} & L_{GG} \end{bmatrix}^{-1} \quad (4)$$

当发电机无功出力变化时, 假定负荷母线无功不变, 即 $\Delta Q_D = 0$, 则有

$$\Delta V_D = X_{DG} \Delta Q_G \quad (5)$$

X_{DG} 是 ΔV_D 和 ΔQ_G 之间的灵敏度矩阵, 它有阻抗的量纲, 是将 B' 增广后矩阵的逆中发电机节点和负荷节点相关的部分子矩阵。在以往的计算中 X_{DG} 是一次性求出的, 这未考虑 PV 节点的准稳态物理响应过程。本文采用文献[15]提出的构造无功源控制空间的方法, 对每个发电机逐步求解。在 39 节点系统中, 假设 10 个发电机节点都安装有 AVR, 构成集合 G; 29 个待分区负荷母线构成集合 D。求解某一台发电机 A 对其余节点的灵敏度时, A 设定为 PQ 节点, 其余发电机节点设为 PV 节点。当计算灵敏度时, 在包含 PV 节点和平衡节点的全维导纳矩阵 B 中与 PV 节点对应的对角元上加大大数, 以保证该节点机端电压不变。构造了这样的全维导纳矩阵后, 再按照公式 (4) 求出 X_{DG} , 就完成了发电机 A 对系统中负荷节点的灵敏度求解。以此方法依次计算其他发电机节点对负荷节点的灵敏度。这样就得到原始数据矩阵 $X_{(29 \times 10)}$ 。值得注意的是, 在二级电压控制中, 无功源应包括能按要求为系统提供电压/无功支持的发电机、可投切电容、SVC 等, 本文只考虑了发电机, 利用相同的思路, 可方便扩展到其他无功源, 只需在无功源空间中增加相应维数即可。

2.3 原始数据标准化

采用均值标准化方法对 $X_{(29 \times 10)}$ 进行标准化处理, 即

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_j} \quad (6)$$

其中: y_{ij} 是标准化后的数据, \bar{x}_j 是列数据的平均值。处理后, Y 中的元素统一在一个共同的数据特性范围内。

2.4 建立模糊相似矩阵

采用绝对值指数法计算, 得到相似矩阵 $R_{(29 \times 29)}$, 矩阵 R 中各元素为

$$r_{ij} = \exp\left(-c \sum_{k=1}^{10} |y_{ik} - y_{jk}|\right), \text{ 式中 } r_{ij} \text{ 为负荷节点 } i \text{ 与负荷节点 } j \text{ 的相似或接近程度, } 0 \leq r_{ij} \leq 1; c \text{ 为特定的正数, 取值使 } r_{ij} \text{ 分布在 } [0, 1] \text{ 内, 本例中取 } c=1.$$

2.5 聚类

采用基于模糊等价关系的传递闭包法聚类。对于描述负荷节点间相似程度的模糊相似矩阵 $R_{(29 \times 29)}$, 经编程运算得传递闭包矩阵 $t(R) = R^8$ 。在阈值 $\lambda \in [0, 1]$ 下, 选取不同 λ 就可以得到不同的 λ 水平截矩阵, 每一个代表一种聚类。当 λ 从 1 变化到 0 时, 分类数从 n 类变到 1 类, 是一个动态过程。表 1 给出了动态分区结果。

表 1 动态分区结果

Tab.1 Dynamic clustering result		
k	λ	分区结果
1	$\lambda = 1$	
2	$\lambda = 0.909$	{7, 8}
3	$\lambda = 0.792$	{5, 6, 7, 8}
4	$\lambda = 0.607$	{5, 6, 7, 8}, {11, 12}
5	$\lambda = 0.431$	{5, 6, 7, 8}, {10, 11, 12, 13}
6	$\lambda = 0.243$	{5, 6, 7, 8}, {10, 11, 12, 13}, {16, 24}
7	$\lambda = 0.188$	{5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13}, {16, 24}
8	$\lambda = 0.174$	{5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13}, {16, 24}, {4, 14}
9	$\lambda = 0.135$	{5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13}, {16, 24}, {4, 14}, {17, 18}
10	$\lambda = 0.123$	{5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13}, {15, 16, 24}, {4, 14}, {17, 18}
11	$\lambda = 0.111$	{5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13}, {15, 16, 24}, {4, 14}, {17, 18}, {28, 29}
12	$\lambda = 0.101$	{4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14}, {15, 16, 24}, {17, 18}, {28, 29}
13	$\lambda = 0.052$	{4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14}, {15, 16, 17, 18, 21, 24}, {28, 29}
14	$\lambda = 0.04$	{4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14}, {15, 16, 17, 18, 21, 24}, {26, 27}, {28, 29}

续上表

k	λ	分区结果
15	$\lambda=0.039$	{4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14}, {3, 15, 16, 17, 18, 21, 24}, {26, 27}, {28, 29}
16	$\lambda=0.03$	{4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14}, {3, 15, 16, 17, 18, 21, 24, 26, 27}, {22, 23}, {28, 29}
17	$\lambda=0.015$	{4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14}, {3, 15, 16, 17, 18, 21, 24, 26, 27}, {28, 29}, {22, 23}
18	$\lambda=0.011$	{4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14}, {2, 3, 15, 16, 17, 18, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27}, {28, 29}
19	$\lambda=0.008$	{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 21, 22, 23, 24, 26, 27} {28, 29}
20	$\lambda=0.004$	{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27}, {28, 29}
21	$\lambda=0.002$	{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27}, {1, 9}, {28, 29}
22	$\lambda=0.001$	{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27}, {1, 9}, {19, 20}, {28, 29}
23	$\lambda=0$	{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29}

为简略起见,表1所列的分区结果未包含单一节点的子区,称这样的单一节点为孤立节点。由表1可知,孤立节点是相对的,随着相似水平的降低,孤立节点逐步减少。孤立节点1、2、9、25、19、20等,合并成区较晚,原因是这些节点远离负荷中心,且某台发电机对其的控制作用远远超过其他发电机,导致它们的相似性与其他节点相差较多。鉴于此,本文最终的分区结果并不是基于同一阈值水平的。

3 分区结果的调整

通过以上步骤计算出的分区结果只完成了数学意义上的聚类,即仅实现了区域间弱耦合、区域内强耦合的要求,而没有考虑实际的物理因素。在进行实际的无功电压分区时还需要考虑:分区数目应该适中,分区过多不实际,分区过少起不到分区控制的作用;每个电压控制区的规模适中,规模过大

不好控制,规模过小不易实现;每个控制区内的无功储备要充足。而且以上的聚类分析是针对PQ节点的,还需进一步考虑PV节点的归并。因此需要对表1得到的结果进行调整,在某一阈值水平 $\lambda=0.011$ 下,系统被分为{1}、{2, 3, 15, 16, 17, 18, 21, 22, 23, 24, 26, 27}、{4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14}、{9}、{19}、{20}、{25}、{28, 29}这八个区域,其中有五个孤立节点,通过参考其他阈值水平进行归并, $\lambda=0.004$ 时,节点25并入区域2; $\lambda=0.002$ 时,节点1、9合并; $\lambda=0.001$ 时,节点19、20合并。PV节点合并的原则是:PV节点对哪个PQ节点的控制作用最强,就将其合并到该PQ节点的所在区域。本例中,除39节点同两个PV节点连接外,其余发电机节点均只与一个PV节点直接相连,这些发电机对与之相连的PQ节点控制作用是最强的,而经观察控制矩阵得出39节点对节点9控制作用最强。再对初步分区的有功、无功裕度进行计算,不满足则调整。最终系统分为{1, 9, 39}、{2, 3, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 30, 35, 36, 37}、{4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 31, 32}、{19, 20, 33, 34}、{28, 29, 38}五个区域。图1为这种方案的示意图。

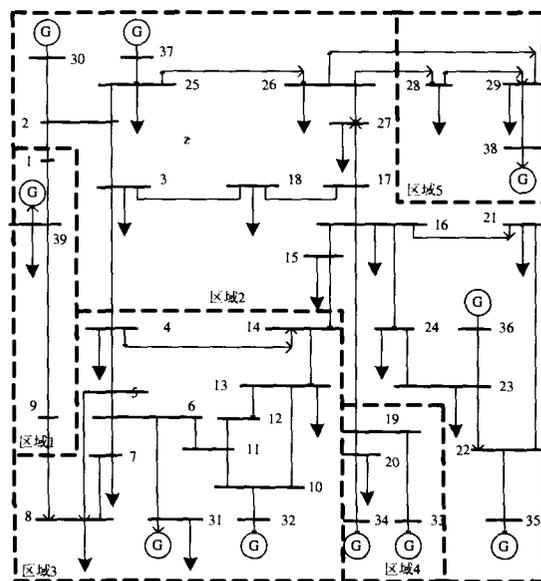


图1 新英格兰39节点5分区示意图

Fig.1 Sketch map of New England 39-bus system with 5-area partitioning

从分区结果看,远离负荷中心的节点所形成的区域较小,负荷中心的节点较为集中,形成的区域较大。每个分区所包含的节点相互邻近,没有不相邻节点位于同一区域的情况,这说明本文采用以无

功源对节点的控制作用作为描述节点的特征是合理的。把本文分区结果与文献[6]结果比较,两种方法所得结果是相似的,文献[6]基于图论的嵌套分区法主要考虑的是电压稳定,而本文是从发电机的控制作用出发,二者的侧重点不同,因而具体分区结果略微不同,两种方法分区结果的相似从另一侧面证明本文方法是有效的。

4 结论

本文以发电机对负荷节点的控制作用作为每个PQ节点的特征,即用能反映节点受控情况的物理量来描述节点,这样做的原因是:在二级电压控制过程中,当系统母线电压变化时,自动电压控制系统通过调整发电机的无功出力消除中枢母线电压变动。因此发电机对母线的控制作用就显得格外重要。在确定了系统负荷母线的特征向量后,经过对数据的标准化处理、构造相似矩阵、传递闭包法得到等价矩阵、选取不同的阈值聚类这几个步骤,最终将具有相同受控情况的节点聚为一类,达到了分区目的。其中动态聚类的过程有助于逐步观察各负荷母线的亲疏程度,从而得到全面精准的分区结果。对新英格兰39节点系统的计算验证了本文方法的合理性与有效性。

参考文献

- [1] Paul J P, Leost J Y, Tesseron J M. Survey of the Secondary Voltage Control in France: Present Realization and Investigations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(2): 505-511.
- [2] Stankovic A, Ilic M, Maratukulam D. Recent Results in Secondary Voltage Control of Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(1): 94-101.
- [3] Sancha J L, Fernandez J L, Cortes A, et al. Secondary Voltage Control: Analysis, Solutions and Simulation Results for the Spanish Transmission System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 630-635.
- [4] 王耀瑜, 张伯明, 孙宏斌, 等. 一种基于专家知识的电力系统电压/无功分级分布式优化控制分区方法[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(3): 221-224. WANG Yao-yu, ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin, et al. An Expert Knowledge Based Gubarea Division Method for Hierarchical and Distributed Electric Power System Voltage/var Optimization and Control [J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(3): 221-224.
- [5] 郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 等. 基于无功源控制空间聚类分析的无功电压分区[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 36-40. GUO Qing-lai, SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, et al. Power Network Partitioning Based on Clustering Analysis in Mvar Control Space[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 36-40.
- [6] 杨秀媛, 董征, 唐宝, 等. 基于模糊聚类分析的无功电压控制分区[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 6-10. YANG Xiu-yuan, DONG Zheng, TANG Bao, et al. Power Network Partitioning Based on Fuzzy Clustering Analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(22): 6-10.
- [7] LIANG Cai-hao, DUAN Xian-zhong. A Clustering Validation Based Method for Zone Number Determination in Network Partitioning for Voltage Control[J]. IEEE CNF, 2004, 2(1): 727-731.
- [8] 李鸿吉. 模糊数学基础及实用算法[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 208-221.

收稿日期: 2007-09-26; 修回日期: 2007-11-14

作者简介:

王颖(1982-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行与控制; E-mail: wangy177@126.com

彭建春(1964-), 男, 博士生导师, 主要从事电力市场、电力系统优化运行、规划及其应用软件的开发等方面的研究工作;

何禹清(1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行与控制。

(上接第27页 continued from page 27)

参考文献

- [1] 刘让雄, 杨春江, 等. 电容补偿装置中电抗器烧损原因与保护措施[J]. 高电压技术, 1999, 25(3): 78-80. LIU Rang-xiong, YANG Chun-jiang, et al. The Causes of Damage of Reactor in Capacitor Compensation Device and Protection Measures[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(3): 78-80.
- [2] 杨昌兴, 华水荣. 关于并联电容器用串联电抗器的保护问题[J]. 电力电容器, 2000, (1): 19-22. YANG Chang-xing, HUA Shui-rong. The Protection Problem of Series Reactor Used for Parallel Capacitors[J].

Electric Power Capacitor, 2000, (1): 19-22.

- [3] 王维俭. 电力系统主设备保护及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.

收稿日期: 2007-02-01; 修回日期: 2008-04-07

作者简介:

林国松(1974-), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为变电站综合自动化系统和故障测距; E-mail: linguosong@tom.com

李梦和(1976-), 男, 讲师, 硕士, 研究方向为计算机实时控制与仿真。