

# 基于配电网拓扑结构聚类的设备改造分区划分研究

王旭阳, 李红军, 宋毅

(国网北京经济技术研究院, 北京 100052)

**摘要:** 目前, 配电网设备改造计划安排主要依据设备的健康水平、运行年限等指标, 改造项目间的协调优化尚有欠缺, 分散无序的改造会导致配电网运行存在安全隐患。提出设备运行状态评分指标, 利用改进凝聚聚类分析技术对配电网设备改造需求进行分析, 用配电网拓扑结构联络关系作为约束判据, 将需要改造的设备进行聚类分区划分。算例分析表明基于配电网拓扑结构聚类的设备改造分区划分方法优于传统的设备改造计划安排, 能够统筹设备改造各类影响因素, 为改造项目时序安排提供有效依据。

**关键词:** 设备改造; 设备状态水平; 配电网拓扑结构; 聚类分析; 改造分区

## Area division research of equipment transformation based on distribution network topology

WANG Xu-yang, LI Hong-jun, SONG Yi

(State Power Economic Research Institute, Beijing 100052, China)

**Abstract:** Equipment transformation programs primarily depend on the health level, operation life and other indicators of equipment. And now, it is still lacking of coordination and optimization between these transformation projects. This paper uses agglomerative clustering technology to analyze the transformation requirements. A marking index of equipment operating status and contact relationships between equipment are proposed as constraints to cluster the data of transformation. The experimental result shows that the partitions of equipment transformation divide method, which is based on distribution network topology, is better than traditional programs. It provides an effective basis for the transformation projects.

**Key words:** equipment transformation; equipment operating status; distribution network topology; cluster analysis; transformation division

中图分类号: TM715      文献标识码: A      文章编号: 1674-3415(2014)11-0013-08

## 0 引言

设备改造是对现有落后的变压器、开关设备、线路等电网主要设备以及配套辅助设施进行的完善、配套或整体更新改造, 对保障配电网安全运行至关重要。目前, 配电网设备改造项目计划安排主要依据设备健康水平、运行年限与改造需求的紧急程度进行制定, 尚未考虑项目之间协调优化, 尤其是 10 kV 中压配电网具有结构复杂、设备数量庞大的特点, 分散改造存在改造工作量大、安排停电或负荷转带次数多、停电损失大、用户供电可靠性降低等问题。

聚类分析根据样本(或指标)间的相似性, 将彼此之间相似程度较大的样本聚合为一类, 形成一个层次分明的分类系统。聚类分析一般采用欧氏距离度量对象间的相似性, 但仅依靠几何平均距离的相近性并不能充分保证时间序列的形态或轮廓的相

似性<sup>[1-3]</sup>。层次聚类算法, 特别是凝聚式算法在计算上简单快捷, 且能够得到相近的最终结果, 其应用较为广泛<sup>[4-5]</sup>。

本文选用改进凝聚算法(agglomerative), 基于设备运行状态评分指标的聚类分析, 以配电网拓扑结构联络关系作为约束判据, 采用将设备指标分组的方式, 自下而上对设备改造进行聚类, 将配电网内需要改造的设备划入不同的改造区域, 对于不同改造分区内的设备可考虑同时开展改造安排, 对同一改造分区内的设备, 按照改造需求的轻重缓急进行统一改造规划安排, 为配电网改造建设时序安排提供有效依据。

## 1 基于值距离的改进凝聚聚类算法

凝聚聚类算法根据数据值之间距离的远近来判断数据之间的关系(相似性), 将邻近数据聚合为若干个簇, 进而对数据簇进行自下而上的聚类<sup>[6-9]</sup>。

各簇中的数据应该满足同簇内的数据差异度最小、不同簇内的数据差异度最大的原则。通常将配电网设备改造数据表示为  $m$  行  $n$  列的数据矩阵  $\mathbf{X}$ , 在计算数据间距离时, 一般将其视为  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_m$  个行相量, 两个相量间的相似度用  $d_{st}$  度量。  $d_{st}$  表示相量  $\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_t$  的距离, 一般要求:

- 1) 对任意的  $s, t, d_{st} \geq 0$ ; 当  $d_{st}=0$  时,  $\mathbf{x}_s=\mathbf{x}_t$ ;
- 2) 对任意的  $s, t, d_{st}=d_{ts}$ ;
- 3) 对任意的  $s, t, k, d_{st} \leq d_{sk}+d_{kt}$ 。

### 1.1 改进凝聚聚类算法

目前常用的聚类算法有基于划分和分层两类方法, 传统的聚类算法一般存在难于确定聚类中心、高维空间存在无关维而掩盖有效簇、易产生无意义簇等缺点。本文选用内平方距离法, 通过观察聚类过程中数据簇误差平方和的变化, 准确反映簇的凝聚度, 快速确定初始聚类中心, 自下而上的对数据进行凝聚聚类。可以有效避免常用聚类算法的一些不足, 如相邻的对象可能作为不同类的中心点而被分开。

将数据簇视为包含着  $n$  个相似数据的圆形集合, 内平方距离 (Ward) 是指用两个数据簇内数据的欧氏距离总平方和作为两个数据簇间的距离, 要求数据间距离必须是欧氏距离, 其基本思想来自于方差分析, 公式表示为

$$d(v, w) = \sqrt{\frac{2n_v n_w}{(n_v + n_w)} \|\bar{\mathbf{x}}_v - \bar{\mathbf{x}}_w\|_2^2} \quad (1)$$

式中:  $v, w$  为包含着不同数据的数据簇;  $n_v, n_w$  分别为数据簇  $v, w$  中包含的数据个数;  $\bar{\mathbf{x}}_v, \bar{\mathbf{x}}_w$  分别为数据簇  $v, w$  的中心;  $\|\bar{\mathbf{x}}_v - \bar{\mathbf{x}}_w\|_2$  为数据簇间欧式距离, 适用于 2、3 维空间, 表示两点之间最短距离。对于数据簇, 其欧式距离为数据簇中心数据相量之间的最短距离,  $d_{vw}^2 = (\bar{\mathbf{x}}_v - \bar{\mathbf{x}}_w)(\bar{\mathbf{x}}_v - \bar{\mathbf{x}}_w)'$ 。

### 1.2 相关系数评价方法

相关系数 (cophenetic) 是用来对聚类结果进行校验的指标。对于实际的对象和具体的应用, 不同的距离计算方法, 会产生多个具有不同分叉的可供决策参考的分类结果。相关系数能够检验一定算法下产生的聚类结果和实际情况的相符程度, 即检测聚类中各元素间的距离和计算产生的实际距离之间的相关性。

相量  $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$  的相关系数表示为

$$c_{ij}(2) = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)}{\left\{ \left[ \sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)^2 \right] \left[ \sum_{k=1}^n (x_{kj} - \bar{x}_j)^2 \right] \right\}^{1/2}} \quad (2)$$

相关系数的大小反映了聚类效果的好坏, 相关系数越接近于 1, 说明聚类效果越好。可通过相关

系数验证对比各种不同的距离计算方法和不同的系统聚类的聚类效果, 选择合理的聚类划分结果。

## 2 设备评分指标

设备评分指标包括设备状态水平评分指标与基于配电网拓扑结构的设备联络评分指标。对设备状态进行评分所依据的信息称为设备状态指标, 文献[10-11]提出了包括设备运行年限、健康水平、是否存在家族质量缺陷或老化缺陷等在内的各类状态指标, 此类指标的评分能够直观真实地反映出设备的运行状态, 是设备改造分区划分的首要考虑因素; 设备间联络状态评分指标, 基于配电网拓扑结构反映了设备间转供转带负荷的能力, 是设备改造分区划分的约束判据。

### 2.1 设备健康水平评分指标

对设备健康水平评分, 分值为 0~1。0 分则表示所有预试数据均远离注意值或与优质产品的出厂值相近, 且既没有经历不良工况, 又没有家族质量缺陷史, 无需改造更换; 1 分表示设备需要立即安排改造; 其他情形的状态评分介于 0 分与 1 分之间。以断路器设备为例, 由于油断路器在故障情况下存在爆炸的危险性, 且电网中现存的多油或少油断路器均已运行多年, 应改造更换为无油断路器。因此, 断路器是否含油是断路器设备改造的重要判据, 油断路器评分为 0, 无油断路器评分为 1。

对于电网内主要设备, 如变压器、线路、断路器等, 可将设备状态信息划分为两个层次, 以变压器为例, 其中一级指标有电气试验、油中溶解气体色谱分析、油质试验, 每个一级指标下又包含着多个二级指标。对一级指标下的各项二级指标评分求平均值, 得到一级指标的评分值。将一级指标评分求加权平均值, 得到变压器健康水平评分<sup>[12-13]</sup>。

### 2.2 设备运行年限评分指标

变压器、线路、开关设备的设计寿命一般为 30 年, 对设备运行年限评分公式为

$$t = C / L \quad (3)$$

式中:  $C$  为设备运行实际年限;  $L$  为设备设计寿命。设备运行年限评分指标准确直观地反映了设备老旧程度, 是指导设备改造更换的重要判据之一。

### 2.3 设备缺陷评分指标

设备缺陷对电网安全生产运行影响极大, 是影响设备改造的重要因素。导致设备需要改造的缺陷包括家族性缺陷和在重要试验项目、检修中发现的状态评价为严重状态的缺陷。设备缺陷评分, 分值为 0 和 1。0 分表示既没有经历不良工况后产生的缺陷, 又没有家族性缺陷, 无需改造更换; 1 分表示设备经检修存在严重缺陷, 需优先安排改造更换。

### 2.4 基于配电网拓扑结构的设备联络评分指标

根据变电站、断路器及线路在配电网中位置与互联关系, 对设备联络指标评分。联络指标评分分值为 0、1、50 和 100, 其中 0 分表示联络设备为设备自身, 1 分表示两个设备之间具有直接联络关系, 50 分表示设备之间具有间接联络关系, 100 分表示设备之间无联络关系。设备联络指标通常以矩阵形式表示, 可以清晰地以数据形式反映配电网的网络拓扑结构与设备间转供转带负荷的能力。

### 3 基于设备评分指标的改造分区聚类分析

基于配电网设备评分指标的改造聚类分区划分在设备评分指标数据基础上, 形成设备间联络指标矩阵和设备运行状态水平指标矩阵, 选用改进凝聚法, 通过逐步融合数据点, 自下而上地获得聚类。经相关系数评价后, 综合考虑两类指标地影响因素, 将配电网划分为若干个相对独立又能互送电力的改造分区, 以达到各个分区内能够协调开展新建、改造项目, 同时对电网供电能力影响最小的目的。改造分区划分流程如图 1。

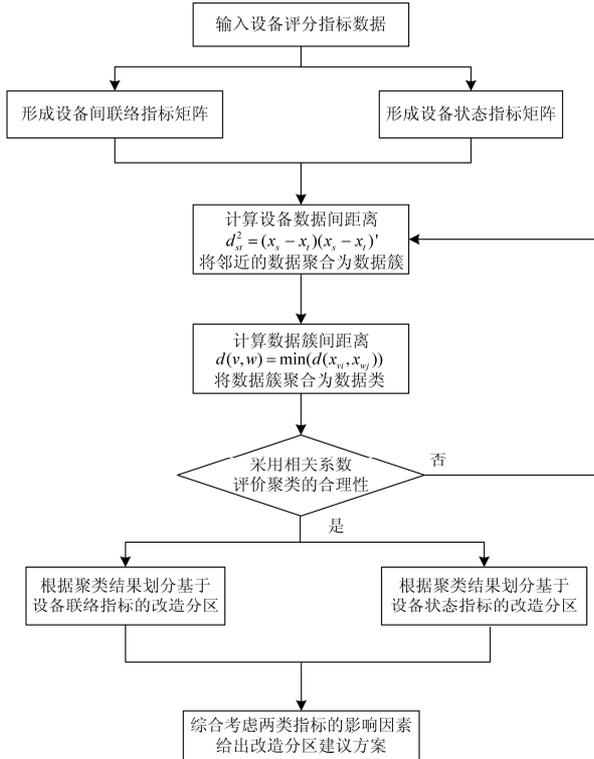


图 1 基于设备评分指标的改造分区聚类划分流程

Fig. 1 Flow diagram of transform district division based on the equipment status

### 3.1 基于设备状态评分指标的 110 kV 电网改造分区聚类分析

以某地区配电网为例, 110 kV 网络拓扑结构如

图 2 所示, 网络中包含 T1~T6 共 6 个 110 kV 变电站和 L1~L6 共 6 条 110 kV 架空线, 其中 T2~T5 变电站之间构成环网联络。

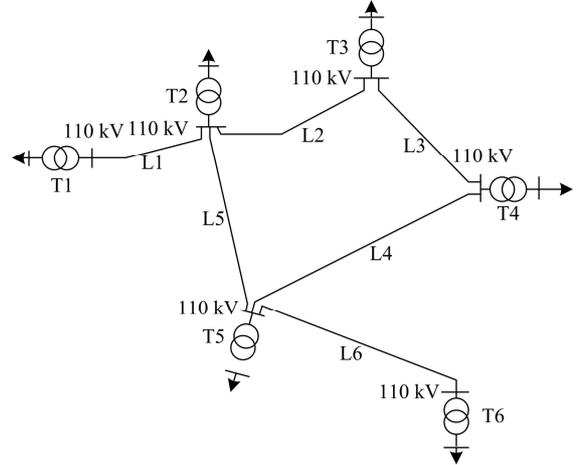


图 2 110 kV 电网拓扑结构图

Fig. 2 110 kV grid topology diagram

统计示例电网中 110 kV 变压器、线路设备的状态水平指标, 包括设备的运行年限、健康水平、是否存在缺陷 3 个状态量, 设备指标经评分后, 可得到  $12 \times 3$  的设备状态矩阵  $Y$  为

	年限	健康	缺陷
$T_1$	0.28	0.17	0
$T_2$	0.72	0.82	0
$T_3$	0.34	0.42	0
$T_4$	0.62	0.43	0
$T_5$	0.61	0.56	1
$T_6$	0.12	0.1	0
$L_1$	0.89	0.72	0
$L_2$	0.69	0.56	1
$L_3$	0.44	0.32	0
$L_4$	0.53	0.47	0
$L_5$	0.88	0.79	1
$L_6$	0.11	0.09	0

应用凝聚聚类法根据聚类计算结果将设备状态水平指标数据聚合为 4 类, 详细分类结果如表 1 所示。

聚类方案在配电网拓扑图的划分结果如图 3 所示。

表 1 110 kV 设备聚类结果

Table 1 Clustering results of 110 kV equipment

方案	距离计算方法	聚类划分结果	相关系数
1	数据间距离: Euclidean 数据簇间距离: Ward	C1={T1, T6, L6} C2={T3, T4, L2, L3, L4} C3={T5, L5} C4={T2, L1}	0.89

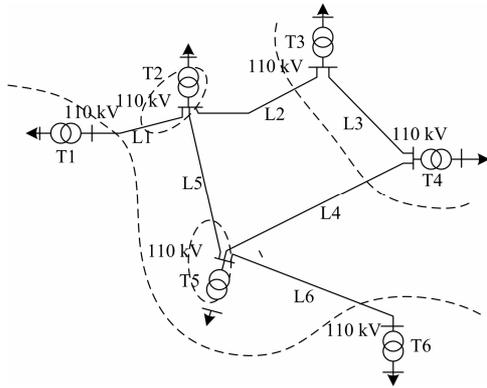


图 3 基于设备状态水平指标的聚类划分示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of clustering division based on the level of equipment status

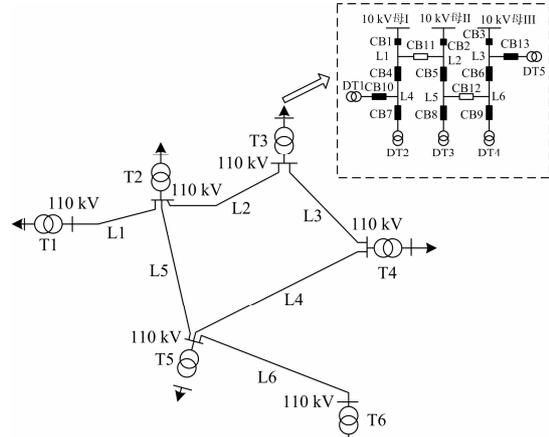


图 4 10 kV 电网拓扑结构图  
Fig. 4 10 kV grid topology diagram

### 3.2 基于设备状态评分指标的 10 kV 电网改造分区聚类分析

10 kV 电网具有结构复杂、设备数量庞大等特点，以图 4 中 T3 变电站所联络的 10 kV 电网为例，截取典型的多分段适度联络网络拓扑结构如图 5~图 9 所示，网络中包含 DT1~DT5 共 5 台配变、L1~L6 共 6 条输电线路、CB1~CB13 共 13 台开关设备。

算例以 110 kV 变电站低压侧 10 kV 母线的供电

区域为基本改造单元，统计区域内设备运行年限、健康水平等指标，分别求取各类设备指标评分加权平均值，作为基本改造单元的运行状态指标。以图 4 中 T3 变电站低压侧 10 kV 配电网改造单元 D3 的各类设备运行状态指标评分为例，如表 2 所示。同理，可得 T1~T5 变电站低压侧 10 kV 配电网改造单元 D1~D5 运行状态指标评分，如表 3 所示。

表 2 T3 变电站低压侧 10 kV 配网改造单元主设备指标

Table 2 Index of transformation unit which belongs to T3 substation

指标类型	单台设备指标评分	指标评分加权均值
配电变压器运行年限指标	DT1=5/30; DT2=8/30; DT3=13/30; DT4=21/30; DT5=7/30;	0.36
配电变压器健康水平指标	DT1=0.21; DT2=0.43; DT3=0.61; DT4=0.72; DT5=0.26;	0.45
断路器运行年限指标	CB1=2/30; CB2=6/30; CB3=12/30; CB4=9/30; CB5=11/30; ...	0.32
是否为油断路器指标	CB1=0; CB2=0; CB3=1; CB4=0; CB5=0; ...	0.21
线路运行年限指标	L1=2/30; L2=5/30; L3=12/30; L4=6/30; L5=14/30; ...	0.28

表 3 各 110 kV 变电站低压侧 10 kV 配网改造单元主设备指标

Table 3 Index of transformation unit which belongs to T1-T5 substation

项目	配电变压器 运行年限	配电变压器 健康水平	断路器 运行年限	油断路器 占比	线路运行 年限
D1:T1 变电站所带 10 kV 配网	0.28	0.25	0.23	0.02	0.27
D2:T2 变电站所带 10 kV 配网	0.80	0.72	0.63	0.33	0.57
D3:T3 变电站所带 10 kV 配网	0.36	0.45	0.32	0.15	0.28
D4:T4 变电站所带 10 kV 配网	0.55	0.48	0.46	0.23	0.49
D5:T5 变电站所带 10 kV 配网	0.72	0.63	0.54	0.32	0.55
D6:T6 变电站所带 10 kV 配网	0.24	0.21	0.19	0.01	0.18

根据表 3, 10 kV 配电网 D1~D5 改造单元运行状态指标可表示为 6×5 的矩阵 Z:

$$Z = \begin{matrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \\ D_5 \\ D_6 \end{matrix} \begin{pmatrix} 0.28 & 0.25 & 0.23 & 0.02 & 0.27 \\ 0.80 & 0.72 & 0.63 & 0.33 & 0.57 \\ 0.36 & 0.45 & 0.32 & 0.15 & 0.28 \\ 0.55 & 0.48 & 0.46 & 0.23 & 0.49 \\ 0.72 & 0.63 & 0.54 & 0.32 & 0.55 \\ 0.24 & 0.21 & 0.19 & 0.01 & 0.18 \end{pmatrix}$$

应用凝聚聚类法对改造单元运行状态指标数据进行聚类划分, 详细分类结果如表 4 所示。

表 4 改造单元聚类结果

Table 4 Clustering results of transformation unit

方案	距离计算方法	聚类划分结果	相关系数
1	数据间距离: Euclidean 数据簇间距离: Ward	C1={D1, D6} C2={D2, D5} C3={D3, D4}	0.71

聚类方案的分类结果在配电网拓扑图中的划分如图 5 所示。

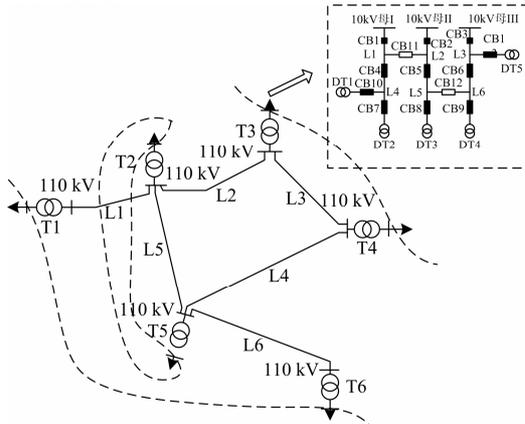


图 5 基于改造单元状态指标聚类划分示意图

Fig. 5 Schematic diagram of clustering division based on the level of transformation unit status

### 3.3 基于设备联络评分指标的电网改造分区聚类分析

根据 110 kV 电网拓扑结构图, 结合设备联络评分指标, 110 kV 电网中变压器和线路联络状态可表示为 12×12 的矩阵 X:

$$X = \begin{matrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \\ L_5 \\ L_6 \end{matrix} \begin{pmatrix} 0 & 50 & 50 & 100 & 100 & 100 & 1 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 \\ 50 & 0 & 50 & 100 & 50 & 100 & 1 & 1 & 100 & 100 & 1 & 100 \\ 50 & 50 & 0 & 50 & 100 & 100 & 100 & 50 & 50 & 100 & 100 & 100 \\ 100 & 100 & 50 & 0 & 50 & 100 & 100 & 100 & 1 & 1 & 100 & 100 \\ 100 & 50 & 100 & 50 & 0 & 50 & 100 & 100 & 100 & 1 & 1 & 1 \\ 100 & 100 & 100 & 100 & 50 & 0 & 100 & 100 & 100 & 100 & 1 & 100 \\ 1 & 1 & 100 & 100 & 100 & 100 & 0 & 50 & 100 & 100 & 50 & 100 \\ 100 & 1 & 1 & 100 & 100 & 100 & 50 & 0 & 50 & 100 & 50 & 100 \\ 100 & 100 & 1 & 1 & 100 & 100 & 100 & 50 & 0 & 50 & 100 & 100 \\ 100 & 100 & 100 & 1 & 1 & 100 & 100 & 100 & 50 & 0 & 50 & 50 \\ 100 & 1 & 100 & 100 & 1 & 100 & 50 & 50 & 100 & 50 & 0 & 50 \\ 100 & 100 & 100 & 100 & 1 & 1 & 100 & 100 & 100 & 50 & 50 & 0 \end{pmatrix}$$

应用凝聚聚类法对设备联络状态数据进行聚类划分, 详细分类结果如表 5 所示。

表 5 基于设备联络指标的聚类结果

Table 5 Clustering results of equipment based on the contact indicators

方案	距离计算方法	聚类划分结果	相关系数
1	数据间距离: Euclidean 数据簇间距离: Ward	C1={T1, L1} C2={T3, T4, L2, L3, L4} C3={T2, T5, L5} C4={T6, L6}	0.71

聚类方案分类结果在配电网拓扑图中的划分结果如图 6 所示。

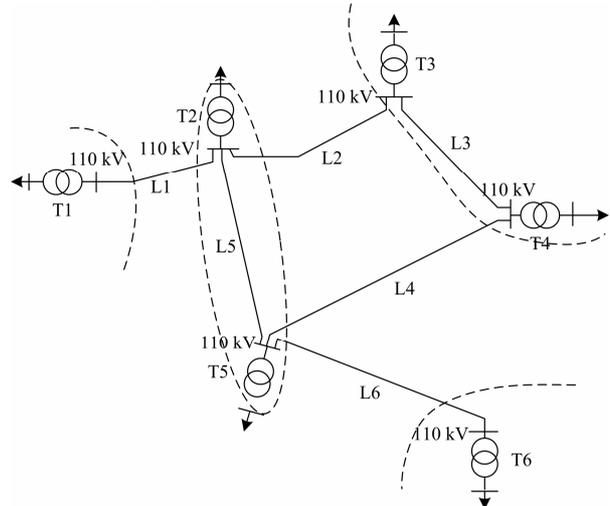


图 6 基于设备联络指标的聚类划分结果示意图

Fig. 6 Schematic diagram of clustering division based on the contact indicators

## 4 基于配电网拓扑结构聚类的设备改造分区划分

若单一考虑配电网设备联络指标或运行状态指标进行改造分区聚类划分, 其分区结果均存在一定缺陷。例如仅依据配电网联络指标的分区方案未考虑设备改造需求的紧急程度, 可能导致某一分区设备改造需求较大, 集中开展改造将会导致用户停电风险增加, 电网安全运行水平降低; 仅依据设备运行状态指标的分区方案无法兼顾设备间负荷转供关系, 改造项目较为分散可能造成安排停电次数多、停电损失大等问题。因此设备改造分区方案应在考虑设备改造需求紧急程度的基础上, 以设备拓扑联络关系为约束判据, 综合各类影响因素, 遵循不同分区内设备可同时改造, 同一分区内设备有序改造的原则, 以用户停电风险最小为目标, 合理地划分设备改造分区。

将考虑 110 kV 配电网设备联络指标的聚类分区划分结果作为约束判据, 叠加于 110 kV 和 10 kV 电网考虑设备运行状态水平的聚类分区划分结果之上, 如图 7 所示。其中虚线分区为考虑配电网联络指标的聚类划分结果, 实线分区为考虑设备运行状态指标的聚类划分结果。

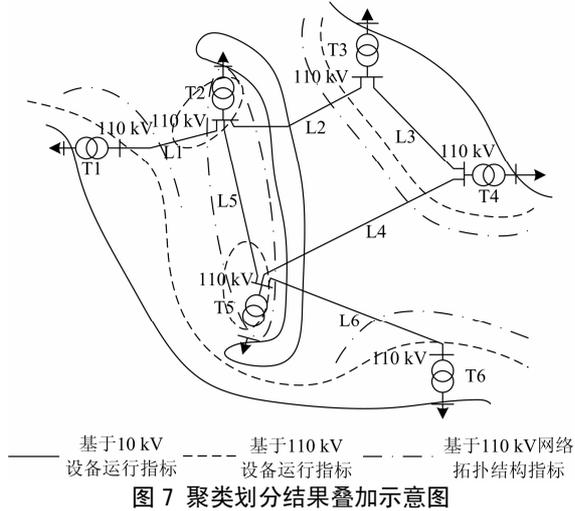


Fig. 7 Schematic diagram of superimposed division

对基于配电网联络结构与设备运行状态指标的分区聚类划分结果进行人工干预, 综合考虑两类指标的影响因素, 给出电网设备改造聚类分区建议方案。

1) 对于单联络变电站, 线路改造一般与变电站改造配套进行。由于 T1 和 T6 变电站均为单线辐射状联络, 线路改造过程中变电站会失去电力供应, 且考虑到 T1 和 T6 变电站无网络联络关系, 改造时互不影响, 可以统一开展项目改造工作, 将 T1、L1、T6、L6 划入一个改造分区。

2) 考虑配电网拓扑联络关系, 改造分区划分应始终以用户停电风险最小为目标。表 1 和表 5 中的两套分区方案均将 T3、T4、L2、L3、L4 聚合为一类, 此种分区方式使得同一分区内设备总量较大, 可能会导致出现设备同时改造影响供电可靠的问题。

T3 和 T4 变电站处于环网联络结构中, 任意对其中某一变电站进行改造均不会影响环网中其他变电站的电力供应, 但连接变电站 T3 的线路 L2、L3 若同时改造, 则 T3 变电站将会失去电力供应, 同理线路 L3、L4 也应避免同时改造。综合考虑设备运行状态指标, 线路 L2 和 L4 的运行状态相对较差, 而线路 L3 的运行状态相对较好, 可考虑选择将 T3、T4、L3 划入一个改造分区, 同时任意选择 L2 或 L4 纳入改造分区, 则既可避免分区内设备总量过大同时改造影响供电可靠性, 又可避免分区划分过于分

散。本文选择将 T3、T4、L2、L3 划入同一改造分区, 统一进行改造规划安排, 按照设备改造需求的轻重缓急, 合理安排线路 L2、L3 的改造时序。

3) 满足供电安全可靠前提下, 应结合设备改造需求对改造分区方案进行优化。对比表 1 和表 5 不同分区方案中相关系数, 基于 110 kV 设备状态水平指标分区方案的相关系数为 0.89, 相比基于网络拓扑结构分区方案的 0.71 更接近于 1, 分区内设备相似度更高, 方案划分更为合理。但结合网络连接拓扑关系, T2、T5 变电站处于环网联络结构中, 对其中任一变电站进行站内改造 (不包括 110 kV 侧母线改造) 或对其所连接的 10 kV 电网进行改造均不会影响环网中其他变电站的电力供应, 而对 T2、T5 变电站 110 kV 侧母线进行改造时, T1、T6 变电站若无其他电源联络, 必然会失去电力供应。结合设备改造需求紧急程度, 同时避免改造分区过于分散, 可选择将 T2、T5、L4、L5 划入统一改造分区, 同时合理安排 T2、T5 变电站 110 kV 侧母线改造时序。

进行人工干预后的改造分区结果如图 8 和表 6 所示, 最终改造分区划分结果与考虑配电网联络指标和设备运行状态指标聚类划分结果叠加示意图基本一致, 验证了基于配电网拓扑结构聚类分区算法的有效性、合理性。

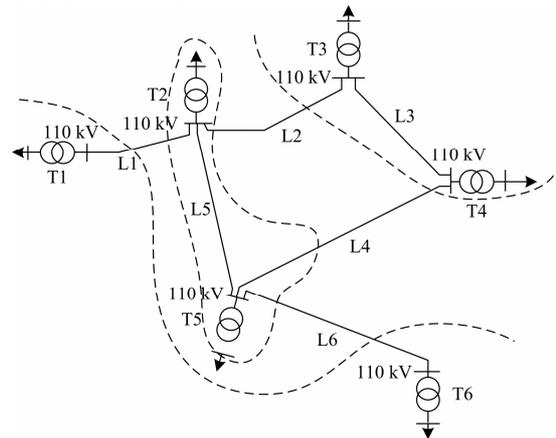


图 8 同时考虑配电网联络指标和设备运行状态指标聚类划分结果示意图

Fig. 8 Schematic diagram of clustering division based on the contact indicators and level of equipment status

表 6 同时考虑配电网联络指标和设备运行状态指标聚类划分结果

Table 6 Clustering results of clustering result based on the contact indicators and level of equipment status

方案	指标选取	聚类划分结果
1	考虑综合指标	C1={T1, L1, T6, L6} C2={T3, T4, L2, L3} C3={T2, T5, L4, L5}

## 5 结论

本文基于凝聚聚类算法, 依据配电网主要设备健康水平评分、运行年限评分和存在缺陷评分三类设备运行状态评分指标, 对配电网设备进行聚类分析。在此基础上, 提出用配电网拓扑结构联络关系作为约束判据, 结合算例对设备改造项目进行聚类, 给出了电网设备改造聚类分区划分建议方案。基于配电网拓扑结构聚类的设备改造分区划分方案合理, 能够统筹设备改造各类影响因素, 为改造项目时序安排提供有效依据。

## 参考文献

- [1] 崔和瑞, 宋秀莉, 葛曼倩. 基于数据挖掘的 FNN 短期电力负荷预测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 54-57.  
CUI He-rui, SONG Xiu-li, GE Man-qian. Research on FNN short-term electric load forecasting based on data mining technology[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(22): 54-57.
- [2] 贾慧敏, 何光宇, 方朝雄, 等. 用于负荷预测的层次聚类和双向夹逼结合的多层次聚类法[J]. 电网技术, 2007, 31(23): 33-36.  
JIA Hui-min, HE Guang-yu, FANG Chao-xiong, et al. Load forecasting by multi-hierarchy clustering combining hierarchy clustering with approaching algorithm in two directions[J]. Power System Technology, 2007, 31(23): 33-36.
- [3] 林济铿, 罗萍萍, 曹绍杰, 等. 基于数据挖掘技术的负荷曲线对故障反映相似性的研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(1): 29-33.  
LIN Ji-keng, LUO Ping-ping, CAO Shao-jie, et al. Study on similarity of load profiles following disturbances based on data mining[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(1): 29-33.
- [4] 刘兴伟, 姚书怀. 基于层次聚类的语义 Web 服务发现算法[J]. 计算机应用与软件, 2007, 24(7): 173-178.  
LIU Xing-wei, YAO Shu-huai. A DHCS-based discovery mechanism of semantic web services[J]. Computer Applications and Software, 2007, 24(7): 173-178.
- [5] 吴青, 翟建设, 赵旭赞. 基于层次聚类的分层可扩展性编码算法的优化[J]. 计算机应用与软件, 2007, 24(2): 45-52.  
WU Qing, ZHAI Jian-she, ZHAO Xu-yun. Improvement of layered scalable coding algorithm based on layer clustering[J]. Computer Applications and Software, 2007, 24(2): 45-52.
- [6] 刘娜, 高文胜, 谈克雄. 基于组合神经网络模型的电力变压器故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2013, 18(2): 82-86.  
LIU Na, GAO Wen-sheng, TAN Ke-xiong. Fault diagnosis of power transformer using a combinatorial neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 18(2): 82-86.
- [7] 陈伟根, 蔚超, 凌云, 等. 油纸绝缘气隙放电特征信息提取及其过程划分[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 7-12.  
CHEN Wei-gen, WEI Chao, LING Yun, et al. Feature information extraction of air-gap discharge in oil-paper insulation and its process partition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4): 7-12.
- [8] 李俭, 孙才新, 陈伟根, 等. 基于灰色聚类分析的充油电力变压器绝缘故障诊断的研究[J]. 电工技术学报, 2002, 17(4): 80-83.  
LI Jian, SUN Cai-xin, CHEN Wei-gen, et al. Study on fault diagnosis of insulation of oil-immersed transformer based on grey cluster theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(4): 80-83.
- [9] 郑晓雨, 马进, 贺仁睦, 等. 基于模型激励响应的负荷分类及泛化能力[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 132-138.  
ZHENG Xiao-yu, MA Jin, HE Ren-mu, et al. Classification and generalization of the load model based on model dynamic responses[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 132-138.
- [10] 宋人杰, 王晓东. 输变电设备状态检修评估分析系统的研究[J]. 继电器, 2008, 36(9): 54-57, 63.  
SONG Ren-jie, WANG Xiao-dong. Research on assessment and analysis system of condition-based

- maintenance for power transmission and transformation equipment[J]. Relay, 2008, 36(9): 54-57, 63.
- [11] 李新叶, 李新芳. 基于改进层次聚类的同家族变压器状态变化规律分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 104-108.
- LI Xin-ye, LI Xin-fang. Condition evolution regularity analysis of power transformer in the same family based on improved hierarchical clustering[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(19): 104-108.
- [12] 胡蓬春, 杨辉, 王丽萍. 110 kV 无人值班变电站综合自动化的改造现状及建议[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(4): 79-85.
- HU Peng-chun, YANG Hui, WANG Li-ping. Actuality and suggestions for the reconstruction of integrated automation in 110 kV unattended substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(4): 79-85.
- [13] 张永伍, 谢颂果, 任毅, 等. 旧变电站断路器失灵保护改造探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 132-138.
- ZHANG Yong-wu, XIE Song-guo, REN Yi, et al. Discussion on the improvement of breaker failure protection for old substations[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 132-138.

---

收稿日期: 2013-08-22; 修回日期: 2014-01-23

作者简介:

王旭阳(1987-), 男, 工学硕士, 工程师, 主要从事配电网规划、分布式电源等领域的研究; E-mail: wang172346309@163.com

李红军(1971-), 男, 工学博士, 高级工程师, 主要从事配电网规划、电力信息化等领域的研究;

宋毅(1977-), 男, 工学博士, 高级工程师, 主要从事配电网规划、电力技术经济等领域的研究。