

基于馈线特征数据挖掘的配电自动化优化规划

姚鹏, 林冬

(广东电网有限责任公司, 广州 510620)

摘要: 配电自动化建设模式的选择是开展配电自动化规划必须解决的关键问题,但目前主要依赖规划人员的主观经验。为此,文章提出了基于馈线特征数据挖掘的配电自动化优化规划方法,通过挖掘馈线拓扑结构、负荷分布、可靠性现状和需求等特征与其最佳配电自动化模式之间的关联规则,建立线路特征-结构模式-配电自动化建设模式的对应关系,突破了由于配电网的庞大规模导致的传统方法的应用局限,为形成兼顾针对性和通用性的配电自动化规划技术原则,实现可靠性和经济性的综合最优奠定理论基础。基于实际配电网的算例分析证明了本文所提方法的正确性和有效性。

关键词: 配电自动化; 规划; 数据挖掘

中图分类号: TM76

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)02-0036-06

Optimal Distribution Automation Planning Method Based on Data Mining on Structure Features of Distribution Feeders

YAO Peng, LIN Dong

(Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China)

Abstract: Construction mode selection is a key but subjective experience relayed problem to be solved in distribution automation planning. In this paper, an optimal planning method, based on the data mining on association rules between the features of a feeder and its construction mode of distribution automation, is proposed. In this method, the network topology, load distribution and reliability status of a feeder are considered, and thus the corresponding relationship between the line features and construction mode of distribution automation can be established. Therefore, the limitation of traditional method caused by the large scale of the distribution network can be broken through, and the formation of distribution automation planning technique principle can be established on optimum in both reliability and economy. The analysis result based on the actual distribution network indicates the proposed method to be effective.

Key words: distribution automation; planning; clustering analysis

配电自动化建设模式的选择是配电自动化规划工作的关键内容,对整体投资规模和实施效果均有重要影响,而且往往决定了本地区的配电自动化建设可实施性。然而,目前在进行配电自动化规划时,往往依赖于规划设计人员的主观经验,难以实现可靠性和经济性的综合最优。

配电自动化建设模式包括馈线自动化模式和配电自动化选点两部分,与网架结构、开关设备情况、负荷分布等因素密切相关,是典型的最优化问题。围绕其数学模型和求解方法,国内外开展了大量的研究,

提出了基于现代启发算法^[1-2],启发式算法^[3]和动态规划法^[4]等各种算法的开关优化配置模型。

然而,采用上述方法得到的配电自动化选点方案仅针对某一时间断面的配电网结构和运行情况,一旦配电网结构变动,则需重新建模分析。在实际工程中,配电网架结构往往变动频繁,因此,采用上述方法不仅缺乏工程实用性,而且不利于形成通用的技术标准和规范。此外,配电网节点规模庞大,采用上述方法进行模型求解可能面临“维数灾”的问题。

为此,本文提出了基于馈线特征数据挖掘的配电自动化优化规划方法,通过挖掘馈线拓扑结构、负荷分布、可靠性现状等特征与该线路最优配电自动化模式之间的关联规则,建立“供电线路→结构

表1 各种馈线自动化建设模式技术实现方式对比
Table 1 Technical Comparison of Different Feeder Modes

FA 模式	是否需 要主站	配电终端	一次开关设备	通信	自动 定位	实施效果		
						快速隔离	快速 转供	快速 转供
集中全自动方式	是	三遥	具备电动操作机构	专网或公网	√	√	/	√
集中半自动方式	是	二遥/故障指示器终端	/	专网或公网	√	/	/	/
就地智能分布式	否	三遥	具备电动操作机构的负荷开关	专网或公网	√	√	/	√
就地智能分布式	否	三遥	断路器	专网或公网	√	√	√	/
就地重合器方式	否	FTU/自动化成套设备	具备电动操作机构	不依赖通信	√	√	/	√

模式→配电自动化建设模式”的映射关系,从而突破了由于配电网的庞大规模导致的传统方法的应用局限,为形成兼顾针对性和通用性的配电自动化规划技术原则奠定理论基础。

1 馈线自动化模式及其分类

根据电力行业标准《DL/T 5709—2014 配电自动化规划设计导则》,馈线自动化建设模式(Feeder Automation, FA)可分为集中式和就地式两种。其中,集中型馈线自动化可分为全自动和半自动两种方式,就地型则可分为智能分布式和重合器方式。上述馈线自动化模式的技术实现方式比较如表1所示,由表1可知:

1)从供电可靠性的角度,集中全自动方式、就地重合器方式和基于负荷开关的智能分布式FA的实施效果非常接近。

三种模式能实现故障自动定位、自动隔离和快速转供。但是,在这三种模式之下,线路故障时必须由变电站出线断路器先跳闸,导致线路上全部用户至少经历一次停电,因此都不能减少用户的停电频率。而且,三种模式均涉及一次设备改造,因此,工程施工时对供电可靠性的影响也非常接近。

三种模式的差异主要体现在实现手段不同而导致用户停电时间有轻微差异,但相对于基于断路器的智能分布式,或集中半自动方式,这一差异显然可以忽略。

2)集中型半自动化方式无需对开关设备进行改造,设备投资和可靠性成本最小,能实现故障自动定位。

集中型半自动方式FA仅需安装带远传功能的故障指示器终端或二遥终端,对设备的自动化改造条件要求最低,而且因施工造成用户停电时间最

短。集中型半自动方式FA可以实现故障自动定位,在部署二遥终端情况下,可通过分析线路的负载情况辅助计算转供电方案,对提高转供电的速度也有一定提升作用。

3)基于断路器的智能分布式FA对提高供电可靠性作用最显著,但改造成本较高,一般仅适用于对新建区域或对供电可靠性要求极高的局部供电线路。

综上所述,本文从各种FA模式对供电可靠性的影响出发,将其分为I、II和III类,如表2所示。

表2 馈线自动化模式分类及其特征
Table 2 Characters For Classification of FA Modes

分类	特征	典型方式
I类	配电终端+负荷开关 柱上自动化开关 成套设备	集中型全自动; 就地型重合器方式; 就地型智能分布式(负荷开关方案)
II类	二遥终端或故障 指示器终端	集中半自动方式
III类	配电终端+断路器	就地型智能分布式(断路器方案)

2 配电自动化选点策略的分类

2.1 主干线和分支线的定义

明确定义馈线的主干线和分支线对配电自动化选点的规范化至关重要。为此,定义:

1)主干线:指变电站出线开关至最远端联络开关的最短路径。

2)分支线:指除去全部主干线后,将用户数较少的次级分支等值至上级分支的节点后形成的单辐射状线路。

2.2 自动化选点策略

由于配电网规模庞大,逐一对各回馈线进行优化计算并得到其最优规划方案并不可行。因此,在实际工程中,应首先明确主干线关键节点和重要分

支线的定义,以及单回馈线应配置的自动化开关和终端数量,并结合馈线的结构特征落实配电自动化选点。可根据不同的评价维度定义主干线关键节点和重要分支线,如表3所示。

表3 主干线关键节点和重要分支线的定义

Table 3 Definitions of Key Segments and Important Branch Line

节点类型	定义		数量
	维度1	维度2	
关键分段点	按主干线故障率的分布情况	按主干线负荷容量的分布情况	1~2个
重要分支线	按分支线故障率自高到低	按分支线负荷容量自高到低	1~2条

根据表3中的定义,可确定如下配电自动化选点策略组合:

1)分别根据主干线故障率的分布情况、负荷容量分布情况,选择1~2个节点作为线路的关键分段开关,可组合4个主干线选点方案。

2)分别根据分支线故障率、负荷总容量,自高到低选择1~2回重要分支线,并令其首端开关作为重要分支开关,可组合4个分支线选点方案。

3)组合1)和2),可形成16个自动化选点策略。

3 配电线路的分类

3.1 线路分类依据

综合馈线自动化模式和自动化选点策略,可将配电自动化建设模式分为48类,如表5所示。对于某一供电馈线,可按其适用的最优配电自动化建设模式进行分类。由此,配电线路可最多分为相应的48类。

3.2 线路分类方法

显然,配电线路的最优自动化模式,与其可靠性现状、可靠性目标及相应的建设投资有关。对于48个配电自动化建设模式,以 ΔR_i 和 ΔC_i ($i=1, 2, 3, \dots, 48$)分别表示用户平均停电时间SADI和配电自动化建设投资的变化量,则每个配电自动化建设模式均可映射至一个在 $\Delta R-C$ 平面的点,并形成Pareto前沿^[5]。

定义每种配电自动化建设模式单位投资的可靠性提升效果 E_i 为:

$$E_i = \Delta R_i / \Delta C_i \quad (1)$$

则可根据 E_i 选择单位投资可靠性提升效果最显著的配电自动化模式作为最优模式,即:

$$t = i | E_i = \max(E_j)_{j=1,2,\dots,N} \quad (2)$$

式中: N为Pareto前沿上配电自动化建设模式的数量。

4 线路特征与分类的关联规则挖掘

4.1 线路的分类属性

依据主干线的特征对线路结构进行编码,可反映线路结构对配电自动化的影响。此外,配电线路的负荷分布、开关配置、线路故障率(与线路类型和长度有关)、是否具有分支线,以及是否具有联络等结构特征对配电自动化实施效果有重要影响,是配电自动化规划应考虑的关键因素。

因此,可将配电线路的主干线按其长度分为前、中和后段,并根据各段的结构属性表征其结构特征。如图1和表4所示。表4中,主干线负荷容量比例、主干线故障率比例、分支线负荷容量比例、分支线故障率比例和联络点数量比例均为以全线为基准的百分比。

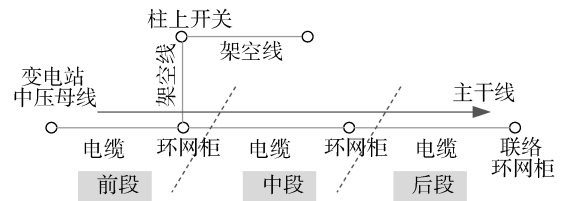


图1 配电线路按主干线分段示意图

Fig. 1 Sketch Map of the Segmentation of a Main Line

表4 线路结构属性

Table 4 Attributes of Feeders for Classification

序号	类型	属性
x1		用户平均停电时间/h
x2		主干线负荷容量比例
x3		主干线故障率比例
x4	线路后段	分支线负荷容量比例
x5		分支线故障率比例
x6		联络点数量比例
x7		主干线负荷容量比例
x8		主干线故障率比例
x9	线路中段	分支线负荷容量比例
x10		分支线故障率比例
x11		联络点数量比例
x12		主干线负荷容量比例
x13		主干线故障率比例
x14	线路前段	分支线负荷容量比例
x15		分支线故障率比例
x16		联络点数量比例

续表5 配电自动化建设模式分类列表

编号	馈线自动化模式	关键分段点选取原则		重要分支线选取原则	
		定义	数量	定义	数量
8	I类	按负荷容量分布	1	按故障率分布	1
9	I类				2
10	I类				1
11	I类	按负荷容量分布	2	按故障率分布	1
12	I类				2
13	I类				1
14	I类	按负荷容量分布	2	按故障率分布	1
15	I类				2
16	II类				1
17	II类	按故障率分布	1	按负荷容量分布	2
18	II类				1
19	II类				2
20	II类	按故障率分布	2	按故障率分布	1
21	II类				2
22	II类				1
23	II类	按负荷容量分布	1	按故障率分布	2
24	II类				1
25	II类				2
26	II类	按负荷容量分布	1	按故障率分布	1
27	II类				1
28	II类				2
29	II类	按负荷容量分布	2	按故障率分布	1
30	II类				1
31	II类				2
32	III类	按故障率分布	1	按故障率分布	1
33	III类				2
34	III类				1
35	III类	按负荷容量分布	2	按故障率分布	1
36	III类				2
37	III类				1
38	III类	按故障率分布	2	按负荷容量分布	1
39	III类				2
40	III类				1
41	III类	按负荷容量分布	1	按故障率分布	2
42	III类				1
43	III类				2
44	III类	按故障率分布	1	按故障率分布	1
45	III类				2
46	III类				1
47	III类	按负荷容量分布	2	按故障率分布	1
47	III类				2

一种有效且得到广泛应用的分类模型评价方法。基于全部289回线路样本,计算表6所示3种馈线自动化模式关联规则的ROC曲线,如图3所示。

表6 馈线自动化选择规则

序号	判据	应采用馈线自动化类别
1	$x_1 < 0.22$	I类
2	and $\{x_1 \geq 0.22, x_2 \geq 0.15, x_4 \geq 0.65\}$	
3	and $\{0.22 \leq x_1 < 0.83, x_2 < 0.15, x_3 < 0.35, x_7 < 0.25\}$	
4	and $\{x_1 \geq 0.22, x_2 < 0.15, x_3 \geq 0.35, x_8 < 0.35, x_9 < 0.35\}$	
5	and $\{x_1 \geq 0.83, x_2 < 0.15, x_3 < 0.35, x_8 < 0.35, x_9 < 0.35\}$	II类
6	and $\{x_1 \geq 0.22, x_2 < 0.15, x_8 > 0.35\}$	
7	and $\{x_1 \geq 0.22, x_2 \geq 0.15, x_4 < 0.65, x_{14} < 0.2\}$	III类
8	and $\{0.22 \leq x_1 < 0.83, x_2 < 0.15, x_3 < 0.35, x_7 \geq 0.25\}$	
9	and $\{x_1 \geq 0.22, x_2 < 0.15, x_3 \geq 0.35, x_8 < 0.35, x_9 \geq 0.35\}$	
10	and $\{x_1 \geq 0.22, x_2 \geq 0.15, x_4 < 0.65, x_{14} > 0.2\}$	

表7 配电自动化选点规则

模式	判据	选点原则编号
I类	and $\{x_9 < 0.25, x_4 \geq 0.25\}$	5
	and $\{x_9 < 0.25, x_4 \geq 0.25, x_1 < 0.37, x_2 < 0.05\}$	
	and $\{x_9 < 0.25, x_4 \geq 0.25, x_1 < 0.37, x_2 \geq 0.05, x_3 \geq 0.45\}$	
	and $\{x_9 \geq 0.25, x_3 \geq 0.75\}$	
II类	and $\{x_9 < 0.25, x_4 \geq 0.25, x_1 < 0.37, x_2 \geq 0.05, x_3 < 0.45\}$	13
	and $\{x_9 \geq 0.25, x_3 < 0.75\}$	
III类	and $\{x_9 < 0.25, x_4 \geq 0.25, x_1 \geq 0.37\}$	21
II类	/	45
	$x_{10} < 0.05$	44
III类	$x_{10} \geq 0.05$	44

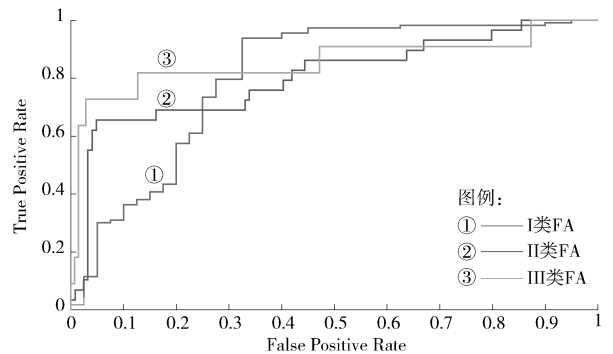


图3 馈线自动化模式决策子树的ROC曲线

Fig. 3 ROC Curves of Decision Trees of FA Modes

5.3 结果验证

ROC曲线(Receiver Operating Characteristic)是

图3中,3条ROC曲线对应的AUC(Area Under Curve)分别为0.804 2、0.805 6和0.856 6,表明表7所示的选择规则对I类、II类和III类馈线自动化正确分类的统计概率分别达到0.804 2、0.805 6和0.856 6。同样,计算表7所示选点规则ROC曲线及其对应的AUC,其结果如表8所示。

表8 自动化选点规则决策子树的AUC值

Table 7 AUC Values of Decision Trees

选点原则编号	5	13	21	45	44
AUC	0.797 9	0.793 1	0.714 3	0.666 7	0.777 8

综上所述,本文所构建的决策树平均AUC值为0.777 0,具有较好的泛化性能。

根据表6和表7所示的线路配电自动化模式进行配电自动化规划建设,并与该区域原规划方案(根据规划技术原则和人工经验得到)比较,其结果如表9所示。由表9可知,采用本文所提的配电自动化模式选择规则进行规划建设,与原基于规划技术原则和人工经验的规划方案相比,在提高了供电可靠性的同时,降低了改造投资。

表9 与原规划方案结果比较

Table 9 Comparison Between Original and Proposed Schemes of Distribution Automation Planning

规划方案	用户平均停电时间/h	改造投资/万元
本文方案	0.18 184	1 199
原方案	0.20 997	1 320

6 结论

本文的理论分析和算例计算表明,配电自动化建设模式包括馈线自动化模式和配电自动化选点策略两方面,而根据线路的最优配电自动化模式可对其进行分类。在此基础上,通过建立配电线路前段、中段和后段的主干线和分支线的故障率、负荷分布特征属性,并结合粗糙集理论构造线路分类决策树,能够挖掘线路上述结构特征与其最优配电自动化模式之间的关联规则,建立线路特征-结构模式-配电自动化建设模式的对应关系,突破了由于配电网的庞大规模导致的传统方法的应用局限,为形成兼顾针对性和通用性的配电自动化规划技术原则,实现可靠性和经济性的综合最优奠定理论基础。

由线路特征与其配电自动化建设模式的关联规

则可知:

1)线路当前的用户平均停电时间指标 x_1 是决定其应采用的馈线自动化模式的重要指标。

当线路现状可靠性水平已经较高时($x_1 < 0.22$),采用基于断路器的智能分布式馈线自动化能够提高可靠性的程度有限,却需要较大投资成本,而采用集中型全自动、就地型重合器方式或就地型智能分布式(负荷开关方案)等I类馈线自动化模式能较好地平衡可靠性和经济性。

对于现状可靠性水平较低的线路($x_1 > 0.22$),则应根据线路后段的主干线负荷容量比例(x_2)、主干线故障率比例(x_3)、分支线负荷容量比例(x_4),以及线路中段的主干线负荷容量比例(x_8)和主干线故障率比例(x_9),综合考虑应采用的馈线自动化模式。

2)对于各种馈线自动化模式,均应优先考虑选择2个主干线关键分段点和2个重要分支开关进行自动化改造。而对于III类馈线自动化,由于其投资较高,因此当线路中段的分支线故障率占全线比重较低($<5\%$)时,可只1个重要分支开关进行改造。

3)关键分段开关的定义应优先考虑按主干线负荷容量的分布选择,而重要分支线则应优先按故障率高低选取。

参考文献:

- [1] 葛少云,李建芳,张宝贵.基于二分法的配电网分段开关优化配置[J].电网技术,2007,31(13):44-49.
- [2] 王艳松,赵智,陈国明,等.应用禁忌搜索方法优化配电网的开关配置[J].高电压技术,2005,31(3):74-76.
- [3] 王赛一,王成山.配电网中辐射线路的最优分段处理[J].电力系统自动化,2005,8(1):50-54.
- [4] LEVITIN G, MAZALTOV S, ELMAKIS D. Optimal Allocation of Sectionalizer in Radial Distribution Networks [C]. Proceeding of the 1995 Stockholm Power Tech Conference, Stockholm, 1995: 761-764.
- [5] NICHOLAS. Economics of the Welfare State [M]. Oxford University Press, 2012: ISBN 978-0-19-929781-8.
- [6] DENG H, RUNGER G, TUV E. Bias of Importance Measures for Multi-valued Attributes and Solutions [C]. Proceedings of The 21st International Conference on Artificial Neural Networks, 2011: 13-20.
- [7] 丁春荣,李龙澍,杨宝华.基于粗糙集的决策树构造算法[J].计算机工程,2010,26(11):75-77.

(责任编辑 张春文)