

DOI: 10.7667/PSPC171737

## 中压配网接线模式的 GA-Pareto 优选模型

李响<sup>1</sup>, 白首华<sup>1</sup>, 付金光<sup>2</sup>, 范建业<sup>3</sup>, 胡天彤<sup>1</sup>, 宋祺鹏<sup>4</sup>

(1. 郑州航空工业管理学院, 河南 郑州 450015; 2. 国网鹤壁供电公司, 河南 鹤壁 458000;  
3. 中国电力技术装备有限公司, 北京 100052; 4. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

**摘要:** 10 kV 中压接线模式的选择受负荷密度、投资、可靠性等因素影响, 是配电网规划与改造的关键。在不同负荷密度条件下, 根据接线单元的供电能力确定所需数量。考虑多种因素对接线模式的投资成本和可靠性影响, 结合用户停电损失综合函数, 将可靠性与经济性进行属性转化。为了得到 Pareto 最优解, 以影响接线模式的经济性、可靠性的线路参数建立初始种群, 采用遗传算法(GA), 以供电总成本最低为目标, 获得任意负荷密度下的 Pareto 最优解集, 从而建立中压接线模式的 GA-Pareto 优选模型。该理论已应用于中部某城市, 为该市配电网建设提供理论依据。  
**关键词:** 接线模式; 负荷密度; 可靠性; 经济性; 遗传算法

### GA-Pareto optimization model of mid-voltage distribution network connection mode

LI Xiang<sup>1</sup>, BAI Shouhua<sup>1</sup>, FU Jinguang<sup>2</sup>, FAN Jianye<sup>3</sup>, HU Tiantong<sup>1</sup>, SONG Qipeng<sup>4</sup>

(1. Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450015, China; 2. State Grid Hebi Electric Power Company, Hebi 458000, China; 3. China Electric Power Equipment and Technology Co., Ltd., Beijing 100052, China; 4. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** The selection of 10 kV mid-voltage connection modes, which is the key to planning and transformation of distribution network, is affected by load density, investment, stability, etc. Under the condition of different load density, the connection unit capacity determines the required quantity. Considering the impact of many factors on investment cost and connection mode reliability, and combining the comprehensive function of user's power outage loss, the economy and reliability can be transferred between each other. The line parameters which impact the economy and reliability of connection mode are adopted as the initial group, the genetic algorithm is used, and the power supply's lowest total cost is taken as objective, to obtain the Pareto optimal solution set of any load density. Thus the GA-Pareto optimization model is established for mid-voltage connection mode. The model has been applied in a city in the central China, which supplies theoretical basis for the construction of distribution network of this city.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902800), Science and Technology Key Project of Henan Province (No. 182102210112) and Basic and Frontier Technology Research Project of Henan Province (No. 132300410185).

**Key words:** connection mode; load density; reliability; economy; genetic algorithm

## 0 引言

配电网直接与用户相连, 是国民经济发展与人民生活提高的重要保障<sup>[1-2]</sup>。10 kV 中压接线模式的选择受多种因素影响, 是配电网规划与改造的重要工作, 一方面它影响着供电企业的投资和发展<sup>[3-4]</sup>,

另一方面它影响着对用户的供电水平与质量<sup>[5-6]</sup>。

为合理评价与选择中压接线模式, 国内外学者展开了多方面的研究, 取得了较为丰硕的成果并在实际当中得到应用<sup>[7-8]</sup>。文献[9]采用了一种供电面积可调的分析模型, 对高、中压两级配电网形成的组合电网进行了经济性和可靠性指标量化计算。文献[10-11]在分段优化基础上, 对 4~5 个负荷密度条件下的接线模式性能进行分析比较, 给出了定负荷密度条件下接线模式的分析思路。文献[12-14]在满足安全性、适应性等条件下, 从经济性、可靠性等方

**基金项目:** 国家重点研发计划资助(2017YFB0902800); 河南省科技攻关项目(182102210112); 河南省基础与前沿技术研究计划项目(132300410185)

面对配网典型接线模式提出了配电网综合评估体系,构建理论分析模型,各种接线方式进行评价。文献[15-16]考虑配电网在某个特定条件下,从技术与经济的角度对配电网接线模式进行规划。

在 10 kV 中压配电网中,通常以主干馈线组成的典型接线模式为最基本的供电单元,即接线单元。本文以 10 kV 中压配电网接线模式为研究对象,根据供电区域的供电面积和负荷密度发展裕度,在分析接线单元的供电能力基础上,确定接线单元的数量;从可靠性、经济性角度建立中压接线模式的 Pareto 模型,结合用户综合停电损失对可靠性属性进行转化,确定 Pareto 优选模型的目标函数;考虑分段数、用户数、供电半径等因素对接线模式的影响,建立初始参数群,结合遗传算法,对任意负荷密度条件下的各种接线模式的投资成本、可靠性进行定量计算;以单位负荷供电总成本最低为准则,获得任意负荷密度条件下的 Pareto 最优解集,从而建立中压接线模式的 GA-Pareto 优选模型,为配电网 10 kV 中压接线模式的选择提供理论依据和投资参考。

## 1 中压接线模式的投资成本—可靠性曲线

中压接线模式的选择涉及费用最小化和可靠性最大化问题。由于两者在本质上是相互冲突的,低费用意味着低可靠性的接线模式,高可靠性接线模式意味着高费用。因此,接线模式的选择属于多目标优化范畴,可建立接线模式的 Pareto 优化模型。

图 1 所示曲线为中压接线模式的单位负荷投资成本—可靠性曲线。该曲线反映了中压接线模式单位负荷投资成本与可靠性的关系,一方面,该模型可以直接反映当接线模式要达到一定的可靠性时,单位负荷所需投资;另一方面,该模型可反映在某一可靠性水平下的配电网可靠性变化量对应的投资变化量。

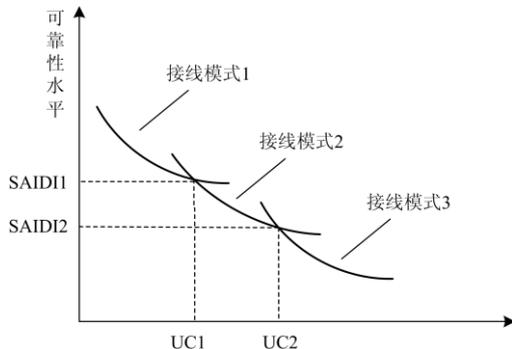


图 1 单位负荷投资成本—可靠性曲线

Fig. 1 Curve of cost for unit load versus reliability

由于反映多种接线模式的投资成本与可靠性,所以在单位负荷投资成本—可靠性 Pareto 曲线并非平滑曲线。若供电区域采用系统平均停电时间 SAIDI 为可靠性水平衡量指标,当 SAIDI 目标不低于 SAIDI1 时,采用接线模式 1 比较合理,对应的投资成本不超过 UC1;当 SAIDI 目标设定在 SAIDI1~SAIDI2 时,采用接线模式 2 比较合理,对应的投资成本在 UC1~UC2 之间。若采用接线模式 1,即使能够达到 SAIDI 目标,但却高于接线模式 2 的单位负荷投资成本;同样,若采用接线模式 3,虽然能够达到 SAIDI 目标,但单位负荷投资成本依然高于接线模式 2。

## 2 Pareto 优选模型的目标函数与属性转化

由单位负荷投资成本—可靠性 Pareto 模型可知,中压接线模式的选择属于多属性规划,可利用 Pareto 理论建立目标函数。

### 2.1 目标函数

Pareto 曲线为规划人员提供了多种优选方案,对中压接线模式选择问题,Pareto 最优解定义可表述为

$$\min F = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]^T \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} h(x) = 0 \\ g(x) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $x$  为解向量; $F$  为目标函数向量。在中压接线模式的选择问题上,向量元素通常为投资成本指标、可靠性指标等。式(2)为等式和不等式约束,如电压、容量、功率等。

### 2.2 接线模式投资成本与可靠性计算

#### (1) 投资成本

根据供电区域现状数据或者导则,结合供电半径、开关个数等基本参数,统计该接线单元的综合投资费用为  $Z_{\text{unit}}$ , 运行费用为  $U_{\text{unit}}$ , 则所需该接线单元的投资成本(年值)为

$$C_{\text{unit}} = Z_{\text{unit}} \times \left[ \frac{r_0(1+r_0)^n}{(1+r_0)^n - 1} \right] + U_{\text{unit}} \quad (3)$$

供电区域所需单元接线的投资成本(年值)为

$$C = \frac{S}{S_{\text{unit}}} (K \times C_{\text{unit}} + U_{\text{unit}}) \quad (4)$$

式中, $K$  为各单元接线的同时系数,取值范围为 0.8~0.95。

#### (2) 供电可靠性评估

为了便于衡量缺电成本,接线单元的供电可靠性评估指标采用 SAIDI 指标,评估方法可采用故障模式后果分析法,该法简单方便,应用广泛<sup>[17-19]</sup>,

在此不详叙述。

### 2.3 属性转化

接线模式的优选, 涉及了在一定的负荷密度条件下费用最小化和可靠性最大化问题。由于多属性规划在大多数情况下不存在唯一“最好的”备选方案, 因此不能直接像单属性规划问题那样优化。Pareto 曲线为规划人员提供了多种“优化选项”。

为了求取 Pareto 最优解集, 采用权重系数变换法, 对可靠性与经济性属性通过赋予权重进行属性转化。若接线模式经济性、可靠性属性分别为  $C_1$ 、 $C_2$ , 权重系数分别为  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ , 则属性函数的线性加权为

$$F = \omega_1 C_1 + \omega_2 C_2 \quad (5)$$

通常, 可靠性属性的权重系数  $\omega_1$  取决于供电区域内的供电负荷;  $\omega_2$  不仅取决于供电负荷, 而且还取决于着用户的综合停电损失, 即缺电成本。为了衡量由于接线模式的可靠性而造成的用户停电损失, 需确定用户综合停电损失函数  $f_{OC(t)}$ , 因此, 权重系数可取:

$$\omega_1 = \frac{1}{S} \quad (6)$$

$$\omega_2 = \frac{f_{OC(t)}}{S}$$

式中,  $S$  为供电区域内的供电负荷。

然后, 根据 SAIDI 指标值, 利用函数  $f_{OC(t)}$ , 确定停电损失  $OC$ 。则公式转化为

$$F = \frac{C + OC}{S} = TC \quad (7)$$

式中,  $TC$  为单位负荷供电总成本, 数值上等于中压接线模式的供电总成本与其所供负荷的比值。

因此, Pareto 最优解问题则转化为: 在不同的负荷密度条件下, 中压接线模式的单位负荷供电总成本最低, 即在单位负荷供电总成本-负荷密度曲线上寻找 Pareto 前沿。

## 3 GA-Pareto 优选模型

在不同负荷密度条件下, 为求解 Pareto 曲线的“最优”点集, 基于遗传算法的求解流程如图 2 所示, 具体步骤如下。

① 设定负荷密度初始值  $\rho_0$ , 根据供电区域面积, 求取供电负荷, 以每种接线模式的典型接线为单元, 在分析每种接线单元的投资成本、最大供电能力的基础上, 确定接线单元数量。

② 分析影响线路可靠性与经济性指标的线路参数, 若以分段数  $N$ 、供电半径  $L$ 、平均每段用户

数  $U$  为变量, 采用实数和整数混合编码, 即  $[N_1 \cdots N_m | L_1 \cdots L_m | U_1 \cdots U_p]$ , 其中分段数采用整数编码, 其余变量采用实数编码, 建立初始种群。则个变量对应的解码为

$$\begin{cases} N = N_i \\ L = L_j + \Delta L \\ U = U_k + \Delta k \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\Delta L$ 、 $\Delta k$  分别为供电半径和平均每段用户数的调整步长。

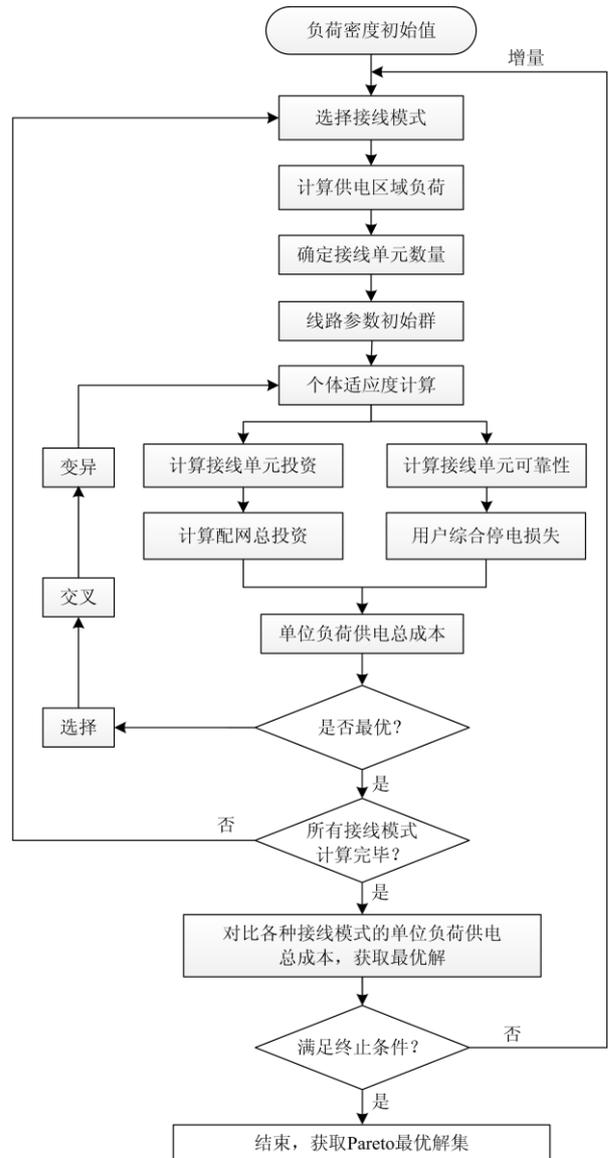


图 2 GA-Pareto 优选模型计算流程图

Fig. 2 Flow chart of GA-Pareto optimal solutions

以单位负荷供电总成本为适应度函数, 计算各代种群中的各个体的适应度, 设定选择概率、交叉概率、变异概率, 通过遗传操作, 产生新的种群;

通过对比各种接线模式的单位负荷供电总成本，从而获得负荷密度为  $\rho_0$  条件下通过 Pareto 最优解。

③ 设负荷密度步长为  $\Delta\rho$ ，则选定新的负荷密度，按照前①、②步骤，采用遗传算法分析各种接线模式的单位负荷供电总成本，通过迭代对比，直至寻找到单位负荷供电总成本最低的接线模式。

④ 增加负荷密度步长，循环计算，直至负荷密度最大值，获取在各个负荷密度条件下的 Pareto 最优解集，从而确定不同接线模式下的 GA-Pareto 优选模型。

### 4 算例

将该理论应用于中部某城市，以便合理制定该市的 10 kV 配电网网架结构。

#### 4.1 电网基本情况

2016年，该市中心城区的负荷密度为 0.52 MW/km<sup>2</sup>，10 kV 接线模式有：架空单辐射、单联络、多分段多联络，电缆单辐射、单环网。配电网基本参数如表 1 所示。

表 1 电网基本参数

电网基本参数	单位	数值
10 kV 线路平均装接用户数	户/条	292
10 kV 架空线路故障停运率	次/百公里·年	7.85
10 kV 电缆线路故障停运率	次/百公里·年	0.128
10 kV 断路器故障停运率	次/百台·年	0.1
10 kV 开关故障停电率	次/百台·年	2.24
母线故障停运率	次/台·年	0.02
架空线路故障修复时间	h	6.35
电缆线路故障修复时间	h	7.85
开关故障修复时间	h	3.02
用户电气设备故障修复时间	h	0.83
投资回收率	%	10
10 kV 断路器单价	万元	6
10 kV 开关单价	万元	5
10 kV 综自开关站单价	万元	260

通过调研，该市用户综合停电损失模型为

$$f_{oc}(t) = \begin{cases} -0.0263t^2 + 10.991t + 497.27 & x \leq 120 \text{ min} \\ -0.0003t^2 + 0.61t + 1367.1 & x > 120 \text{ min} \end{cases} \quad (9)$$

#### 4.2 定负荷密度条件下的接线模式选择

根据《配电网规划设计技术导则》，虽可确定某种负荷密度下的接线模式，如在 C 类供电区(负荷密度为 1~6 MW/km<sup>2</sup>)，可选择架空多分段适度联络或单环网<sup>[20]</sup>，但无法量化比较这两种接线模式的优劣。或采用现有常用的理论方法，在定负荷密度条

件下，如负荷密度为 1、5、10、15、20、30 MW/km<sup>2</sup>，通过计算并对比几种接线模式下的单位负荷总供电成本，如图 3 所示。

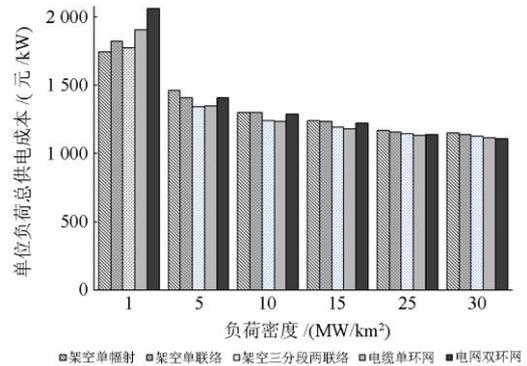


图 3 定负荷密度条件下不同接线模式比较

Fig. 3 Comparison of different connection modes under the condition of fixed load density

在负荷密度为 1、5 MW/km<sup>2</sup> 时，单位负荷总供电成本最低分别为架空单辐射、架空三分段两联络。由于负荷密度动态变化，若负荷密度为 1~5 MW/km<sup>2</sup> 区间内某一值时，需重新计算，否则无法比较两种接线模式的优劣。同时，为了得到最优分段数，需结合供电半径、故障率等因素分析分段数对单位负荷总供电成本的灵敏度，选取单位负荷供电总成本最高的分段数为最优分段。电网设备在现状条件下，负荷密度为 1 MW/km<sup>2</sup> 时，分段数灵敏度如表 2 所示。

表 2 分段数灵敏度

接线模式	单位负荷供电总成本/元					
	1	2	3	4	5	6
架空单辐射	-	193.8	215.3	204.5	196.4	190.5
架空单联络	-	179.1	207.2	196.8	189.0	186.8
架空多分段两联络	-	153.2	163.0	153.2	147.1	144.1
电缆单环网	-	175.6	186.8	194.6	181.0	173.7
电缆双环网	-	173.9	183.1	168.5	158.3	152.0

通过以上分析，定负荷密度条件下接线模式的比选一方面仅考虑某一负荷密度下的最优接线模式，未从负荷发展区间的角度优选，存在一定的特殊性；另一方面，仅能从单一影响因素的灵敏度进行分析，无法综合考虑各种因素对单位负荷总供电成本的影响，存在一定的局限性。因此，需综合分段数、供电半径等各种因素，从负荷密度发展区间的角度对比各种接线模式的单位负荷总供电成本，绘制接线模式的优选曲线。

### 4.3 GA-Pareto 优选曲线

为了避免定负荷密度条件下的比选所存在的局限性和特殊性, 可在负荷密度变化区间内综合各种影响因素建立 GA-Pareto 优选模型。根据电网实际情况, 初始负荷密度设定为  $0.5 \text{ MW/km}^2$ , 步长为  $1 \text{ MW/km}^2$ , 负荷密度上限为  $30 \text{ MW/km}^2$ , 接线模式有架空单辐射、单联络、多分段多联络, 电缆单辐射和单环网。

设置分段数、供电半径、每条线路平均每段用户数为控制变量。选取 30 个初始群体, 迭代次数不超过 100, 连续 3 次迭代最优解集不变则截止, 交叉、变异概率分别为 0.5、0.01。通过计算, 该市配网接线模式的 SAIDI-负荷密度曲线如图 4 所示。

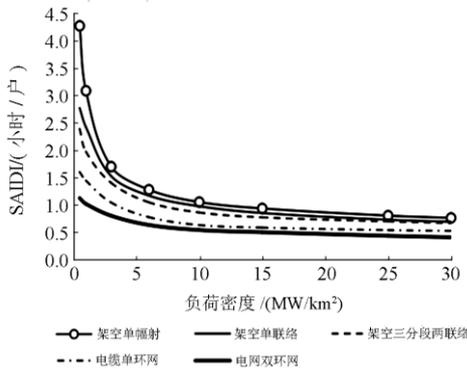


图 4 SAIDI-负荷密度曲线

Fig. 4 Curve of SAIDI-versus load density

根据 SAIDI 及用户综合停电损失模型函数, 求取接线模式的 Pareto 解集, 绘制 Pareto 优选曲线如图 5 所示。

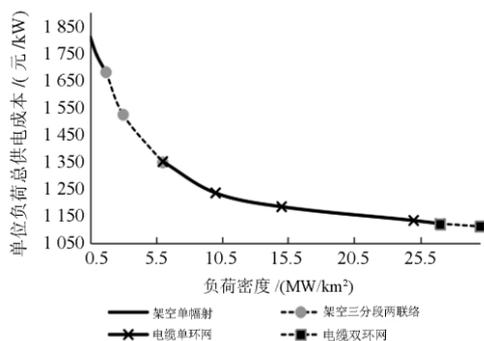


图 5 中压接线模式的 GA-Pareto 优选曲线

Fig. 5 GA-Pareto optimization curve of connection modes of mid-voltage distribution networks

从 GA-Pareto 优选曲线上可以看出: 在不同的负荷密度条件下, 接线模式的单位负荷总供电成本不相同, 最优接线模式及其主要指标也应随之变化。各个负荷密度区间内的最优接线模式及其主要性能指标情况如表 3 所示。

表 3 最优接线模式下主要性能指标情况

负荷密度/(MW/km <sup>2</sup> )	≤1.7	1.7~6	6~27	27~30
最优接线模式	架空单辐射	架空多分段多联络	电缆单环网	电缆双环网
联络数	0	2	-	-
分段数	4	3	3	3
供电半径/km	10	5	4	3
SAIDI 最高值/(h/户)	255.4	143	62.5	31.8
TC 最高值/(元/kW)	1 810	1 662	1 346.5	1 122.9
SAIDI 最低值/(h/户)	143	62.5	31.8	24.3
TC 最高值/(元/kW)	1 662	1 346.5	1 122.9	1 109.8

因此, 采用 GA-Pareto 优选模型可在负荷密度变化区间内, 结合遗传算法, 综合考虑可靠性与经济性的影响因素, 通过对比接线模式的单位负荷总供电成本, 获取任意负荷密度区间内的 Pareto 最优解集, 从而有效地避免定负荷密度条件接线模式比选法的局限性和特殊性。

## 5 总结

10 kV 中压接线模式的选择受多因素影响, 为多属性优化问题。为了合理选择中压接线模式, 本文引入 Pareto 理论, 首先在设定负荷密度基础上, 根据供电面积计算所需接线单元的数量。利用遗传算法, 以线路参数建立接线模式的初始群, 并引入权重系数, 将可靠性进行属性转化, 以供电总成本最低为目标函数, 计算不同负荷密度条件下的各种接线模式 Pareto 最优解集, 绘制中压接线模式的 GA-Pareto 优选曲线, 为合理选择中压接线模式及网架结构提供理论依据和参考。通过实际电网应用, 对 10 kV 中压接线模式提出有效的决策建议。

## 参考文献

- [1] QUINTERO J, ZHANG H, CHAKHCHOUKH Y, et al. Next generation transmission expansion planning framework: models, tools, and educational opportunities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1911-1918.
- [2] 孙义豪, 李秋燕, 丁岩, 等. 基于主成分分析及系统聚类的县域电网综合评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 30-36.
- [3] SUN Yihao, LI Qiuyan, DING Yan, et al. County power grid evaluation system based on principal component analysis and hierarchical cluster analysis[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 30-36.
- [4] YANG Hongming, YANG Songping, XU Yan. Electric vehicle route optimization considering time-of-use electricity price by learnable Partheno-genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 657-666.
- [4] 黄飞, 宋璇坤, 周晖, 等. 基于效果与基础互动的电网

- 智能化水平综合评价指标体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 142-148.
- HUANG Fei, SONG Xuankun, ZHOU Hui, et al. Research on comprehensive evaluation index system of grid's intelligence level based on interaction between effect and basis[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11):142-148.
- [5] 荆朝霞, 李晓波, 鄂志峰, 等. 一种综合考虑馈线和主变约束的配电网主变N-1校验方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 111-117.
- JING Zhaoxia, LI Xiaobo, WU Zhifeng, et al. A method of main-transformer N-1 verification for distribution network considering feeder and main-transformer constraints[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 111-117.
- [6] 宋若晨, 杨菁, 唐勇俊, 等. 配电网开关站高可靠性接线模式比较研究[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 769-775.
- SONG Ruochen, YANG Jing, TANG Yongjun, et al. Comparative study on high-reliability connection modes for switching station in distribution network[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 769-775.
- [7] 葛少云, 郭寅昌, 刘洪, 等. 基于供电能力计算的高压配电网接线模式分析[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 405-411.
- GE Shaoyun, GUO Yinchang, LIU Hong, et al. Load supply capability based analysis of HV Distribution network connection mode[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 405-411.
- [8] 徐晶, 李娟, 谢秦, 等. 计及报装容量阶跃性的中压配电网接线模式研究[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(8): 67-71.
- XU Jing, LI Juan, XIE Qin, et al. Research on connection mode of mid-voltage distribution network considering user's stepwise capacity[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2014, 33(8): 67-71.
- [9] 谢莹华, 王成山, 葛少云, 等. 城市配电网接线模式经济性和可靠性分析[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(7): 12-16.
- XIE Yinghua, WANG Chengshan, GE Shaoyun, et al. Economy and reliability analysis of connection modes in urban distribution[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(7): 12-16.
- [10] 冯霜, 王主丁, 周建其, 等. 基于小分段的中压架空线接线模式分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 62-68.
- FENG Shuang, WANG Zhuding, ZHOU Jianqi, et al. Medium-voltage overhead lines connection Mode analysis based on short segment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 62-68.
- [11] 国宗, 高翔, 韦钢, 等. 城市中压配电网接线方式的优选[J]. 电力与能源, 2014, 35(1): 43-46.
- GUO Zong, GAO Xiang, WEI Gang, et al. Optimal selection of connection scheme of urban medium voltage distribution network[J]. Energy Technology, 2014, 35(1): 43-46.
- [12] 许可, 鲜杏, 程杰, 等. 城市高压配电网典型接线的可靠性经济分析[J]. 电力科学与工程, 2015(7): 12-18.
- XU Ke, XIAN Xing, CHENG Jie, et al. The reliability and economy analysis of typical connection mode of high voltage urban distribution network[J]. Electric Power Science and Engineering, 2015(7): 12-18.
- [13] 谢晓文, 刘洪. 中压配电网接线模式综合比较[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(4): 94-99.
- XIE Xiaowen, LIU Hong. Integrated contrast on connection modes of mid-voltage distribution networks[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2009, 21(4): 94-99.
- [14] 戴仲覆, 高强, 谢敏, 等. 城市中压配电网典型接线模式的综合评估[J]. 南方电网技术, 2011, 5(1): 57-60.
- DAI Zhongfu, GAO Qiang, XIE Min, et al. A comprehensive evaluation of typical connection modes of urban medium-voltage distribution networks[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(1): 57-60.
- [15] 朱吉然, 李龙桂, 李欣然, 等. 基于网络状态评估的配电网多目标优化重构方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 98-103.
- ZHU Jiran, LI Longgui, LI Xinran, et al. Distribution network multi-objective reconfiguration optimization based on status assessment[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 98-103.
- [16] 徐晶, 李娟, 谢秦, 等. 积极报装容量阶跃性的中压配电网接线模式研究[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(8): 67-71.
- XU Jing, LI Juan, XIE Qin, et al. Research on connection mode of mid-voltage distribution network considering user's stepwise capacity[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2014, 33(8): 67-71.
- [17] 葛少云, 季时宇, 刘洪, 等. 基于多层次协同分析的高中压配电网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2016, 31(19): 172-181.
- GE Shaoyun, JI Shiyu, LIU Hong, et al. Reliability assessment of high-medium voltage level distribution networks based on cooperative analysis of multi-level networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(19): 172-181.
- [18] 王主丁, 韦婷婷, 万凌云, 等. 计及多类开关和容量约束的中压配电网可靠性估算解析模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 146-155.
- WANG Zhuding, WEI Tingting, WANG Lingyun, et al. Analytical reliability estimation model of medium voltage distribution networks considering different types of switches and capacity constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17): 146-155.
- [19] BAMDAD F, YONG F. Reliability assessment of smart grids considering indirect cyber-power interdependencies[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1677-1686.
- [20] 配电网规划设计技术导则: DL/T 5729—2016[S]. The guide for planning and design of distribution network: DL/T 5729—2016[S].

收稿日期: 2017-11-28; 修回日期: 2018-01-26

作者简介:

李响(1979—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事配电网规划与评估研究。E-mail: nomad0729@163.com

(编辑 张爱琴)