

基于负荷均衡及蚁群优化算法的配电网故障检测与仿真

配电网发生故障后,如果不能及时恢复,会给生产、生活带来极大的影响。传统的电网故障检测方法因为忽略了负荷均衡,所以收敛速度慢,不能满足现代配电网高速检测的要求。提出一种基于负荷均衡的交通评价函数和模型求解的蚁群优化算法。在配电网故障检测中对负荷均衡和故障调度任务进行考虑,蚁群算法通过矩阵解构造图来逐步运算出可靠方案,利用基于负荷均衡方案产能评价整个配电网故障信息进行更新规则,优化故障信号传送及配电网恢复。仿真实验表明,提出的基于负荷均衡的配电网故障检测方法取得了较好的指标评价价值。

宋 源/沈阳工程学院电力学院 高庆忠 曲延华/沈阳工程学院自动化学院
佟金锴/沈阳工程学院学报编辑部

随着国民经济的发展,电能在日常的生产、生活已经成为必不可少的能源^[1]。配电网发生故障将给医疗、军事和银行等部门带来不可估量的损失^[2]。

传统的配电网故障检测主要侧重于对检测任务的规模和节点建模^[3],强调的是配电网故障检测任务的完成数量和完成规模^[4],综合考虑发生检测故障任务状况下负荷均衡^[5]。在配电网运行状况下,一个合适的故障检测调度方案一定要斟酌配电网负荷的均衡性问题,不然就有可能发生某段电网长时间高负荷运行情况的现象,若某段电网长时间低负荷运行情况发生,配电网负荷的均衡性差,不利于电网资源配置^[6-9]。

提出一种基于负荷均衡的交通评价函数和模型求解的蚁群优化算法。在配电网故障检测中对负荷均衡和故障调度

任务进行考虑,蚁群算法通过矩阵解构造图来逐步运算出可靠方案,利用基于负荷均衡方案产能评价整个配电网故障信息进行更新规则,优化故障信号传送及配电网恢复。仿真实验表明,本文提出的基于负荷均衡的配电网故障检测方法取得了较好的指标评价价值。

检测模型建立与配电网调度方案评价

1. 配电网负荷均衡

在配电网中引入故障检测变量 x_{ij} ,故障检测任务 T_i 在整个配电网 R_i 上执行故障信息检测,对故障信息进行传送, $x_{ij}=1$,否则 $x_{ij}=0$ 。因此,可构造配电网故障矩阵 $x_{m'n}$,引入能够标识检测时间的时间窗口变量 D_{ij}^{wt} , D_{ij}^{et} 。故障变量 $D_{ij}=[D_{ij}^{wt}, D_{ij}^{et}]$,构造配电网故障检测方案矩阵 $D_{m'n}$, $D_{ij}(i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$ 表示故障检测任务 T_i 在整个配电网 R_i 上执行故障信息检测执行时间窗口,其长度 $D_{ij}=D_{ij}^{wt}-D_{ij}^{et}$ 。当 $D_{ij}\leq TW_{ij}$ 时,故障检测任务 T_i 在整个配电网 R_i 执行故障检测,否则不执行故障检测, $D_{ij}=0$ 。

时间窗口是限制配电网故障检测中的一个关键特性,完成故障检测任务同时间窗口关系紧密。故能够将时间视为配电网负荷均衡的衡量基准。规定负荷均衡是把全部故障检测任务在发送某故障信息过程中发送时间相加。根据规定可知全部配电网 R_i 的负荷为

$$C_R^{sche}(X, D) = \sum_{i=1}^m D_{ij} \quad (1)$$

辽宁省教育厅资助项目(L2013496)。



宋 源/助理工程师

关键词/Keywords

配电网·
故障检测·
负荷均衡·
蚁群算法·

所有配电网络的负荷为

$$C_R^{sche}(X,D) = \sum_{i=1}^m C_i^{sche}(X,D) \quad (2)$$

$C_R^{sche}(X,D)$ 是上限为 $C_R^{max} = \sum_{j=1}^n T_j^{dur}$ 的非常数, 其

均值满足 $\min\{C_i^{sche}(X,D)\} \leq C_R^{sche}(X,D)/m \leq \max\{C_i^{sche}(X,D)\}$ 。通过公式可以看出, 只要使得配电网各负荷均衡 $C_i^{sche}(X,D)$ 之间的差值尽可能小, 负荷均衡度就高, 配电网资源负荷越接近于 $C_R^{sche}(X,D)/m$ 。由于配电网负荷均值有界, 即 $C_R^{sche}(X,D)/m < C_R^{max}/m$, 因此配电网故障数据传递负荷均衡的调度非发散。

2. 配电网负荷均衡调度模型

在正常的状况下, 配电网故障检测调度取决于实现检测故障的数目、检测优先级高低和检测任务所用的时间, 故能够知道配电网调度目标函数是避开故障电网实现调度配电网输电情况。根据对故障信息传递负荷的规定剖析, 当满足对故障电网调度输电的条件下传递负荷越均衡, 即故障电网调度方案越适当, 故能够掌握电量负荷差值最小值是负荷均衡目标函数, 构建基于故障电网负荷均衡的调度模型。计算公式为

$$EI_T(X,D) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T_j^{pri} D_{ij} x_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T_j^{pri} T_j^{dur}} \quad (3)$$

$$O_1: \max \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T_j^{pri} D_{ij} x_{ij}$$

$$O_2: \min \left\{ \frac{\sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^n D_{ij} x_{ij} - \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n D_{ij}}{m} \right)}{m} \right\}^2$$

$$C_1: x_{ij} = 1, T_j^b = R_j^b$$

$$C_2: x_{ij} = 1, D_{ij} \subseteq TW_{ij}$$

$$C_3: \forall_j, x_{ij} = 1, T_j^{dur} \leq \sum_{j=1}^m D_{ij}$$

$$C_4: \forall_j, x_{ij} = 1, 0 < \sum_{j=1}^m D_{ij}$$

式中, O_1 为配电网故障信息调度的收益目标函数, 该值越高越优; O_2 为全部配电网负荷均衡目标函数, 该值越低越优。约束 C_1 说明故障信息传递

任务与配电网频段一致性; 约束 C_2 说明任务故障信息检测满足最早和最晚的结束时间要求; C_3 说明在一个故障检测完成必须满足的持续时间要求; C_4 说明为了达到负荷均衡, 配电网提供的服务任务。

3. 方案评价

为了评估配电网基于负荷均衡的故障检测取得调度方案, 定义故障检测时间优先级和故障信息负荷均衡两个调度方案做为评估指标, 分别评估方案可靠性和配电网资源负荷均衡度。

(1) 故障信息传送时间优先级加权

配电网故障信息传送时间优先级加权是配电网进行故障信息检测基本条件, 是检测时间与所有检测任务的比值。因此分母为检测任务的固定值, 分子为故障检测的目标函数, 所以, 该值越大, O_1 值越大。

(2) 故障信息检测负荷均衡度

故障信息检测负荷均衡度是与配电网负荷和配电网负荷均值的比值相减, 因为配电网负荷平均值有界, 所以若配电网负荷均方差比较低的时刻, 负荷均衡度就越高, O_2 越小。

$$EI_T(X,D) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^n D_{ij} x_{ij} - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T_j^{pri} D_{ij} x_{ij} \right) / m}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T_j^{pri} D_{ij} x_{ij}} \quad (4)$$

式中, m 为负荷设备个数; $D_{ij} x_{ij}$ 为单个最强异常负荷; T_j^{pri} 为平均负荷。

(3) 效能评估函数

故障检测时间优先级以及配电网负荷均衡度2个评估指标表示了调试以及配电网均衡度函数优化程度, 对配电网负荷均衡模型中的2个目标同时优化, 并以效能函数值的大小作为调度方案评估依据。计算公式为

$$\max E(X,D) = \{EI_T(X,D)\}^{\Gamma} \{EI_R(X,D)\} \quad (5)$$

式中, $\Gamma > 0$ 表示故障检测信息调度指标, 是配电网负荷均衡评价指标的关键参数。

蚁群解构造及算法流程

1. 配电网矩阵解构造图

在配电网故障信息检测过程中, 构造矩阵

解构造模型 $G = (N, E)$, 其中 $N = \{N_{ij}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n\}$, 为配电网 G 各故障节点间的集合。

故障检测信息在配电网 G 中各节点上, T 为故障检测任务在配电网执行故障信息检测的数量, η 为蚁群通过节点时, 故障检测任务 T 在配电网内执行检测信息的运行。计算公式为

$$\eta_{ij} = \frac{\min(T, TW_{ij}^{ct}) - \max(T, TW_{ij}^{ct})}{T_j^{dur}} \quad (6)$$

式中, $\max(T, TW_{ij}^{ct})$ 为最大负荷计算偏差结果, $\min(T, TW_{ij}^{ct})$ 为最小负荷计算偏差结果。

2. 解构造过程

配电网规模为 $A_{\max}$ 的蚁群中, 每个个体在进行解构造计算中, 要从某个节点开始计算, 根据配电网中信息和启动式进行选择, 按照式 (7) 和式 (8) 选择配电网 $G = (N, E)$, 确定故障信息检测任务。

$$\Pi^T(j) = \begin{cases} \arg_{i \in T} \max \{ \sum_{i=1}^m T_{ij} \}^a \\ \text{s. t. otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$$P = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^M T_{ij} \eta^\beta}{\sum_{i=1}^m \sum_{i=1}^m t^\alpha \eta^\beta} & j \in T \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\sum_{i=1}^M T_{ij}$ 为配电网故障检测任务在 T 时刻可调度的资源; $\eta = (1 - \frac{\sum \eta_{ij}}{m}) + \frac{T_{ij}}{\sum_{i \in T} T_i^{pri}}$ 为配电网故障检测优先传送时间满足的最小任务, 反之, 则表示当前调度任务相对较大。

为防止出现故障信息检测空间太大的现象, 设定虚拟故障节点 N 为从故障检测调度周期起始, 2 个数列分别代表故障检测任务, T_p, T_q ($p, q = 1, 2, \dots, n$) 检测任务时间相交, 检测任务先后对故障节点检测时间产生影响, 所以, 将此故障节点检测时间 T 集合作为检测空间。

$$\frac{\max(T_p^{ct}, T_q^{ct}) - \min(T_p^{ct}, T_q^{ct})}{T_p^{ct} - T_p^{st} + T_q^{ct} - T_q^{st}} < 1 \quad (9)$$

确定 $\Pi^T(j)$ 后, 按式 (10) 和式 (11) 检测配电网各节点, 故障检测分配。

$$\Pi_j^R(j) = \begin{cases} \arg_{j \in T} \max \{ \sum_{i=1}^m \tau_{ij} \eta_{ij} \}^\alpha \\ \text{Sr otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

$$P = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^M \tau_{ij} \eta^\beta}{\sum_{i=1}^m \sum_{i=1}^m \tau^\alpha \eta^\beta} & i \in R \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

3. 故障信息检测规则更新

蚁群算法在进行配电网故障检测迭代 t 的解构造过程中, 目的是减小蚁群中其他算法同样性的可能, 则按式 (12) 进行检测规则更新, 其中 ρ_t 为配电网局部故障信息检测系数, τ 为配电网线路上始终信息大小, 即

$$\tau_{ij}(t) = (1 - \rho_t) \tau_{ij}(t) + \rho_t \quad (12)$$

配电网故障信息检测算法在蚁群都完成调度可行解构造之后, 进行构造评价, 并得出最优解, 将最优解作为配电网的规则更新根据。则配电网规则如式 (13) 确定

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho_t) \tau_{ij}(t) + \rho_t (\Delta t_{ij}^{gb} + \Delta t) \quad (13)$$

式中, Δt_{ij}^{gb} 为蚁群在最优解的情况下检测故障节点 N 留下的信息。

4. 故障检测算法的基本步骤

基于负荷均衡的配电网故障检测蚁群优化算法工作流程分 6 个步骤。

1) 步骤 1。依据检测实际条件决定任务以及检测的规模, 同时故障实例映射是矩阵解构造 G 中实现配电网中故障节点起始信息设置。

2) 步骤 2。设置配电网故障检测算法基本参数, 蚁群规模等。

3) 步骤 3。算法运行: 初始化蚁群, 将检测任务集合加入任务调度, 并从起点出发, 根据检测任务搜索领域, 执行调度任务; 确定故障检测任务, 分配检测序列; 检测约束限制, 按照配电网进行时间窗口分配; 进行配电网局部网络的规则更新; 进行最优解构造; 评价蚁群构造的最佳解, 记录效能最优解。

4) 步骤4。配电网的最优解视作更新邻居，对全局信息进行更新。

5) 步骤5。循环迭代，算到终止条件。

6) 步骤6。得出配电网故障检测最优指标评价，记录并输出全局最优解。

仿真实验

1. 实验设计

在配电网中，设一个包括12个故障，4个子网的场景。其中每个故障都有1个同频发送信息素。故障检测周期为2014年12月23日00:00:00至2014年12月24日00:00:00。根据本文方法，配电网故障检测结果如表1所示。故障检测评估结果如表2所示。

表1 配电网故障检测统计

	故障时间/h	故障次数	故障状态 (%)
无故障	61.48	53.12	40.1
2星故障	19.62	48.11	25.22
3星故障	11.30	28.89	11.40
4星故障	5.16	20.97	9.34
5星故障	1.89	10	2.25
6星故障	0.59	3.22	1.02
7星故障	0.07	0.11	0.09

表2 故障检测评估结果

评估指标	优先加权满足度	配电网负荷均衡度
M0_ACO	93.19	97.17
LB_ACO	81.37	99.99
SP_ACO	93.16	93.66
GA	91.99	91.45
TSP	82.13	91.20
MPA	86.11	90.99
PSB	82.33	90.87
FCFS	80.01	90.72

表2中GA为文献[10]提出的一种基于遗传算法的配电网故障混合调度算法，同时使用和文献中一样的参数设置。TSP为文献[11]提出的基于故障检测任务综合优先度算法。MPA是采用多次扫描法，计算出各种方案值比较，FOM是对所有方案比较后，计算出的最终检测方案。PSB为基于优先级的故障检测算法，该酝酿算法为优先检测优先

级高的故障信息。FCFS为先到先检测的算法，其基本思想为优先检测比较早的故障信息。

从表2可以知道，基于负荷均衡的配电网故障检测模型效果最好。同时考虑负荷均衡和检测优先级加权，说明本文算法有良好的故障检测和配电网调度能力。

在相同时间内，同配电网环境下，本文方法与传统方法的异常故障特征节点检测的准确性如图1所示。

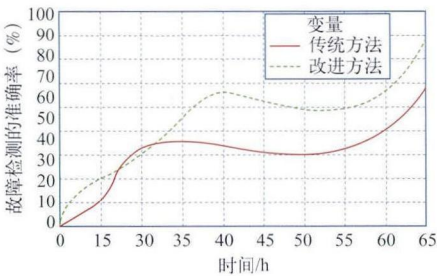


图1 配电网故障检测准确性比较图

由图1可知，在相同配电网环境下，本文方法比传统方法的检测准确性强，高出约22%，并且相对稳定。

在相同范围内，同配电网环境下，本文方法与传统方法的异常故障检测速率分析如图2所示。

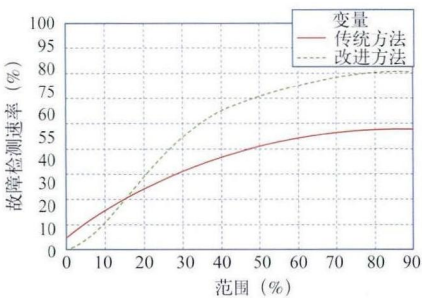


图2 配电网故障检测速率分析比较图

由图2可知，在相同配电网环境下，本文方法比传统方法的异常故障检测速度快出20%。

结束语

通过分析定义配电网负荷均衡，建立调度模型，提出了基于检测优先级加权和负荷均衡指标的方案交通评价函数，建立蚁群解构造，实现所有配
(下转第131页)

序的设计思想和流程。实验结果表明,本文所设计系统的性能要明显好于传统温控系统,温度偏差小于 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$,具有良好的控制性能。

参考文献

- [1] 徐长鸿,李培强,李欣然,等.温控负荷对电力系统低频振荡的影响[J].电工电能新技术,2013,32(2):58-62.
- [2] 李文才.基于AT89C52-DS18B20的大型电力网络负荷温控系统设计[J].电气应用,2014,33(22):88-92.
- [3] 黄绍川.基于模糊PID大型电力机组温度过热控制[J].控制工程,2014,21(6):1006-1010.
- [4] 苏梅芬,杨俊华,贺继胜,等.基于温控负荷的孤岛微电网建模与控制[J].广东电力,2014,27(1):37-42.
- [5] 孙蓉.基于模糊PID方法的大型电力机组温度过热控制[J].电气应用,2014,33(22):59-62.
- [6] 任万荣,李艳丽,束娜,等.智能变电站智能控制柜温控系统选型研究[J].电工技术,2013(8):8-9.

(收稿日期:2015-12-09) **EA**

(上接第108页)

电网的调度规则更新。仿真实验证明,提出的调度模型同蚁群算法综合考虑了故障检测和配电网负荷均衡,取得的方案获得了较好的时间优先级。

参考文献

- [1] 李云峰,陈祥国,武小悦.配电网调度模型[J].国防科技大学学报,2007,29(6):121-125.
- [2] Daminai S, et al. A continuous anytime planning module for an autonomous earth watching satellite[J]. Proc.of 4th international Workshop on Planning and Scheduling for Space, 2008.
- [3] 李云峰,武小悦.基于综合优先调度的配电网数传算法[J].系统工程学报,2007,22(6):644-648.
- [4] 李云峰,等.遗传算法在配电网调度问题中的应用[J].系统工程理论与实践,2008,28(1):123-131.
- [5] Savier J S, Das D. Impact of network reconfiguration on loss allocation of radial distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4):247-248.
- [6] Wang Shouxiang, Li Xiaojing, Xiao Chaoxia, et al. Multi-agent approach for service restoration of distribution system containing distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10):61-65, 81.
- [7] Wang Zengping, Zhang Li, Xu Yuqin, et al. Service restoration strategy for blackout of distribution system with distributed generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34):8-14.
- [8] Xu Yuqin, Zhang Li, Wang Zengping, et al. Algorithm of service restoration for large area blackout in distribution network with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4):135-141.
- [9] 杨丽君,卢志刚,文莹.含异步风电机组的配电网故障恢复研究[J].电网技术,2010,34(2):133-137.
- [10] 王增平,张丽,徐玉琴,等.含分布式电源的配电网大面积断电供电恢复策略[J].中国电机工程学报,2010,30(34):8-14.
- [11] Xu Yuqin, Zhang Li, Wang Zengpin. Agent-environment-rules model based algorithm of service restoration for large-area blackout of distribution system[J]. Power System Technology, 2009, 33(12):66-71.

(收稿日期:2014-09-15) **EA**