

含分布式电源的配电网多目标自愈研究

作为智能配电网的显著特征，配电网自愈控制问题可以看成多目标离散优化问题。应用蚁群算法，并结合模糊多目标处理方法来进行多目标配电网自愈控制的最优化。采用28节点的含分布式电源的配电网算例来进行仿真分析，结果表明该算法很好地解决了含分布式电源的配电网自愈问题，并且平衡了多个目标的满意度，得到了最佳自愈方案。

徐福宾/军事医学科学院院务部 张代红 吕 勤/国网浙江省电力公司嘉兴供电公司 周伟杰/上海电力学院电气工程学院



徐福宾/工程师

随着智能电网概念的提出和研究的深入，智能配电网作为智能电网的重要组成部分，被越来越多的学者所关注。配电网作为直接与用户相连的供电网络，其自动化程度直接影响智能电网的发展，是形成智能配电网发展战略的基础。具体要求在两个方面：一方面在故障发生前消除隐患，避免故障的可能；另一方面，在于故障发生时如何快速地检测和隔离故障位置并恢复供电。以上这两方面就是配电网故障自愈的要求，也是故障自愈需要实现的功能。

目前，许多配电系统并不完全自动化。在大多数情况下，所需的纠正措施、故障定位、隔离和服务恢复由操作员手动执行，这个过程费时费力。未来的智能电网应该具有自愈功能，当遇到故障，在不违反任何系统约束的情况下，自动和智能地执行纠正措施来恢复系统到最佳状态。能够快速和灵活地将故障隔离并重新配置网络是自我修复功能的重要组成部分。

配电网故障自愈是一个多目标优化问题，本文引入模糊满意度，提出了一种综合考虑多种目标的配电网故障自愈

模型和算法。该模型把联络开关和分段开关综合在一起来进行自愈控制，把每个可操作的联络开关和分段开关都当作蚂蚁的一段路径，通过信息素的修改迭代出综合满意度最高的自愈方案。

引入模糊满意度的配电网多目标自愈控制模型

配电网的故障自愈问题是多目标优化问题，需要综合考虑多个优化目标，常用的有开关操作次数、网络损耗和负荷恢复量等，同时还应该考虑各种约束条件如网络约束和辐射型约束等因素，为了综合考虑多个目标，引入模糊满意度的概念，把多个目标转化成最小化公共满意度的目标，本文考虑的优化目标有失电负荷最小、开关操作代价最小和系统有功损耗最小，目标函数如下。

(1) 重要负荷恢复供电、失电负荷最小

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^{N_{\text{bus}}} \omega_i L_i y_i \quad (1)$$

式中， N_{bus} 为故障恢复后的所有的母线数量； L_i 为恢复供电第*i*条母线所接的负荷； y_i 为第*i*条母线负载的状态（等于1为一个未恢复负荷，等于0表示已恢复负荷）。

配电网负荷结构复杂，重要程度不一，本文中引入负荷的权重系数 ω_i ， ω_i 越大，代表负荷越重要，必须首先考虑恢复供电。

(2) 开关操作代价最小

$$\min f_2 = \sum_{i=1}^m \lambda_i t_i + \sum_{j=1}^n \lambda_j (1 - s_j) \quad (2)$$

关键词/Keywords

故障自愈 ·
多目标 ·
模糊满意度 ·
蚁群算法 ·
分布式电源 ·

式中, s_j 为分段开关的状态, 1 代表保持闭合状态, 0 代表由闭合变为打开状态; t_i 为联络开关的状态, 1 代表由打开变为闭合状态, 0 代表保持打开状态; λ_i 、 λ_j 分别为各个开关操作代价的权重系数; m 为联络开关的总数量; n 为联络开关的总数量。

(3) 系统有功损耗最小

$$\min f_3 = \sum_{i=1}^n k_i r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \quad (3)$$

式中, n 为支路总数; r_i 为支路 i 的电阻; P_i 、 Q_i 和 V_i 为支路的有功功率、无功功率和节点电压幅值; k_i 为开关的状态变量, 0、1 分别代表开、合。

引入满意度模糊概念, 定义隶属函数 $\mu_1(X)$ 、 $\mu_2(X)$ 和 $\mu_3(X)$ 分别对应于目标函数 f_1 、 f_2 和 f_3 , 计算公式为

$$\mu_1(f_1) = \begin{cases} 0 & f_1 \geq f_{1,\max} \\ (f_{1,\max} - f_1) / (f_{1,\max} - f_{1,\min}) & f_{1,\min} < f_1 < f_{1,\max} \\ 1 & f_1 \leq f_{1,\min} \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_2(f_2) = \begin{cases} 0 & f_2 \geq f_{2,\max} \\ (f_{2,\max} - f_2) / (f_{2,\max} - f_{2,\min}) & f_{2,\min} < f_2 < f_{2,\max} \\ 1 & f_2 \leq f_{2,\min} \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_3(f_3) = \begin{cases} 0 & f_3 \geq f_{3,\max} \\ (f_{3,\max} - f_3) / (f_{3,\max} - f_{3,\min}) & f_{3,\min} < f_3 < f_{3,\max} \\ 1 & f_3 \leq f_{3,\min} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $f_{1,\min}$ 、 $f_{2,\min}$ 和 $f_{3,\min}$ 为对应于仅以自身为目标优化得到的最小值; $f_{1,\max}$ 、 $f_{2,\max}$ 和 $f_{3,\max}$ 为对应于优化过程中出现的各个目标的最大值。

$\mu_1(f_1)$ 、 $\mu_2(f_2)$ 和 $\mu_3(f_3)$ 分别表示以失电损失、系统有功损耗和开关操作代价为目标接近其最佳值的满意程度。 $\mu_1(f_1)$ 较大, 说明失电损失目标比较理想; $\mu_2(f_2)$ 较大, 说明系统有功损耗目标比较理想; $\mu_3(f_3)$ 较大, 说明开关操作代价目标比较

理想。

为了综合协调失电负荷、开关操作代价和系统有功损耗这三个目标, 根据满意度模糊的概念, 上述模型可转化为

$$\max \lambda \quad (7)$$

$$\lambda = \min[\mu_1(f_1), \mu_2(f_2), \mu_3(f_3)] \quad (8)$$

式中, $\mu_1(f_1)$ 、 $\mu_2(f_2)$ 和 $\mu_3(f_3)$ 分别为系统的失电损失、系统有功损耗和开关操作代价模糊满意度; λ 为三个目标的公共模糊满意度。

蚁群算法求解配电网自愈模型

蚁群算法是模拟蚂蚁觅食行为来进行优化的, 蚂蚁搜索食物的过程中通过在路径上释放信息素来标识路径, 与其他蚂蚁交换信息素来寻找最优路径。配电网一般是闭环设计, 开环运行, 含有大量的分段开关及少量的联络开关, 这样, 配电网在发生故障后才拥有自愈的可能。本文应用蚁群算法解决配电网自愈控制问题, 控制的步骤如下:

1) 定义人工蚂蚁, 把所有的联络开关和分段开关都看作路径, 初始化所有路径上的信息素, 每个路径的初始信息素是相同的。设信息素 $\tau_i(0) = C (i=1, 2, \dots, n)$, 其中 C 为常数。寻优过程中, 其信息素 τ_i 将随着蚂蚁通过后留下的信息素来修正。

2) 算法开始, 首先需要的是失电区域的搜索, 蚂蚁将沿着配电网进行搜寻, 并将搜寻的结果做上标记。

3) 判断分布式电源是否存在于失电区域。若存在, 则根据分布式电源的容量及负荷相关情况判定是否可以转换至孤岛状态运行。若能, 找到相应的网络开关并断开, 然后组成孤岛运行; 如果不能, 则断开分布式电源接入点的开关。若此时所有失电区域都恢复了供电, 则算法结束, 退出程序。

4) 若不存在, 或者分布式电源切换至孤岛运行后, 仍然有未恢复供电的区域, 则统计连接带电区与停电区的路径, 蚂蚁以路径上信息素计算得出概率 l 选择一个可联络带电区和停电区的可操作联络开关, 将其闭合, 检查所有的失电负荷是

否都已恢复供电，如果没有全部恢复，则转步骤3)直到所有的负荷都恢复供电。

5) 蚂蚁根据概率选择一个网络中断开的联络开关，将其闭合，然后以信息素计算的概率2打开形成的环网的分段开关，再判断潮流及电压值等约束条件是否满足，若不满足，则将此开关恢复原来的状态，重新执行步骤5)。

6) 计算目标函数值，若新的配电网结构的综合满意度比前一个小，则接受该网络结构，否则不接受。当蚂蚁完成选择后，都会在其选择的开关留下一定量的信息素，从而改变相应开关上的信息素。

修改公式为

$$\tau_{i+1} = \tau_k + \rho_L \tau_i \tag{10}$$

式中， ρ_L 为路径上原有信息素的遗忘系数； τ_i 为路径上原有的信息素； τ_k 为第 k 只蚂蚁在该开关上留下的信息素。

在多目标规划时候，由于要使其公共满意度最大化，因此用下式计算

$$\tau_k = C\lambda \tag{11}$$

式中， C 为一常数； λ 为当前方案经济性和可靠性的公共满意度。

当路径的信息素修改完成后然后转到步骤4)，直至目标函数值变化极小，则认为算法已经收敛，输出此时的网络结构，即为最优的故障自愈恢复策略。

算例分析

本节以包括分布式电源的含环网28节点配电网系统为算例，进行复杂的多端电源配电网的故障自愈分析。该系统网络接线图如下图所示。网络故障自愈策略如下表所示。

由下表可以看出，蚁群算法可以对含DG的配电网进行故障自愈控制，通过单目标和多目标配电网故障自愈的结果比较可以得出，单目标策略的优化结果单一，甚至对其他指标有不良的影响，多目标优化能在多个互相影响的优化目标中

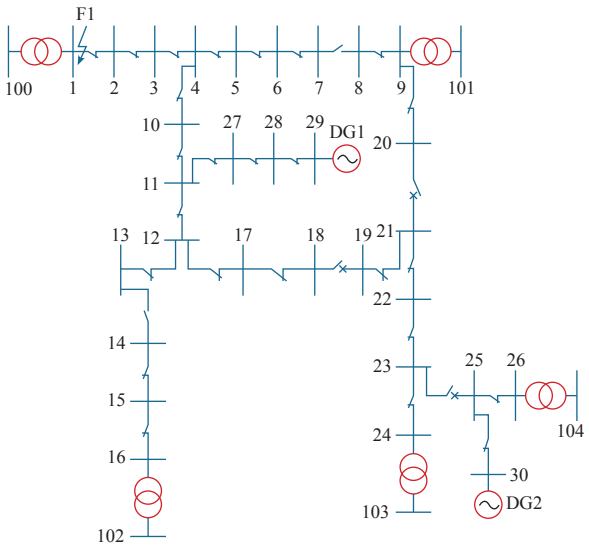


图 含DG的28节点系统网络接线

表 28节点系统网络故障自愈策略

优化目标	闭合的联络开关	断开的分段开关	公共满意度
失电负荷最小 (DG1转化为微网运行)	闭合7-8	断开11-12	0.436 7
	闭合13-14	断开11-27	
	闭合20-21	断开9-20	
开关操作 代价最小	闭合18-19	断开17-18	0.335 6
	闭合7-8	断开11-12	
系统有功损耗 最小	闭合13-14	断开4-10	0.553 4
	闭合20-21	断开12-17	
	闭合18-19	断开21-22	
	闭合7-8	断开11-12	
综合满意度最大 (DG1转化为微网运行)	闭合13-14	断开10-11	0.878 6
	闭合18-19	断开12-17	
	闭合7-8	断开11-12	

找一个平衡点，得到同时满足多个优化需求的最优自愈方案。

结束语

本文应用蚁群算法，并结合模糊多目标处理方法，对多目标的配电网自愈控制的最优化策略进行了研究，平衡了多个优化目标的满意度，解决了含分布式电源的配电网多目标自愈问题。

(收稿日期：2015-07-12) EA