

基于加权理想点法的配网故障供电恢复策略

马静,许冬,王增平

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206)

摘要: 提出一种基于加权理想点法的配网故障供电恢复策略。首先以网损、电压质量、负荷均衡作为重构目标,确定综合评价函数,并利用粗糙集理论确定各子目标函数的权系数,然后基于理想点法获取综合评价函数的最优解。验证结果表明,所提策略更符合实际配网供电恢复的要求,同时克服了传统权重设置依靠先前经验带来的不确定性问题,计算速度快。

关键词: 配电; 线路故障; 供电恢复; 优化; 粗糙集; 理想点法

中图分类号: TM 772

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.02.011

0 引言

配网供电恢复是在配网发生故障后,满足节点电压和支路电流等约束条件下,通过网络重构尽可能多地对非故障区的失电负荷迅速恢复供电,同时兼顾故障恢复后配网运行的经济性和可靠性。因此,配网供电恢复是一个考虑多约束条件的多目标组合优化问题。

目前在供电恢复目标函数制定和求解方面已有诸多研究成果,主要分为如下3类。

a. 数学优化法。该类方法适用于处理系统规模不大、复杂性不高的供电恢复问题,具有完整的数学理论基础,并得到了广泛的应用,主要有分支界定法^[1]、整数规划法^[2-3]、混合整数法^[4-5]等。

b. 启发式搜索法。该类方法是配网故障恢复常用的方法,大多是基于开关操作。在搜索的过程中依据问题本身特性,加入一些具有启发性的信息,确定启发性信息的方向,使之朝着最优解的方向优化。主要有基于树结构的搜索法^[6-7]、基于一阶负荷矩法^[8]和分级搜索法^[9]等。

c. 人工智能法。该类方法在解决特定供电恢复问题方面体现出较好的效果,因此多种供电恢复策略常常借助于该类方法,目前主要有粒子群算法^[10]、专家系统^[11]、遗传算法^[12-13]、启发式算法^[14]、蚁群算法^[15]等。

上述方法的优点是能够将供电恢复精确地表示成约束条件和目标函数的形式,但是由于供电恢复问题是一个多目标优化的复杂问题,各子目标之间既相互联系又相互矛盾,因此整体目标函数难以描述,同时在权重设置方面,也常常依赖主观经验性知识,因此求解过程往往非常复杂。

针对上述问题,本文提出一种基于加权理想点法的配网故障供电恢复策略。首先,以网损、电压质量、负荷均衡作为重构目标,确定综合评价函数,并利用粗糙集 RS(Rough Set)理论确定各子目标函数的权系数,然后采用加权理想点法获取综合评价函数的最优解。验证结果表明该方法通过多目标函数代替单目标函数求最优解,考虑因素更为全面,且更符合实际配网供电恢复的要求,同时克服了传统权重设置依赖先前经验带来的不确定性问题,计算速度快,易于工程实现。

1 约束条件和目标函数

在对配网故障进行准确定位和隔离后,故障区下游将出现失电负荷。首先,为保证对失电负荷恢复供电,虚拟闭合原网络中所有可恢复供电的联络开关,需要注意的是,该操作有可能使分支路径互联形成环路(2个不同源点之间的路径也可等效为1个环路)。在此基础上,将环路中所有可开断的支路构成虚拟开断集。然后,考虑到配网辐射型约束,对虚拟开断集的各个开关进行虚拟开断,并对开断后的网络进行潮流计算,以判断每种虚拟开断是否满足节点电压约束和支路电流约束。在满足上述约束条件下,计算网损、电压质量以及负荷均衡等多目标函数的最优解,进而确定最优开断方案。

1.1 节点电压和支路电流约束

配网节点电压幅值约束如下:

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad (1)$$

其中, U_i^{\max} 和 U_i^{\min} 分别为节点 i 电压有效值的上限和

收稿日期:2013-07-03;修回日期:2014-01-06

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012-CB215200);国家自然科学基金资助项目(50907021,51277193,50837002);“111”引智计划(B08013);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(11MG01,09QX64);教育部留学回国人员科研启动基金资助项目([2011]1139)

Project supported by the National Key Basic Research Program of China(973 Program)(2012CB215200),the National Natural Science Foundation of China(50907021,51277193,50837002),“111” Project(B08013),the Fundamental Research Funds for the Central Universities(11MG01,09QX64) and the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars,State Education Ministry([2011]1139)

下限。

为满足配网线路的热稳定性约束,根据网络中各支路允许通过的最大电流定义支路电流约束矩阵 I^{\max} :

$$I^{\max} = \begin{bmatrix} I_{1,1}^{\max} & \cdots & I_{1,j}^{\max} & \cdots & I_{1,N}^{\max} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ I_{i,1}^{\max} & \cdots & I_{i,j}^{\max} & \cdots & I_{i,N}^{\max} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ I_{N,1}^{\max} & \cdots & I_{N,j}^{\max} & \cdots & I_{N,N}^{\max} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $I_{i,j}^{\max}$ 为支路 $i-j$ 允许通过的最大电流。若节点 i 和 j 之间不存在联络支路, $I_{i,j}^{\max}=0$; 同时, 节点 i 自身联络支路的最大电流 $I_{i,j}^{\max}=0$ 。

设配网支路电流约束为:

$$I_{i,j} \leq I_{i,j}^{\max} \quad (3)$$

其中, $I_{i,j}$ 为支路 $i-j$ 的电流。

1.2 网损函数

配网网损的目标函数为:

$$C_1 = \min \left[\sum_{i=1}^m \left(\frac{P_{i,j}^2 + Q_{i,j}^2}{U_i^2} \right) r_{i,j} k_{i,j} \right] \quad (4)$$

其中, m 为支路数; $P_{i,j}$ 和 $Q_{i,j}$ 为支路 $i-j$ 的有功和无功功率; $r_{i,j}$ 为支路 $i-j$ 的电阻; $k_{i,j}$ 为支路 $i-j$ 的状态变量, 0 表示打开, 1 表示闭合。网损函数 C_1 越小, 表明网络结构越节能, 电能有效利用率越高, 经济性越好。

1.3 电压质量函数

电压质量的目标函数为:

$$C_2 = \| \mathbf{U}_i - \mathbf{U}_e \| \quad (5)$$

其中, \mathbf{U}_i 和 \mathbf{U}_e 分别为转供路径上节点 i 电压的实际测量值向量和额定值向量。电压质量函数 C_2 越小, 表明实际运行时, 各节点的电压越接近额定电压, 电压质量越好。

1.4 负荷均衡函数

负荷均衡是指配网负荷分布与各线路供电相匹配的能力, 其作用主要是提高线路的运行效率与配网的供电能力, 同时, 可降低网络损耗以及过负荷风险。以负荷均衡分布为优化目标的函数 C_3 可以表示为:

$$C_3 = \min \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{P_{i,j}}{P_{i,j\max}} \right)^2 \quad (6)$$

其中, $P_{i,j\max}$ 为支路 $i-j$ 的最大有功功率。负载率均衡目标函数 C_3 越小, 表示线路的负载率越均衡, 设备的有效利用率越高, 系统整体供电能力越强。

2 基于加权理想点法的配网供电恢复策略

首先, 确定综合评价函数, 并利用粗糙集理论确定各子目标函数的权系数, 然后基于理想点法获取综合评价函数的最优解。

2.1 粗糙集理论相关知识

粗糙集理论在电力系统中应用广泛^[16-20], 它是一

种处理模糊和不确定知识的数学工具, 可以处理定性、定量因素。其特点是不需要提供问题所需处理的数据集合以外的任何先验信息, 直接对数据进行分析 and 推理, 客观地提取数据间的相互依赖关系。本文采用粗糙集理论求取目标函数的权重系数, 把权重问题转化为粗糙集中属性重要性评价问题, 利用粗糙集理论中的依赖度和属性重要性评价方法, 计算目标函数的权重。该方法克服了传统权重设置依赖先前经验带来的不确定性问题, 更加贴近电网实际情况。

a. 基本概念。

知识表达系统 $S=(U, A, V, f)$, 其中 U 为对象的非空有限集合, 称为论域; A 为属性的非空有限集合; V 是属性 A 的值域; $f: U \times A \rightarrow V$ 是一个信息函数, “ x ”表示运算关系, 该运算为每个对象的每个属性赋予一个信息值。知识表达系统数据以关系的形式表达, 当 $A=C \cup D, C \cap D = \emptyset$ 时, C 称为条件属性集, D 称为决策属性集, 把具有条件属性和决策属性的知识表达系统称为决策表, 它是一类特殊且重要的知识表达系统。

粗糙集理论基础是分类机制, 它将分类理解为等价关系(亦称知识), 并用这些等价关系对特定空间进行划分^[16]。假设 R 为论域 U 上的一个等价关系, R 将论域 U 划分成互不相交的子集 E_i , 记为 $U/R = \{E_1, E_2, \dots, E_k\}$, 其中 “/” 表示划分关系, E_i 和空集称为基本集。对 $X \subseteq U$, 若子集 X 不能用基本集的并集准确表示, 则称 X 为粗糙集。

定义 X 的上、下近似集为:

$$\begin{cases} R^-(X) = \cup \{x \in U | [x]_R \cap X \neq \emptyset\} \\ R_-(X) = \cup \{x \in U | [x]_R \subseteq X\} \end{cases} \quad (7)$$

其中, 上近似集 $R^-(X)$ 表示在知识 R 下可能属于 X 的元素组成的集合; 下近似集 $R_-(X)$ 表示在知识 R 下肯定属于 X 的元素组成的集合; $[x]_R$ 表示按等价关系 R 划分的包含 x 的等价类, $x \in U$ 。

设知识 P 和知识 Q 均为论域 U 的等价关系, 定义 P 的 Q 正域为 $\text{pos}_Q(P)$:

$$\text{pos}_Q(P) = \cup_{x \in U/P} Q_-(X) \quad (8)$$

其中, $Q_-(X)$ 表示在知识 Q 下属于粗糙集 X 的元素组成的集合; $\text{pos}_Q(P)$ 表示论域 U 中所有通过知识 Q 可以准确划分到 U/P 的元素集合。

b. 知识依赖度。

为说明知识 P 与知识 Q 之间的依赖关系, 定义知识 P 对知识 Q 的依赖度为 $\gamma_Q(P)$:

$$\gamma_Q(P) = \frac{\text{card}(\text{pos}_Q(P))}{\text{card}(U)} \quad (9)$$

其中, $\text{card}(\cdot)$ 表示集合基数。

显然, $0 \leq \gamma_Q(P) \leq 1$, 依赖度越接近于 1, 表明知

识 P 对知识 Q 的依赖程度越高。

c. 属性重要度。

在决策表中,条件属性 C_i 对决策属性集 D 的重要性并非同等重要。删除属性 C_i 后,定义决策属性集 D 对条件属性 $C-C_i$ 对的依赖度为:

$$\gamma_{C-C_i}(D) = \frac{\text{card}(\text{pos}_{C-C_i}(D))}{\text{card}(U)} \quad (10)$$

由式(9)和(10)得,属性 C_i 对决策属性集 D 重要度为:

$$\varphi(C_i) = \gamma_C(D) - \gamma_{C-C_i}(D) \quad (11)$$

重要度 $\varphi(C_i)$ 值越大,属性 C_i 在条件属性集 C 中的重要性越高。

2.2 供电恢复策略综合评价函数及权重计算

2.2.1 建立综合评价函数

在供电恢复策略中,设评价对象有 p 个目标函数,定义 $\mathbf{G} = [g_1(x), g_2(x), \dots, g_p(x)]$ 为评价函数向量, $g_1(x), g_2(x), \dots, g_p(x)$ 均为子目标函数。评价函数的权重向量为 $\mathbf{W} = [w_1, w_2, \dots, w_p]$, 它们均满足归一性和非负性条件:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^p w_i = 1 \\ 0 \leq w_i \leq 1 \end{cases} \quad (12)$$

建立综合评价函数 Y 为:

$$Y = \mathbf{G}\mathbf{W}^T = [g_1, g_2, \dots, g_p][w_1, w_2, \dots, w_p]^T \quad (13)$$

2.2.2 目标函数权重系数计算

为计算子目标函数权重,先建立关系数据模型:将子目标函数作为条件属性,形成条件属性集 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_p\}$;将约束条件作为决策属性,形成决策属性集 $D = \{D_1, D_2, \dots, D_q\}$ 。设有 k 个评价对象,则第 t 个对象中子目标函数 $C_i (i=1, 2, \dots, p)$ 的信息值为 C_{it} , 约束条件 $D_j (j=1, 2, \dots, q)$ 的信息值为 D_{jt} , 将子目标函数和约束条件的信息值视为一条信息,显然 $u_t = \{C_{t1}, C_{t2}, \dots, C_{tp}, D_{t1}, D_{t2}, \dots, D_{tq}\}$ 。那么,构成论域 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_t, \dots, u_k\}$, 由 u_t 构成的信息表就是评价对象的关系数据模型,如表 1 所示。

表 1 关系数据表
Tab.1 Relative data

对象	C_1	C_2	...	C_p	D_1	D_2	...	D_q
u_1	C_{11}	C_{12}	...	C_{1p}	D_{11}	D_{12}	...	D_{1q}
u_2	C_{21}	C_{22}	...	C_{2p}	D_{21}	D_{22}	...	D_{2q}
\vdots	\vdots	\vdots		\vdots	\vdots	\vdots		\vdots
u_k	C_{k1}	C_{k2}	...	C_{kp}	D_{k1}	D_{k2}	...	D_{kq}

子目标权重系数计算步骤如下。

a. 计算决策属性集 D 对条件属性集 C 的依赖度 $\gamma_C(D)$ 。

b. 计算决策属性集 D 对条件属性 $C-C_i$ 的依赖度 $\gamma_{C-C_i}(D)$ 。

c. 计算属性 C_i 的重要度 $\varphi(C_i)$ 。

d. 计算子目标函数 i 的权重系数:

$$w_i = \frac{\varphi(C_i)}{\sum_{j=1}^p \varphi(C_j)} \quad i=1, 2, \dots, p \quad (14)$$

2.3 综合评价函数的最优解计算

评价指标一般可以分为收益型指标和损失型指标:当收益型指标越大时,评价结果越有利;当损失型指标越大时,评价结果越不利。基于此,理想点和反理想点^[21]可定义如下。

当指标为收益型指标时,有:

$$\begin{cases} h_j(+) = \max f_j(x) \\ h_j(-) = \min f_j(x) \end{cases} \quad (15)$$

当指标为损失型指标时,有:

$$\begin{cases} h_j(+) = \min f_j(x) \\ h_j(-) = \max f_j(x) \end{cases} \quad (16)$$

其中, $h_j(+)$ 、 $h_j(-)$ 分别为对象 H 的第 j 个指标的理想点向量和反理想点向量; $f_j(x)$ 为该指标的真实值; $j=1, 2, \dots, p$ 。

加权理想点评价函数即为指标到理想点和反理想点的距离,如式(17)所示。

$$\begin{cases} \|f_j(x) - h_j(+)\| \rightarrow \min \\ \|f_j(x) - h_j(-)\| \rightarrow \max \end{cases} \quad (17)$$

指标的解离理想点越近,离反理想点越远,解越优。根据式(17),定义向量 f_j 中元素 $f_{ji} (i=1, 2, \dots, k)$ 的正评价函数和反评价函数为:

$$\begin{cases} g_j(+) = \left[\frac{f_{ji}(x) - h_{ji}(+)}{h_{ji}(+)} \right]^2 \\ g_j(-) = \left[\frac{f_{ji}(x) - h_{ji}(-)}{h_{ji}(-)} \right]^2 \end{cases} \quad (18)$$

将式(14)和式(18)代入式(13),可得加权理想点评价函数为:

$$\begin{cases} Y_i(+) = \sum_{j=1}^p w_i \left[\frac{f_{ji}(x) - h_{ji}(+)}{h_{ji}(+)} \right]^2 \\ Y_i(-) = \sum_{j=1}^p w_i \left[\frac{f_{ji}(x) - h_{ji}(-)}{h_{ji}(-)} \right]^2 \end{cases} \quad (19)$$

进而,采用欧氏距离定义评价函数到正理想点和反理想点的距离:

$$\begin{cases} L_i(+) = \sqrt{Y_i(+)} = \left[\sum_{j=1}^p w_i \left[\frac{f_{ji}(x) - h_{ji}(+)}{h_{ji}(+)} \right]^2 \right]^{1/2} \\ L_i(-) = \sqrt{Y_i(-)} = \left[\sum_{j=1}^p w_i \left[\frac{f_{ji}(x) - h_{ji}(-)}{h_{ji}(-)} \right]^2 \right]^{1/2} \end{cases} \quad (20)$$

综合考虑式(20)中正理想点距离和反理想点距离,定义加权理想点贴近度的计算公式为:

$$T_i = \frac{L_i(-)}{L_i(+) + L_i(-)} \quad (21)$$

其中,贴近度 T_i 越大,代表距离正理想点越近,距离反理想点越远,多目标函数的解就越合理,取贴近度最大值为综合评价函数的最优解。

3 仿真验证

3.1 仿真模型和潮流计算

a. 采用 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建 IEEE 33 节点系统模型进行仿真分析,电气接线图如图 1 所示。设支路 8-9 和支路 13-14 同时发生故障,故障定位系统能快速识别故障并跳开相应的隔离开关。此时造成故障区下游负荷失电,定义失电负荷集合为:

$$\begin{cases} K_1 = \{9, 10, 11, 12, 13\} \\ K_2 = \{14, 15, 16, 17\} \end{cases} \quad (22)$$

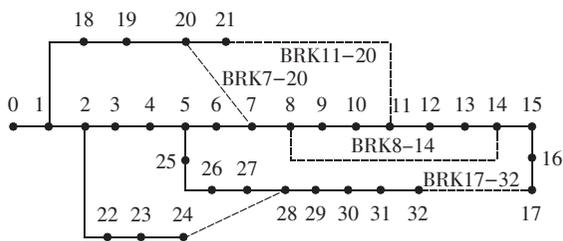


图 1 IEEE 33 节点系统

Fig.1 IEEE 33-bus system

失电负荷确定后,联络开关 BRK11-21、BRK8-14、BRK17-32 自动闭合,对失电负荷进行供电恢复。

b. 根据尽可能多地恢复供电的原则,对于失电集合 K_1 中的负荷,当满足支路电流约束时,通过闭合开关 BRK11-21 可以对失电负荷快速完全恢复供电;当不满足支路电流约束时,需要根据该条供电路径上所有负荷的重要程度,切除一部分较为不重要的负荷。对于失电集合 K_2 中的负荷,闭合两开关 BRK8-14、BRK17-32 后,均可恢复供电,但此时形成了环路:

$$L_{loop} = \{5, 6, 7, 8, 14, 15, 16, 17, 32, 31, 30, 29, 28, 27, 26, 25\} \quad (23)$$

c. 为了保持配网的辐射型结构,对虚拟开断集中的各个开关进行虚拟开断,并对开断后的网络进行潮流计算。然后,判断每种虚拟开断是否满足节点电压约束 D_1 和支路电流约束 D_2 ,同时计算网损函数 C_1 、电压质量函数 C_2 和负荷均衡函数 C_3 的值,结果如表 2 所示。

3.2 权重系数

决策表中,决策属性集和条件属性集分别为 $D = \{D_1, D_2\}$, $C = \{C_1, C_2, C_3\}$ 。

a. 决策属性集 D 对条件属性集 C 的依赖度。

由表 2 可知,决策属性集 D 对论域 U 的划分: $U/D = \{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4\}$, 其中 $Y_1 = \{1, 15, 16\}$, $Y_2 = \{2, 3, 12, 13, 14\}$, $Y_3 = \{4\}$, $Y_4 = \{5, 6, 7, 8, 9, 10, 11\}$; 条件属性集 C 对论域 U 的划分: $U/C = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}\}$, 其中 $X_1 = \{1\}$, $X_2 = \{2, 12\}$, $X_3 = \{3\}$, $X_4 = \{4\}$, $X_5 = \{5\}$, $X_6 = \{6, 10, 11\}$, $X_7 =$

表 2 潮流计算结果

Tab.2 Results of power flow calculation

方案	开断支路	$C_1/(kV \cdot A)$	C_2/kV	C_3	D_1	D_2
1	5-6	0.31	3.3	0.19	0	0
2	6-7	0.28	2.8	0.18	1	0
3	7-8	0.24	2.4	0.17	1	0
4	8-14	0.24	2.2	0.17	0	1
5	14-15	0.25	2.2	0.17	1	1
6	15-16	0.24	2.0	0.16	1	1
7	16-17	0.26	1.8	0.16	1	1
8	17-32	0.25	1.9	0.15	1	1
9	32-31	0.26	2.0	0.15	1	1
10	31-30	0.24	2.0	0.16	1	1
11	30-29	0.24	2.0	0.16	1	1
12	29-28	0.28	2.8	0.18	1	0
13	28-27	0.30	3.0	0.21	1	0
14	27-26	0.31	3.3	0.22	1	0
15	26-25	0.31	3.3	0.22	0	0
16	25-5	0.32	3.7	0.23	0	0

注:在节点电压约束和支路电流约束中,“0”表示不满足约束条件,“1”表示满足约束条件。

$\{7\}$, $X_8 = \{8\}$, $X_9 = \{9\}$, $X_{10} = \{13\}$, $X_{11} = \{14, 15\}$, $X_{12} = \{16\}$ 。以子集 Y_1 为例,它表示既不满足节点电压约束,也不满足支路电流约束的方案集合。

决策属性集 D 的条件属性集 C 正域 $pos_C(D)$ 为:

$$pos_C(D) = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{12}\} = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 16\} \quad (24)$$

根据式(9),决策表中决策属性集 D 对条件属性集 C 的依赖度:

$$\gamma_C(D) = \frac{\text{card}(pos_C(D))}{\text{card}(U)} = \frac{14}{16} = 0.8750 \quad (25)$$

b. 决策属性集 D 对条件属性 $C-C_i$ 的依赖度。

以网损为例,条件属性集 $C-C_1$ 对论域 U 的划分为: $U/C-C_1 = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}\}$, 其中 $X_1 = \{1\}$, $X_2 = \{2, 12\}$, $X_3 = \{3\}$, $X_4 = \{4, 5\}$, $X_5 = \{6, 10, 11\}$, $X_6 = \{7\}$, $X_7 = \{8\}$, $X_8 = \{9\}$, $X_9 = \{13\}$, $X_{10} = \{14, 15\}$, $X_{11} = \{16\}$ 。

$$pos_{C-C_1}(D) = \{X_1, X_2, X_3, X_5, X_6, X_7, X_8, X_{10}\} = \{1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15\} \quad (26)$$

依据式(10),决策属性集 D 对删除网损后的条件属性集 $C-C_1$ 的依赖度:

$$\gamma_{C-C_1}(D) = \frac{\text{card}(pos_{C-C_1}(D))}{\text{card}(U)} = \frac{12}{16} = 0.7500 \quad (27)$$

同理,可求得与电压质量和负荷均衡相应的依赖度分别为 0.7500 和 0.8125。

c. 条件属性 C_i 的重要度。

依据式(11),网损、电压质量和负荷均衡的重要度分别为:

$$\begin{cases} \varphi(C_1) = \gamma_C(D) - \gamma_{C-C_1}(D) = 0.1250 \\ \varphi(C_2) = \gamma_C(D) - \gamma_{C-C_2}(D) = 0.1250 \\ \varphi(C_3) = \gamma_C(D) - \gamma_{C-C_3}(D) = 0.0625 \end{cases} \quad (28)$$

d. 子目标函数的权重系数。

根据式(14),计算网损、电压质量和负荷均衡的权重系数分别为 0.4000、0.4000 和 0.2000。各指标的依赖度、重要度和相应的权重系数如表 3 所示。

表 3 各指标的依赖度、重要度和相应的权重系数
Tab.3 Dependency, importance and weight coefficient of different indexes

评价函数	依赖度	重要度	权重系数
网损	0.7500	0.1250	0.4000
电压质量	0.7500	0.1250	0.4000
负荷均衡	0.8125	0.0625	0.2000

3.3 贴近度和方案等级

在评价函数中,网损、电压质量和负荷均衡均属于损失型函数,其值越小,网络结构和开关操作方案越合理。定义满足节点电压和支路电流约束条件的方案组成可行方案集,并根据式(16)计算各指标的理想点和反理想点向量为:

$$\begin{cases}
 h_1(+)= [0.24, 0.24, \dots, 0.24]_{1 \times 16} \\
 h_1(-)= [0.32, 0.32, \dots, 0.32]_{1 \times 16} \\
 h_2(+)= [1.8, 1.8, \dots, 1.8]_{1 \times 16} \\
 h_2(-)= [3.7, 3.7, \dots, 3.7]_{1 \times 16} \\
 h_3(+)= [0.15, 0.15, \dots, 0.15]_{1 \times 16} \\
 h_3(-)= [0.23, 0.23, \dots, 0.23]_{1 \times 16}
 \end{cases} \quad (29)$$

再根据式(17)和(20)计算各方案加权理想点评价函数值,最后由式(21)得到加权理想点贴近度,并按照贴近度的大小确定可行方案集中各方案的等级,相关计算结果和评价结果如表 4 所示。

表 4 评价函数、贴近度和方案等级

Tab.4 Evaluation function, proximity and scheme grade

方案	开断支路	$L_i(+)$	$L_i(-)$	贴近度 T_i	满足所有约束条件	方案等级
1	5-6	0.5710	0.1054	0.1557	否	0
2	6-7	0.3776	0.1984	0.3445	否	0
3	7-8	0.2191	0.2966	0.5752	否	0
4	8-14	0.1527	0.3230	0.6791	否	0
5	14-15	0.1549	0.3138	0.6695	是	5
6	15-16	0.0763	0.3577	0.8241	是	3
7	16-17	0.0763	0.3716	0.8599	是	2
8	17-32	0.0439	0.3814	0.8943	是	1
9	32-31	0.0878	0.3503	0.7995	是	4
10	31-30	0.0763	0.3577	0.8241	是	3
11	30-29	0.0763	0.3577	0.8241	是	3
12	29-28	0.3776	0.1984	0.3445	否	0
13	28-27	0.4845	0.1319	0.2139	否	0
14	27-26	0.5961	0.0738	0.1101	否	0
15	26-25	0.5961	0.0738	0.1101	否	0
16	25-5	0.7396	0	0	否	0

注:“0”表示不能同时满足节点电压约束和支路电流约束,“1”代表最优方案,“2”代表次优方案,“3”代表 3 级方案,依此类推,后同。

3.4 算例分析

将表 4 结果与表 2 结果作对比,如表 5 所示。

表 5 计算结果和评价等级

Tab.5 Calculated results and evaluated level

方案	开断支路	$C_1 / (kV \cdot A)$	C_1 等级	C_2 / kV	C_2 等级	C_3	C_3 等级	贴近度 T_i	T_i 等级	满足约束条件
1	5-6	0.31	0	3.3	0	0.19	0	0.1557	0	否
2	6-7	0.28	0	2.8	0	0.18	0	0.3445	0	否
3	7-8	0.24	0	2.4	0	0.17	0	0.5752	0	否
4	8-14	0.24	0	2.2	0	0.17	0	0.6791	0	否
5	14-15	0.25	2	2.2	4	0.17	3	0.6695	5	是
6	15-16	0.24	1	2.0	3	0.16	2	0.8241	3	是
7	16-17	0.26	3	1.8	1	0.16	2	0.8599	2	是
8	17-32	0.25	2	1.9	2	0.15	1	0.8943	1	是
9	32-31	0.26	3	2.0	3	0.15	1	0.7995	4	是
10	31-30	0.24	1	2.0	3	0.16	2	0.8241	3	是
11	30-29	0.24	1	2.0	3	0.16	2	0.8241	3	是
12	29-28	0.28	4	2.8	6	0.18	0	0.3445	0	否
13	28-27	0.30	0	3.0	0	0.21	0	0.2139	0	否
14	27-26	0.31	0	3.3	0	0.22	0	0.1101	0	否
15	26-25	0.31	0	3.3	0	0.22	0	0.1101	0	否
16	25-5	0.32	0	3.7	0	0.23	0	0	0	否

由表 5 可知,采用本方法得到的最优方案(与最优评价函数贴近度的最大值对应)为方案 8,即开断支路 17-32。该方案中,负荷均衡指标达到单目标的最优解,网损和电压质量 2 项指标均达到各自单目标的次优解,即等级系数均为“2”,网损和电压质量 2 项指标与相应最优解偏差很小,其中网损相差 4.2%,电压质量相差 5.6%。

由表 5 还可以看出,方案 8 和方案 9 同时达到负荷均衡的最优解,此时若仅考虑负荷均衡指标,则无法区分这 2 种方案。为此,本方法通过多目标寻优,迅速确定方案 8 优于方案 9,且区分效果较为明显。

4 结论

本文提出一种基于加权理想点法的线路故障供电恢复策略。该方法首先以网损、电压质量、负荷均衡作为重构目标,确定综合评价函数,并利用粗糙集理论确定各子目标函数的权重系数,然后采用理想点法获取综合评价函数的最优解。仿真结果表明,该方法具有如下特点。

a. 利用粗糙集理论求取目标函数的权重系数,该系数可随网络结构变化而灵活改变,具有较好的适应性,同时避免了以经验确定权重系数而带来的主观不确定性和不可变性。

b. 采用加权理想点法对虚拟重构网络进行多目标优化,使开断方案达到多目标最优,有效解决了单目标优化过程中,多种方案同时达到最优而无法选择的问题,考虑问题全面,且判断过程快速可靠,易于工程实现。

参考文献:

[1] NAHMAN J, STRBAC G. A new algorithm for service restoration

- in large-scale urban distribution systems[J]. Electric Power Systems Research, 1994, 29(3): 181-192.
- [2] STANKOVIC A M, CALOVIC M S. Graph oriented algorithm for the steady-state security enhancement in distribution networks[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 539-544.
- [3] 邓群, 孙才新, 周涑, 等. 采用动态规划技术实现配电网恢复供电[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2006, 29(3): 40-44.
DENG Qun, SUN Caixin, ZHOU Quan, et al. Realization of distribution power recovering with dynamic programming[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2006, 29(3): 40-44.
- [4] PEREZ G R, HEYDT G T, JACK N J, et al. Optimal restoration of distribution systems using dynamic programming[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(2): 1589-1596.
- [5] MORELATO A L, MONTICELLI A. Heuristic search approach distribution system restoration[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(4): 2235-2241.
- [6] 刘强, 石立宝, 倪以信, 等. 电力系统恢复控制的网络重构智能优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 8-15.
LIU Qiang, SHI Libao, NI Yixin, et al. Intelligent optimization strategy of the power grid reconfiguration during power system restoration[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 8-15.
- [7] 吴文传, 张伯明. 基于待恢复树切割的配电网故障恢复实时算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 50-54.
WU Wenchuan, ZHANG Boming. A candidate restoring tree cutting based algorithm for real-time distribution system restoration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 50-54.
- [8] 朱峻, 薛禹胜. 配电网系统恢复专家系统[J]. 电力系统自动化, 1991, 15(3): 22-28.
ZHU Jun, XUE Yusheng. An expert system for restoration of distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1991, 15(3): 22-28.
- [9] MIU K N, CHANG H D, YUAN B, et al. Fast service restoration for large-scale distribution systems with priority customers and constraints[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(3): 789-795.
- [10] 卢志刚, 董玉香. 基于改进二进制粒子群算法的配电网故障恢复[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(24): 39-43.
LU Zhigang, DONG Yuxiang. Distribution system restoration based on improved binary particle swarm optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(24): 39-43.
- [11] STANKOVIC A M, CALOVIC M S. Graph oriented algorithm for the steady-state security enhancement in distribution networks[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 539-544.
- [12] 赵冬梅, 郑朝明, 高曙. 配电网的供电优化恢复策略[J]. 电网技术, 2003, 27(5): 67-71.
ZHAO Dongmei, ZHENG Zhaoming, GAO Shu. Optimal service restoration strategy of distribution network[J]. Power System Technology, 2003, 27(5): 67-71.
- [13] KUMAR Y, DAS B, SHARMA J. Mullion strain service restoration of electric power distribution system with priority customers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(1): 261-270.
- [14] 郑兰, 别朝红, 王秀丽. 一种快速启发式配电网故障恢复算法[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(2): 16-19.
ZHENG Lan, BIE Zhaohong, WANG Xiuli. A fast heuristic restoration method for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(2): 16-19.
- [15] 张钊, 封亚琴. 一种新型的配电网供电恢复重构寻优算法[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 51-55, 65.
ZHANG Zhao, FENG Yaqin. A novel optimization reconfiguration algorithm for power supply restoration of distribution network[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 51-55, 65.
- [16] 束洪春, 孙向飞, 于继来. 粗糙集理论在电力系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 90-95.
SHU Hongchun, SUN Xiangfei, YU Jilai. A survey on the application of rough set theory in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 90-95.
- [17] 刘思革, 程浩忠, 崔文佳. 基于粗糙集理论的多目标电网规划最优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(7): 65-69.
LIU Sige, CHENG Haozhong, CUI Wenjia. Optimal model of multi-objective electric power network planning based on rough set theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(7): 65-69.
- [18] 舒服华. 粗糙集在电能质量综合评价中应用[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(10): 75-79.
SHU Fuhua. Comprehensive power quality evaluation based on rough set[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(10): 75-79.
- [19] 牛东晓, 王建军, 李莉, 等. 基于粗糙集和决策树的自适应神经网络短期负荷预测方法[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(10): 30-34.
NIU Dongxiao, WANG Jianjun, LI Li, et al. Short-term load forecasting using adaptive ANN based on rough set and decision tree[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(10): 30-34.
- [20] 高爽, 冬雷, 高阳, 等. 基于粗糙集理论的中长期风速预测[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 32-37.
GAO Shuang, DONG Lei, GAO Yang, et al. Mid-long term wind speed prediction based on rough set theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 32-37.
- [21] 高鹏, 石立宝, 姚良忠, 等. 辨识电网薄弱节点的多准则综合电压稳定指标[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 26-31.
GAO Peng, SHI Libao, YAO Liangzhong, et al. A multi-criterion integrated voltage stability index for weak buses identification[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 26-31.

作者简介:



马静

马静(1981-),男,山西阳泉人,副教授,博士后,研究方向为电力系统保护与控制(E-mail:hdmajing@aliyun.com);

许冬(1985-),男,河北邢台人,硕士研究生,主要从事电力系统供电恢复等方面的研究;

王增平(1964-),男,河北辛集人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统自动化、继电保护、变电站综合自动化。

基于可信度的电缆配电网不良数据辨识与修正

刘健¹, 蔡明威², 张志华¹, 张小庆¹, 杜红卫³

(1. 陕西电力科学研究所, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054;

3. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210061)

摘要: 根据流过一条母线的各个开关的负荷间的平衡约束以及流过直接相连开关的负荷间的平衡约束, 提出可信度分析的3个原则, 建议数据质量评价步骤。在此基础上, 提出一种基于可信度的配电网不良数据辨识与修正方法, 根据节点数据的可信度差异对不良数据进行修正, 以配电网数据的整体可信度最大为目标。实例结果表明: 在仅有少量不良数据的情况下, 所提方法可以对不良数据进行修正, 达到提高数据可信度的目的。

关键词: 配电; 电缆; 可信度; 不良数据辨识与修正; 模型

中图分类号: TM 732

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.02.012

0 引言

近年来, 配电自动化的建设取得了突飞猛进的发展, 北京、厦门等地4个国家电网公司第一批配电自动化试点项目已经通过实用化验收, 南京、成都等地19个国家电网公司第二批配电自动化试点项目已经通过工程验收。

对于配电自动化系统, 由于配电终端(FTU、DTU等)工作在户外恶劣环境, 且通信通道难免受到短暂干扰, 还存在由于终端数量巨大而造成数据采集非同一时间断面等问题, 因此采集到的数据难免存在短暂大偏差(由于终端采样异常、复位或受到干扰)、持续大偏差(由于互感器原因或系数配置错误)、数据长期不刷新(由于通道中断、终端故障或蓄电池能量用尽)、数据矛盾(由于相关数据采样时间间隔过长且负荷变化较快)等现象。这些不良数据不仅妨碍了对配电网的正常运行监控, 而且对配电网故障处理、负荷转供和优化运行等造成严重的

影响。

状态估计技术是一种利用测量数据的相关度和冗余度, 采用计算机技术来对运行参数进行处理, 有效获得电力系统实时状态信息的计算方法^[1], 在这方面已经取得了许多研究成果: 比如基于支路电流的配电网状态估计^[2-4]、基于支路功率的配电状态估计^[5]、中压配电网分段状态估计法^[6]、基于等效电流量测变换的电力系统状态估计方法^[7]、基于模糊匹配潮流的配电网状态估计方法^[8]、基于广义岭估计的电力系统谐波状态估计^[9]。

现实中的配电自动化系统在进行状态估计时会遇到下列困难:

- a. 电流、有功功率、无功功率均为同一终端采集, 因此并不独立, 即若其一出现错误, 则其他两者必然也会出现错误, 所以不能利用三者的关系实现容错;
- b. 三相不平衡, 沿线电压降落小且电压量测精度不高, 有些节点甚至未进行电压量测;
- c. 馈线参数, 尤其是三相参数难以准确获得;
- d. 基于最小二乘法的状态估计, 往往受到个别

收稿日期: 2013-01-31; 修回日期: 2013-11-25

Power restoration strategy based on weighted ideal point method for distribution network

MA Jing, XU Dong, WANG Zengping

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: A strategy of power restoration from distribution network fault based on weighted ideal point method is proposed, which takes the power loss, voltage quality and load balance as the goal of reconfiguration to establish the comprehensive evaluation function, adopts the rough set theory to determine the weight coefficient of each sub-objective function, and then applies the ideal point method to obtain the optimal solution of the comprehensive evaluation function. The results of verification show that, with faster calculation speed, it avoids the uncertainty of weight setting depending on previous experience, more corresponding with the power restoration requirement of actual distribution network.

Key words: electric power distribution; line fault; power recovery; optimization; rough set; ideal point method