

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.07.001

复杂配电网可靠性评估的由果索因法

赵 渊¹, 赵勇帅², 王 洁¹, 范 飞¹

(1.重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044;
2.中国南方电网有限责任公司超高压输电公司曲靖局,云南 曲靖 655000)

摘 要:传统的配电网可靠性评估模型大多基于故障模式及后果分析法,采用由因寻果思路的枚举故障事件并分析对各负荷点影响的方法。文中采用由果索因的方式,搜寻导致负荷点不同停电时间的配网元件集合。根据负荷点不同的停运时间,计及断路器和熔断器拒动的影响,采用广度优先搜索技术,定义了负荷点的故障修复域、隔离恢复域和隔离切换域、影响因子及区域转换的概念,提出了分层划分算法。对 RBTS Bus6 的算例分析结果表明了复杂配网可靠性评估的分层分区算法的正确性,以及在评估中计入断路器和熔断器拒动的必要性。

关键词:配电网;拒动;区域分层;可靠性评估

中图分类号:TM732

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2014)07-001-10

Effect-cause analysis for reliability evaluation of complex distribution system

ZHAO Yuan¹, ZHAO Yongshuai², WANG Jie¹, FAN Fei¹

(1.State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing 400044, China; 2.China Southern Power Grid EHV Transmission Company Qujing Bureau, Qujing, Yunnan 655000, China)

Abstract: The traditional distribution system reliability assessment model is mostly based on the failure mode and effects analysis, which is proceeding from a known cause to a necessarily related effect, i. e. enumerating fault events and then analyzing their effects on load points. Through converse thinking, this paper adopts the idea which proceeds from results to the cause, i. e. searching the distribution components set which can cause load point interruption with different outage durations. According to the different outage durations of load points, a breadth-first-search technique is used in this paper which takes malfunction of the circuit breakers and fuses into account. The concepts of load point fault repair zone, isolation recover zone, isolation switching zone and its impact factor are defined and a hierarchical algorithm is also proposed. The test results on RBTS Bus6 verify the validity of the hierarchical algorithm in the reliability assessment of the complex distribution system.

Key words: distribution system; malfunction; area hierarchical; reliability assessment

收稿日期:2014-05-15

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA05A107);重庆市自然科学基金资助项目(CSTC, 2011BB6047);输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目(2007 DA10512711208);中央高校基本科研业务费科研专项的资助项目(CDJZR11150012)

作者简介:赵渊(1974-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事电力系统规划与可靠性研究,(E-mail) yuanzhao@msn.cn。

目前对配电网可靠性的研究主要集中在算法和指标方面^[1]。对配电网可靠性评估的解析模型和算法已有大量研究,文献[2-3]采用了故障模式及后果分析(failure mode and effects analysis, FMEA)思想,枚举预想故障元件并找出受影响的停运负荷点,利用元件可靠性数据建立故障模式后果表,进而得出负荷点和系统可靠性指标;文献[4]提出最小割集法,通过求取配电网的最小割集来计算网络可靠性指标;文献[5]的故障模式后果分析提出故障扩散法,给出了节点故障类型的概念;文献[6]的故障遍历算法,基于遍历技术确定负荷点故障类型;文献[7]的网络等值法将具有分支馈线的复杂配电网等效简化为简单辐射状配电网;文献[8-9]的分块算法提高了可靠性评估的效率;文献[10]提出基于向量法的复杂配电网可靠性评估方法;文献[11-12]将模糊技术引入中压配电网可靠性评估;文献[13-14]提出基于启发式搜索和模糊评价的配电网故障恢复。上述文献的共同思想是枚举预想故障元件,找出受故障影响的停运负荷点集合,显然这是一种由因寻果思路。

此外,文献[15-16]提出了最小路法,对待分析的负荷点将配电网划分为最小路元件和非最小路元件,并将非最小路上元件故障对负荷点的影响等效在最小路上。文中借鉴最小路法基本思想,即采用与传统配电网可靠性评估的 FMEA 法相反的思路,提出基于由果索因的复杂配电网可靠性评估模型和算法:基于由果索因的逆向思路,首先枚举负荷点,然后搜索影响负荷点可靠性的元件集合,根据元件集合中元件故障时对负荷点停运时间的不同影响,将元件集合定义为负荷点的故障修复域、隔离恢复域和隔离切换域,且计及断路器和熔断器拒动的影响提出了区域分层算法,即采用广度优先搜索分层划分出负荷点的故障修复域、隔离恢复域和隔离切换域。该算法的优点在于很容易搜索出影响负荷点可靠性的各区域元件集合,进而找出负荷点可靠性的薄弱环节及改善可靠性的有效措施。文中所提算法与最小路法有明显区别:最小路法需将非最小路上的元件对负荷点可靠性的影响等效至最小路上;而文中算法无需等效,采用广度优先搜索技术直接划分出影响负荷点可靠性的各个区域,算法简单明了,且易于计及断路器和熔断器拒动的影响。

1 断路器/熔断器的分级

配电网中通常配置了多个断路器/熔断器,当故障发生时,不同位置的断路器/熔断器拒动对负荷点的影响程度各异,需按影响程度大小对配电网中断路器和熔断器进行分级分类。

从配电网中某断路器/熔断器所在位置逆潮流方向搜索,搜索过程中的首遇断路器称为该断路器/熔断器的上级断路器,与此对应,该断路器/熔断器称为此上级断路器的下级断路器/熔断器。若下级断路器/熔断器在其保护区域内发生短路故障时拒动,则由上级断路器动作切除故障,如果该上级断路器也同时拒动,则由更上级的断路器担负故障切除任务。上级断路器和下级断路器/熔断器是相对概念。

以所枚举的负荷点为中心,将配电网中的断路器和熔断器分级,断路器和熔断器的分级也具有相对性,是相对于所枚举的负荷点而言。首先定位负荷点的一级断路器/熔断器,然后根据上下级断路器/熔断器的定义,二级断路器/熔断器是一级断路器/熔断器的相邻下级断路器/熔断器;依此类推,可将配电网中尚未分级的断路器/熔断器进一步分为三级以上的断路器/熔断器。

以图 1 为例,说明如何定位负荷点的一级断路器和一级熔断器:对所枚举的负荷点 P_i ,将负荷点 P_i 至主馈线始端出口断路器 b_1 之间的线路视为一个广义节点,以该广义节点为始点,顺潮流方向展开广度优先搜索,则在各个方向上搜索到的首遇断路器(b_2 、 b_3)和熔断器(f_1 、 f_2)称为一级断路器/熔断器。为避免可靠性评估算法过于复杂,假设主馈线出口断路器 b_1 完全可靠。

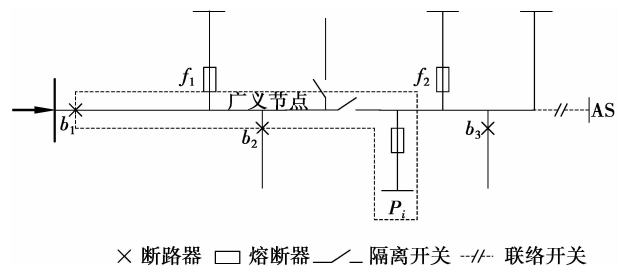


图 1 一级断路器和熔断器的定位

2 负荷点分层区域划分算法

2.1 负荷点区域及影响因子的定义

对待分析的负荷点,配电网中任一元件故障可能导致其停运,也可能对其无影响。对于导致待分析负荷点停运的元件故障,可根据元件故障引起该负荷点停运时间的不同,将所有影响负荷点停运的元件集合划分为故障修复域、隔离恢复域和隔离切换域。

故障修复域:配电网中某些区域的元件故障将导致待分析负荷点的停运时间为故障元件修复时间,则这些区域称为故障修复域,用 R 表示。

隔离恢复域:配电网中某些区域的元件故障将导致待分析负荷点停运时间为故障隔离时间,则这些区域称为隔离恢复域,用 I 表示。

隔离切换域:配电网中某些区域的元件故障将导致待分析的负荷点停运时间为故障隔离时间及与相邻馈线联络开关切换时间之和,则这些区域称为隔离切换域,用 S 表示。

在配电网中,只有上述3类区域的元件故障会影响待分析负荷点的可靠性,且各区域对负荷点可靠性的影响程度各异,同类区域间以及同一个区域内的元件间的关系可视为串联关系。为反映不同区域对负荷点可靠性影响程度的不同,区域影响因子为

$$\epsilon(T) = \frac{P(T, N)}{Z(R, I, S)}, \quad (1)$$

式中:函数 $P(T, N)$ 表示区域故障对待分析节点可靠性指标的贡献量, T 为区域类型, $T = \{R, I, S\}$, N 为相对应的区域内元件数;函数 $Z(R, I, S)$ 为待分析负荷点的可靠性指标。

2.2 负荷点的区域分层思想

计及断路器/熔断器拒动,负荷点的故障修复域、隔离恢复域和隔离切换域的范围会扩大,为了计入断路器或熔断器拒动影响,提出负荷点故障修复、隔离恢复和隔离切换域分层思想。首先在断路器和熔断器完全可靠假设下,按前述区域定义所得到的配电网区域划分,称为负荷点的第一层故障修复、隔离恢复和隔离切换域;假设断路器或熔断器在其保护区域范围内元件故障时拒动,必须由上级断路器动作切除故障,则在此情况下按前述故障区域定义所得到的配电网区域划分,称为负荷点的第二层故障修复、隔离恢复和隔离切换域。按此类推,可继续得到负荷点的三层及以上区域划分,但连续两级保护断路器和熔断器同时拒动的概率很小,因此算例分析只考虑至第二层区域划分。

2.3 负荷点分层区域划分算法

为清晰表述负荷点的区域概念及分层划分算法,在图2~图5中进行了图示化描述。

2.3.1 负荷点的第1层区域划分

当负荷点 P_i 所在馈线与相邻馈线间有联络开关时,首先判断相邻馈线联络开关与负荷点的位置关系。如果联络开关位于负荷点下游馈线或下游馈线的分支子馈线上,如图2和图3所示,此时负荷点 P_i 第1层区域划分的具体步骤如下。

1) 以负荷点 P_i 为起点,逆潮流方向搜索,根据能否搜索到隔离开关,分2种情况考虑。

情况1:不能搜索到隔离开关(见图2),则负荷点 P_i 逆潮流方向至主馈线始端出线断路器 b_1 之间的供电路径视为广义节点,以该广义节点为始点,顺潮流方向展开广度优先搜索,直到搜索到一级断路器/熔断器或隔离开关或到达线路末端时停止该方向搜索。以搜索到的开关 $\{b_2, g_1, g_2\}$ 、线路末端节点、负荷点 P_i 和出线断路器 b_1 为边界所围区域为负荷点 P_i 的第1层故障修复域 R_1 。转步骤2)。

情况2:若能搜索到隔离开关(见图3),则将首遇隔离开关 g_2 至主馈线始端出线断路器 b_1 之间的馈线视为一个广义节点,从该广义节点顺潮流方向展开广度优先搜索,直到搜索到一级断路器/熔断器或隔离开关或到达线路末端时停止该方向搜索。以搜索到的开关 $\{b_2, f_1, g_1, g_2\}$ 、线路末端节点和出线断路器 b_1 为边界所围区域为负荷点 P_i 的第1层隔离切换域 S_1 。转步骤3)。

2) 以步骤1)情况1中搜索到的隔离开关 (g_1, g_2) 为始点(见图2),顺潮流方向广度优先搜索,直到搜索到一级断路器/熔断器/或到达线路末端时停止该方向搜索。分别以 $\{g_1, f_2\}$ 和 $\{g_2, f_7, f_3, f_4, f_5, f_6, b_3\}$ 与线路末端节点为边界所围区域称为负荷点 P_i 的第1层隔离恢复域 I_1 , 且有 $I_1 = I_{1,1} \cup I_{1,2}$, 符号 $I_{1,1}$ 和

$I_{1,2}$ 表示第 1 层隔离恢复域中的第 j 个子隔离恢复域,下面的符号下标与此类同。

3)以步骤 1)情况 2 中负荷点 P_i 至隔离开关 g_2 之间的供电路径为广义节点(见图 3),从广义节点出发顺潮流方向广度优先搜索,直到搜索到一级断路器/熔断器或隔离开关或到达线路末端时停止该方向搜索。以搜索到的开关 $\{g_2, g_3\}$ 、线路末端节点和负荷点 P_i 为边界所围区域即为负荷点 P_i 的第 1 层故障修复域 R_1 。转步骤 4)。

4)以步骤 1)情况 2 中和步骤 3)中广度优先搜索到的隔离开关(g_1, g_3)为始点,顺潮流广度优先搜索,直到搜索到一级断路器/熔断器或到达线路末端时停止该方向搜索。则分别以 $\{g_1, f_2\}$ 、 $\{g_3, f_3, f_4, f_5, f_6, b_3\}$ 和线路末端节点为边界所围区域为负荷点 P_i 的第 1 层隔离恢复域 I_1 ,且有 $I_1 = I_{1,1} \cup I_{1,2}$ 。

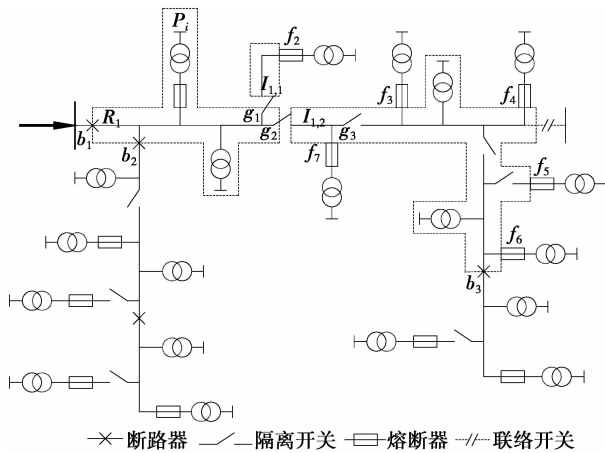


图 2 联络开关在负荷点 P_i 下游时
第 1 层区域划分(情况 1)

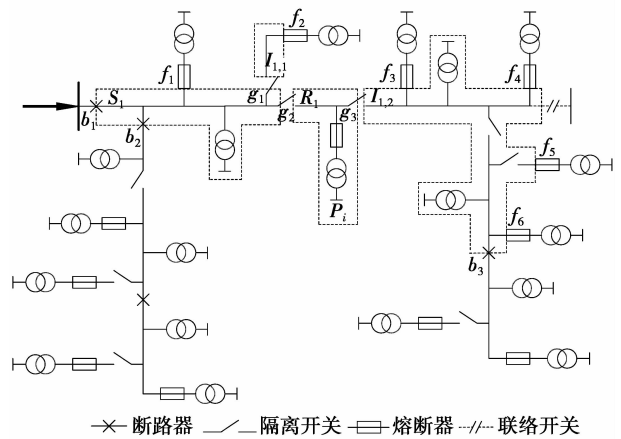


图 3 联络开关在负荷点 P_i 下游时
第 1 层区域划分(情况 2)

如果联络开关位于负荷点上游馈线或上游馈线的分支子馈线上(如图 4),则以联络开关所在分支子馈线与负荷点的上游馈线的连接点(分支点) c 为起点,逆潮流方向搜索首台隔离开关。负荷点 P_i 的第 1 层故障修复域 R_1 、隔离恢复域 $I_1 = I_{1,1} \cup I_{1,2}$ 和隔离切换域 S_1 的划分详见图 4 所示。

当负荷点 P_i 所在馈线无联络开关时(见图 5),则负荷点没有隔离切换域,只有故障修复域和隔离恢复域,负荷点 P_i 的第 1 层故障修复域 R_1 和隔离恢复域 $I_1 = I_{1,1} \cup I_{1,2}$ 的划分详见图 5 所示。

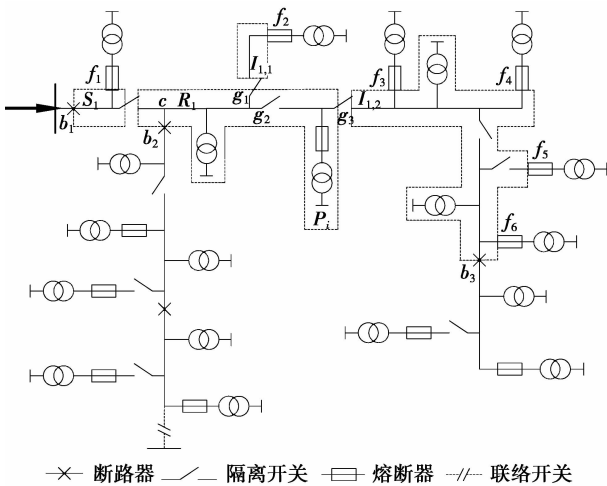


图 4 联络开关在负荷点 P_i 上游时
第 1 层区域划分

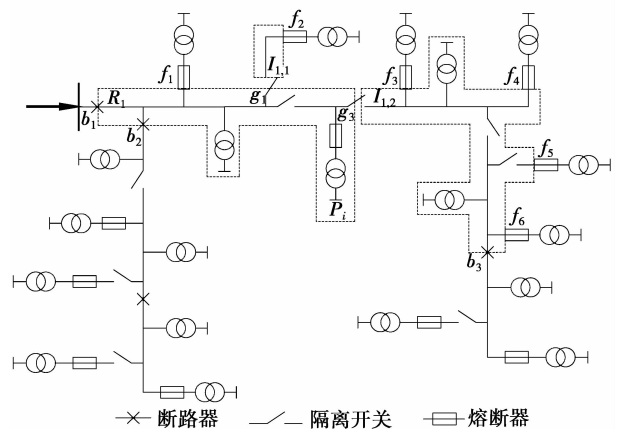
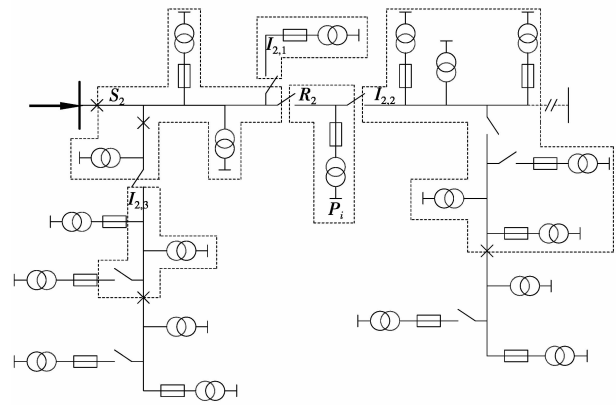


图 5 无联络开关时负荷点 P_i 的
第 1 层区域划分

2.3.2 负荷点的第2层区域划分

负荷点 P_i 的第2层故障修复域、隔离恢复域和隔离切换域的划分方法和步骤与第1层区域划分方法和步骤完全相同,唯一的差别是:第2层故障修复域和隔离切换域划分过程中顺潮流方向广度优先搜索至二级断路器/熔断器或隔离开关或到达线路末端节点,而第2层隔离恢复域划分过程中顺潮流方向广度优先搜索至二级断路器/熔断器或到达线路末端节点。以图6为例,划分出负荷点 P_i 的第2层故障修复域 R_2 、隔离恢复域 $I_2 = I_{2,1} \cup I_{2,2} \cup I_{2,3}$ 和隔离切换域 S_2 。

依此类推,可以继续划分出负荷点 P_i 更高层区域。另外,由上述可见,计及断路器和熔断器的拒动影响后,将导致故障修复域或隔离恢复域或隔离切换域的范围不断扩大。



—×— 断路器 ——— 隔离开关 —□— 熔断器 -·-·- 联络开关

图6 负荷点 P_i 的第2层区域划分

3 负荷点可靠性指标计算公式

根据上述配电网负荷点的分层区域划分算法,文中计及断路器和熔断器一阶拒动,即考虑负荷点的第2层区域划分,根据划分出的负荷点的故障修复域、隔离恢复域和隔离切换域,可以得到负荷点 P_i 的停运率 λ_i 、平均故障修复时间 r_i 和年平均停电时间 U_i 的计算公式分别为

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^{N_{R_2}} Q_j \lambda_j + \sum_{j=1}^{N_{I_2}} Q_j \lambda_j + \sum_{j=1}^{N_{S_2}} Q_j \lambda_j, \quad (2)$$

$$U_i = \sum_{j=1}^{N_{R_2}} Q_j \lambda_j r_j + \left(\sum_{j=1}^{N_{I_2}} Q_j \lambda_j \right) T_g + \left(\sum_{j=1}^{N_{S_2}} Q_j \lambda_j \right) (T_g + T_s), \quad (3)$$

$$r_i = U_i / \lambda_i, \quad (4)$$

式中: T_g 为故障隔离时间; T_s 为联络开关的切换时间; N_{R_2} 、 N_{I_2} 和 N_{S_2} 分别表示负荷点 P_i 的第2层故障修复域、隔离恢复域和隔离切换域内所包含的元件总数; λ_j 和 r_j 分别表示其中第 j 个元件的故障率和故障修复时间。 Q_j 为元件 j 故障后其保护熔断器或断路器的拒动概率,如果元件 j 属于第1层故障修复或隔离恢复或隔离切换域 ($j \in R_1$ 或 $j \in I_1$ 或 $j \in S_1$), 则 $Q_j = 1$; 如果元件属于第2层故障修复或隔离恢复或隔离切换域,但不属于第1层修复域或隔离域或隔离切换域 ($j \in R_2 - R_1$ 或者 $j \in I_2 - I_1$ 或者 $j \in S_2 - S_1$), 则 Q_j 为断路器/熔断器拒动概率。

4 算例分析

对 RBTS Bus6 进行可靠性评估,如图7^[17]所示。该配电网有33 kV主馈线1条(F_4),11 kV主馈线3条(F_1 、 F_2 、 F_3),其中主馈线 F_1 和 F_2 通过联络开关互为备用。线路参数和用户数据见文献[17],元件可靠性参数^[18]见表1所示。设联络开关切换时间0.2 h,隔离开关操作时间1 h,断路器/熔断器拒动概率为0.10(若对实际配电系统进行可靠性评估,则取拒动概率统计值)。

表1 元件可靠性参数

元件	λ	r
变压器	0.015 次·年 ⁻¹	200 h·次 ⁻¹
线路	0.065 次·年·km ⁻¹	5 h·次 ⁻¹

分6种方案展开分析:

方案1 不考虑断路器/熔断器拒动,按负荷点第1层区域划分进行配电网可靠性评估;

方案2 计及断路器/熔断器一阶拒动,按负荷点第2层区域划分进行配电网可靠性评估;

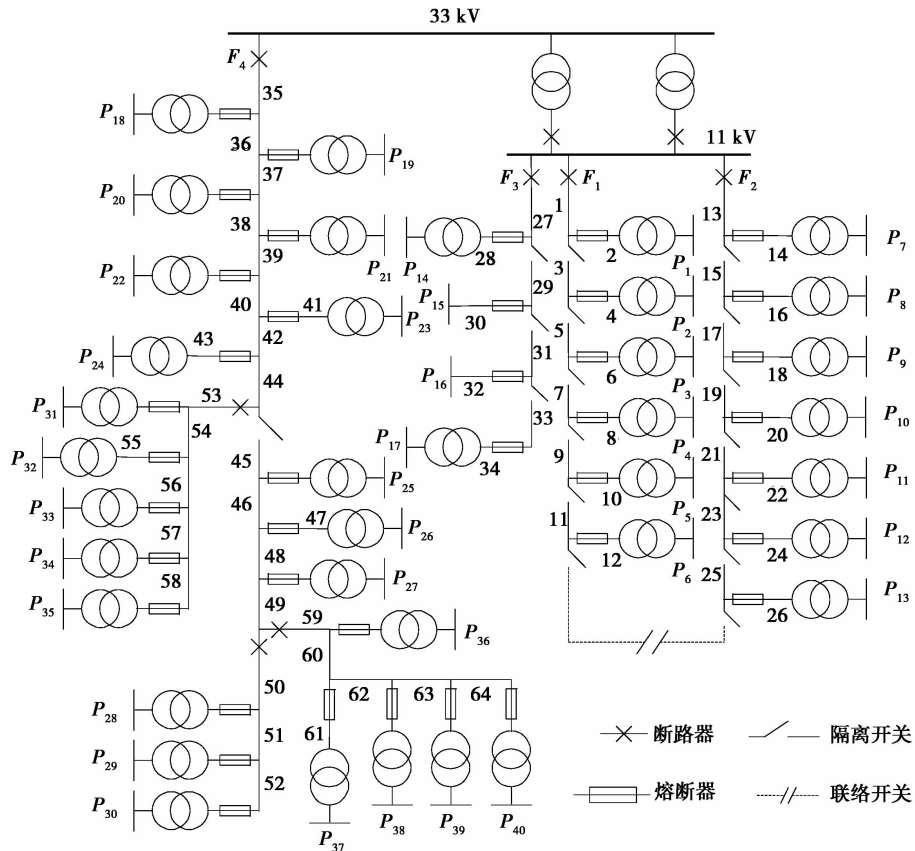


图 7 RBTS Bus6 配电系统

方案 3~方案 6 均计及断路器和熔断器一阶拒动,按第 2 层区域划分进行配电网可靠性评估;

- 方案 3 线路 44 首端安装 1 台隔离开关;
- 方案 4 线路 45 首端的隔离开关换成断路器;
- 方案 5 线路 44 首端安装 1 台断路器;
- 方案 6 将线路 45 和线路 50 上的隔离开关和断路器相互调换。

上述 6 个方案的负荷点可靠性指标如图 8~图 10 所示,部分典型负荷点的故障修复域、隔离恢复域和隔离切换域对负荷点可靠性的影响如表 2~表 7 所示, P_{23} 的区域影响因子如表 8 所示,系统可靠性指标如表 9 所示。

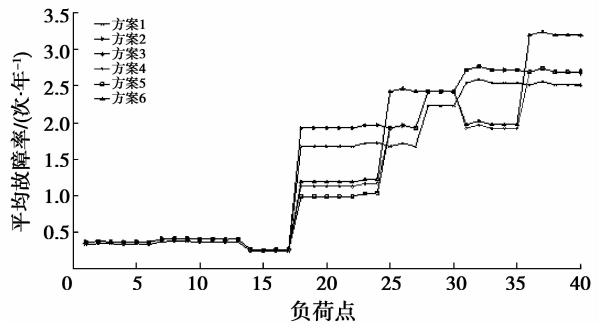


图 8 负荷点的停运率

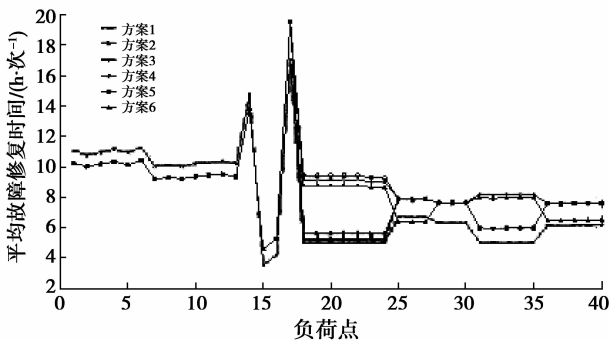


图 9 负荷点的平均故障修复时间

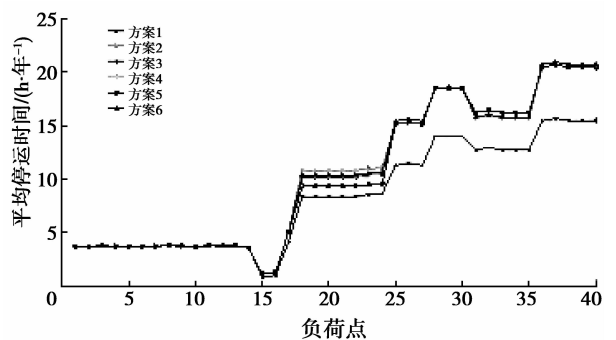


图 10 负荷点的年平均停运时间

表 2 方案 1 中各区域对负荷点可靠性的影响

P_i	λ_{R2}	U_{R2}	λ_{I2}	U_{I2}	λ_{S2}	U_{S2}
P_8	0.115 8	3.503 8	0.217 8	0.217 8	0.039 0	0.046 8
P_{16}	0.191 8	0.958 7	0.048 8	0.048 8	0	0
P_{23}	0.990 0	7.875 0	0.721 5	0.721 5	0	0
P_{26}	1.711 5	11.482 5	0	0	0	0
P_{32}	1.867 5	12.262 5	0.721 5	0.721 5	0	0
P_{40}	2.511 0	15.480 0	0	0	0	0

表 3 方案 2 中各区域对负荷点可靠性的影响

P_i	λ_{R2}	U_{R2}	λ_{I2}	U_{I2}	λ_{S2}	U_{S2}
P_8	0.115 8	3.503 8	0.248 0	0.248 0	0.045 4	0.054 4
P_{16}	0.202 0	1.302 6	0.054 2	0.054 2	0	0
P_{23}	1.090 3	10.131 6	0.869 0	0.869 0	0	0
P_{26}	1.959 3	15.354 1	0	0	0	0
P_{32}	1.892 8	15.606 4	0.869 0	0.869 0	0	0
P_{40}	2.691 3	20.476 3	0	0	0	0

表 4 方案 3 中各区域对负荷点可靠性的影响

P_i	λ_{R2}	U_{R2}	λ_{I2}	U_{I2}	λ_{S2}	U_{S2}
P_8	0.115 8	3.503 8	0.248 0	0.248 0	0.045 4	0.054 4
P_{16}	0.202 0	1.302 6	0.054 2	0.054 2	0	0
P_{23}	0.945 4	9.406 9	1.013 9	1.013 9	0	0
P_{26}	1.959 3	15.354 1	0	0	0	0
P_{32}	1.892 8	15.606 4	0.869 0	0.869 0	0	0
P_{40}	2.691 3	20.476 3	0	0	0	0

表 5 方案 4 中各区域对负荷点可靠性的影响

P_i	λ_{R2}	U_{R2}	λ_{I2}	U_{I2}	λ_{S2}	U_{S2}
P_8	0.115 8	3.503 8	0.248 0	0.248 0	0.045 4	0.054 4
P_{16}	0.202 0	1.302 6	0.054 2	0.054 2	0	0
P_{23}	1.162 5	10.492 4	0	0	0	0
P_{26}	1.959 3	15.354 1	0	0	0	0
P_{32}	1.964 9	15.967 1	0	0	0	0
P_{40}	2.691 3	20.476 3	0	0	0	0

表 6 方案 5 中各区域对负荷点可靠性的影响

P_i	λ_{R2}	U_{R2}	λ_{I2}	U_{I2}	λ_{S2}	U_{S2}
P_8	0.115 8	3.503 8	0.248 0	0.248 0	0.045 4	0.054 4
P_{16}	0.202 0	1.302 6	0.054 2	0.054 2	0	0
P_{23}	0.951 2	9.436 1	0.072 2	0.072 2	0	0
P_{26}	1.959 3	15.354 1	0	0	0	0
P_{32}	1.892 8	15.606 4	0.869 0	0.869 0	0	0
P_{40}	2.691 3	20.476 3	0	0	0	0

表 7 方案 6 中各区域对负荷点可靠性的影响

P_i	λ_{R2}	U_{R2}	λ_{I2}	U_{I2}	λ_{S2}	U_{S2}
P_8	0.115 8	3.503 8	0.248 0	0.248 0	0.045 4	0.054 4
P_{16}	0.202 0	1.302 6	0.054 2	0.054 2	0	0
P_{23}	1.162 5	10.492 4	0.055 3	0.055 3	0	0
P_{26}	1.904 1	15.077 9	0.557 0	0.557 0	0	0
P_{32}	1.964 9	15.967 1	0.055 3	0.055 3	0	0
P_{40}	2.636 0	20.200 0	0.557 0	0.557 0	0	0

表 8 负荷点 P_{23} 的区域影响因子

方案	$\epsilon_\lambda(R)$	$\epsilon_U(R)$	$\epsilon_\lambda(I)$	$\epsilon_U(I)$	$\epsilon_\lambda(S)$	$\epsilon_U(S)$
1	0.578 4	0.916 1	0.421 6	0.083 9	0	0
2	0.556 5	0.855 1	0.443 5	0.144 9	0	0
3	0.482 5	0.902 7	0.517 5	0.097 3	0	0
4	1.000 0	1.000 0	0	0	0	0
5	0.929 5	0.992 4	0.070 5	0.007 6	0	0
6	0.954 3	0.994 8	0.045 4	0.005 2	0	0

表 9 系统可靠性指标

方案	SAIFI	SAIDI	CAIDI	ASAI	EENS
文献[18]	1.006 7	6.668 8	6.624 7	0.999 239	72.641 5
1	1.006 7	6.684 6	6.640 3	0.999 237	72.709 9
2	1.117 4	8.069 3	7.221 4	0.999 079	91.749 4
3	1.117 4	7.959 8	7.123 4	0.999 091	90.857 2
4	0.924 0	7.945 9	8.599 1	0.999 093	90.448 8
5	0.940 6	7.787 4	8.279 1	0.999 111	89.453 1
6	0.991 1	7.989 4	8.061 4	0.999 088	91.065 4

注:系统平均停电频率 SAIFI、系统平均停电持续时间 SAIDI、用户平均停电持续时间 CAIDI 和系统可用率 ASAI 的单位分别为次/(用户·年)、小时/(用户·年)、h/(停电用户·年)和%

1)方案1和文献[18]的负荷点及系统可靠性指标基本完全一致(方案1中SAIDI、CAIDI和EENS略微大于文献[18],原因是馈线 F_1 与 F_2 间联络开关切换时间在方案1和文献[18]中分别为0.2h和0),这说明文中由果索因思路的正确性。

2)方案2下的负荷点和系统可靠性指标高于方案1,是因为方案2考虑了断路器/熔断器一阶拒动,而断路器/熔断器拒动会扩大负荷点的故障修复域、隔离恢复域和隔离切换域的范围。

3)从图8可见,方案3与方案2所有负荷点停运率没有变化,但从图9和图10可知方案3中 $P_{18} \sim P_{24}$ 的平均故障修复时间和年平均停运时间略有减小,系统可靠性指标有所改善。从表3、表4和表9可知:线路44首端安装1台隔离开关后,线路53~54、56~58由 $P_{18} \sim P_{24}$ 的第2层故障修复域转化为第2层隔离恢复域,线路44由属于 $P_{18} \sim P_{24}$ 的第1层故障修复域转化为第1层隔离恢复域,而故障修复时间一般比隔离时间长很多。

4)比较方案4和方案2,可见方案4中负荷点 $P_{18} \sim P_{24}$ 、 $P_{31} \sim P_{35}$ 的停运率指标有大幅降低,但平均故障修复时间却大幅增加,而年平均停运时间有所降低,方案4的负荷点和系统可靠性指标相比方案2有一定程度改善。从表3、表5可知:线路45首端隔离开关换成断路器后,线路45-46、48~49由属于 $P_{18} \sim P_{24}$ 和 $P_{31} \sim P_{35}$ 的第1层隔离恢复域转化为第2层故障修复域,对 $P_{25} \sim P_{27}$ 供电的降压变及线路47和线路50~52、59~60、62~64由属于 $P_{18} \sim P_{24}$ 和 $P_{31} \sim P_{35}$ 的第2层隔离恢复域转化为不影响负荷点可靠性的区域。

5)相比方案2,方案5中 $P_{18} \sim P_{24}$ 的停运率大幅降低,平均故障修复时间却大幅增加,年平均停电时间明显减少,系统可靠性指标有明显改善。从表3和表6可知:线路44首端安装1台断路器后,线路53~54、56~58由属于 $P_{18} \sim P_{24}$ 的第2层故障修复域转化为对 $P_{18} \sim P_{24}$ 无影响的区域,线路44由属于 $P_{18} \sim P_{24}$ 的第1层故障修复域转化为第2层故障修复域,线路45~46、48~49由属于 $P_{18} \sim P_{24}$ 的第1层隔离恢复域转化为第2层隔离恢复域,对 $P_{25} \sim P_{27}$ 供电的降压变及线路47、50~52、59~60、62~64由属于 $P_{18} \sim P_{24}$ 的第2层隔离恢复域转化为不影响负荷点可靠性的区域。

6)相比于方案2,方案6中 $P_{18} \sim P_{24}$ 和 $P_{31} \sim P_{35}$ 的可靠性有一定程度改善, $P_{25} \sim P_{27}$ 和 $P_{36} \sim P_{40}$ 的可靠性略微变差,但总体上系统可靠性指标有较好改善。从表3、表7可知:线路45~46、48~49由属于 $P_{18} \sim P_{24}$ 和 $P_{31} \sim P_{35}$ 的第1层隔离恢复域转化为第2层故障修复域,对 $P_{25} \sim P_{27}$ 供电的降压变及线路47、线路59~60、62~64由属于 $P_{18} \sim P_{24}$ 和 $P_{31} \sim P_{35}$ 的第2层隔离恢复域转化为不影响负荷点可靠性的区域;线路50~52由属于 $P_{25} \sim P_{27}$ 和 $P_{36} \sim P_{40}$ 的第2层故障修复域转化为第1层隔离恢复域,对 $P_{28} \sim P_{30}$ 供电的降压变由不影响 $P_{25} \sim P_{27}$ 和 $P_{36} \sim P_{40}$ 的可靠性区域转化为第2层隔离恢复域。

7)通过对以上方案的可靠性评估结果分析表明,负荷点的一级故障修复域对其可靠性的影响最大,其次是一级隔离恢复域。通过增装断路器或改变断路器安装地点,可缩小负荷点的一级故障修复域;将隔离开关更换为断路器,可将一级隔离恢复域变为二级故障修复域;改变隔离开关安装地点,可缩小负荷点的一级隔离恢复域。因此,通过增装断路器、改变开关类型或安装地点,使得负荷点的各层故障修复域、隔离恢复域和隔离切换域相互装换,即改变负荷点的故障修复域、隔离恢复域或隔离切换域的范围,从而使其可靠性得到一定程度改善,同时,系统可靠性指标也能得到改善。

5 结 论

以负荷点为中心,计及断路器/熔断器拒动影响,分层划分出负荷点的故障修复、隔离恢复和隔离切换域,以此为基础得到配电网可靠性评估模型。通过与已有文献结果对比,验证了模型和算法的正确性。算例分析表明:该算法可直接找出配电网中对负荷点可靠性有影响的区域并能量化各区域影响程度,因此易于辨识影响负荷点可靠性的薄弱区域并指导规划人员采取有效可靠性提升措施。

参考文献:

- [1] Billinton R, Wang P. Reliability network equivalent approach to distribution system reliability evaluation[J]. Generation, Transmission and Distribution, 1998, 145(2): 149-153.
- [2] Billinton R, Allan R N. Reliability evaluation of power systems[M]. New York: Plenum Press, 1996.
- [3] Henley E J, Kumamoto H. Reliability engineering and risk assessment[M]. Englewood Cliffs (NJ): Prentice-Hall, 1981.

- [4] 杨文宇,余健明,同向前.基于最小割集的配电系统可靠性评估算法[J].西安理工大学学报,2001,17(4):387-391.
YANG Wenyu, YU Jianming, TONG Xiangqian. Reliability assessment algorithm of power distribution system based on minimal cut sets[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2001, 17(4): 387-391.
- [5] 谢开贵,周平,周家启,等.基于故障扩散的复杂中压配电系统可靠性评估算法[J].电力系统自动化,2001,25(4):45-48.
XIE Kaigui, ZHOU Ping, ZHOU Jiaqi, et al. Reliability evaluation algorithm for complex medium voltage radial distribution networks based on fault-spreading-method[J]. Automation of Electric Power System, 2001, 25(4): 45-48.
- [6] 李志民,李卫星,刘迎春.辐射状配电系统可靠性评估的故障遍历算法[J].电力系统自动化,2002,26(2):53-56.
LI Zhimin, LI Weixing, LIU Yingchun. Fault-traverse algorithm of radial-distribution-system-reliability evaluation [J]. Automation of Electric Power System, 2002, 26(2): 53-56.
- [7] Billinton R, Wang P. Reliability-network-equivalent approach to distribution-system-reliability evaluation [J]. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1998, 145(2): 149-153.
- [8] 曹侃,谢开贵,胡博,等.应用邻接多重表存储结构的配电网可靠性评估算法[J].重庆大学学报,2011,34(12):67-71.
CAO Kan, XIE Kaigui, HU Bo, et al. Reliability evaluation algorithm for complex electrical distribution networks using the storage structure of adjacency multilist[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(12): 67-71.
- [9] Xie K, Zhou J, Billinton R. Fast algorithm for the reliability evaluation of large-scale electrical distribution networks using the section technique[J]. Generation, Transmission & Distribution, 2008, 2(5): 701-707.
- [10] 高炜欣,罗先觉,支岗印.复杂配电网可靠性评估的向量法[J].电力系统自动化,2003,27(22):36-40.
GAO Weixin, LUO Xianjue, ZHI Gangyin. A vector algorithm for reliability evaluation of distribution systems with complex feeders[J]. Automation of Electric Power System, 2003, 27(22): 36-40.
- [11] 王峻峰,周家启,谢开贵.中压配电网可靠性的模糊评估[J].重庆大学学报:自然科学版,2006,29(2):45-49.
WANG Junfeng, ZHOU Jiaqi, XIE Kaigui. Fuzzy reliability evaluation algorithm for medium voltage distribution networks[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2006, 29(2): 45-49.
- [12] Lang B P, Pahwa A. Power distribution system reliability planning using a fuzzy knowledge-based approach[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 279-284.
- [13] 周永树,周凇,刘育民,等.基于启发式搜索和模糊评价算法的配电网故障恢复[J].重庆大学学报,2010,33(5):78-82.
ZHOU Yongshu, ZHOU Qun, LIU Yumin, et al. Heuristic research and fuzzy evaluation for post-fault restoration in distribution networks[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(5): 78-82.
- [14] Hsu Y Y, Huang M M, Kuo H C, et al. Distribution system service restoration using a heuristic search approach[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(2): 734-740.
- [15] 戴雯霞,吴捷.基于最小路的配电网可靠性快速评估法[J].电力自动化设备,2002,22(7):29-31.
DAI Wenxia, WU Jie. Fast evaluation for distribution network reliability based on minimal path [J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(7): 29-31.
- [16] Xie K G, Zhou J Q, Billinton R. Reliability evaluation algorithm for complex medium voltage electrical distribution networks based on the shortest path[J]. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(6): 686-690.
- [17] Roy B, Satish J. A test system for teaching overall power system reliability assessment[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 1996, 11(4): 1670-1676.
- [18] Allan R N, Billinton R, Sjarief I, et al. A reliability test system for educational purpose basic distribution system data and results[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 1991, 2(6): 813-820.