

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.05.001

含重合器式馈线自动化的配电网可靠性评估

赵 渊¹, 吴 林², 刘庆尧¹, 刘子亚³, 梁 燕³, 陈 果³

(1. 重庆大学 电气工程学院, 重庆 400044; 2. 国网绵阳供电公司, 四川 绵阳 621000;

3. 重庆机场集团有限公司 动力能源保障部, 重庆 401120)

摘要:重合器式馈线自动化能有效提高配电网供电可靠性,对量化分析配电网可靠性的影响具有理论与实际意义。基于配电网分区思想重新划分配电网负荷区域类型,结合重合器式馈线自动化系统的概率模型及运行逻辑,根据供电恢复过程中各个阶段分段器的不同失效情况及其影响后果分析,推导不同类型负荷点的自动恢复供电概率与期望恢复供电时间,最终实现含重合器式馈线自动化的配电网可靠性指标量化评估。通过对算例的详细评估分析,验证了笔者所提模型的正确性和有效性。

关键词:重合器式馈线自动化;可靠性评估;配电网

中图分类号:TM 921

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2018)05-001-14

Reliability evaluation of distribution system with recloser feeder automation

ZHAO Yuan¹, WU Lin², LIU Qingyao¹, LIU Ziya³, LIANG Yan³, CHEN Guo³

(1. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R. China;

2. Mianyan Power Supply Company, Mianyang 621000, P.R. China;

3. Power and Energy Department of Chongqing Airport Group Co., Ltd, Chongqing 401120, P.R. China)

Abstract: Feeder automation (FA) based on recloser could improve the reliability of distribution network effectively. Therefore, it's important to quantitatively analyze the impact of reclosing FA on the reliability of distribution system. Firstly, all load zone types are re-divided based on distribution network partition in this paper. Then according to the probability model and the control logic of reclosing FA, the probability and the time for automatic load restoration are derived based on detailed analysis of various outage modes and failure effect of sectionalizer in each stage of power service restoration. Finally, the formulas of reliability indices of distribution network with recloser feeder automation are achieved. The correctness and effectiveness of the proposed model are verified by examples.

Keywords: feeder automation of recloser mode; reliability evaluation; distribution network

馈线自动化可自动隔离故障区和自动恢复非故障区,有效提高了配电网供电可靠性^[1]。馈线自动化主要类型有 FTU(feeder terminal unit) 式与重合器式,其中重合器式无需通信网,投资小,见效快,在实际应用中占有重要地位^[2],因此从重合器式馈线自动化系统的运行特性角度^[3],建立可靠性概率模型,对含重合式

收稿日期:2017-12-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50977094);民航局科技创新引导资助项目(MHRD20140302)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (50977094) and Technology Innovation Foundation of the Civil Aviation Administration of China (MHRD20140302).

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

馈线自动化系统的配电网进行可靠性评估具有重要意义。

目前,已有相关文献对含 FTU 式馈线自动化的配电网可靠性评估进行了初步研究。文献[4]根据电源的位置和负荷点上下游的馈线自动化终端 FTU 分类评估了负荷点的可靠性;文献[5]以切负荷量最小为目标,计及 FTU 式馈线自动化实现配电网故障后的网络重构,计算配网可靠性指标;文献[6]考虑 FTU 式馈线自动化概率失效特性和运行逻辑,实现了含集中式馈线自动化的配电网可靠性评估。

计及重合器式馈线自动化的配网可靠性评估现有研究较少。文献[7-9]对重合器/分段器优化配置问题进行了研究,但仅简单地将故障隔离时间由手动隔离时间改为自动隔离时间,并完全沿用传统配电网可靠性评估算法。文献[10-11]指出不同模式馈线自动化对可靠性具有不同的影响,但没有给出计及重合器式馈线自动化特性的可靠性评估模型。文献[12]对含 FTU 式和重合器式馈线自动化的可靠性评估算法都进行了研究,但该算法适用于只含重合器而无分段器的情形,且该文只对简单的环形配电网进行了分析。

计及重合器式馈线自动化的配电网可靠性评估尚有较多研究空白,文中从重合器式馈线自动化运行机理和失效模式角度,探讨重合器式馈线自动化对配电网可靠性的影响:

1) 由于重合器式馈线自动化系统中元件位置及故障方式的不同导致其有多种失效模式,文中首先建立分段器的可靠性模型,再根据馈线自动化的运行机理推导出各类负荷点自动恢复供电时间及概率表达式。

2) 通过分析负荷点相对于自动隔离区和手动隔离区的拓扑关系,文中重新划分负荷类型,并依据供电恢复策略、分段器动作逻辑及失效后果影响,推导出各类负荷点恢复供电时间,再结合自动恢复供电概率得出负荷点可靠性指标计算公式。

1 重合器式馈线自动化的供电恢复逻辑

重合器式馈线自动化主要分为:电压时间型^[13]、电压电流型^[14-16]和过流脉计数型。文中阐述了电压时间型馈线自动化对配电网可靠性的影响,在附录 A 中分析含电压电流型或过流计数型的配电网可靠性。具体分析如下:

设配电网含元件 R 个(编号 $r=1,2,\dots,R$);负荷点 J 个(编号 $j=1,2,\dots,J$);分段器 K 个(编号 $k=1,2,\dots,K$),其中分段器 k 加压延时合闸时间整定为 X_k (分段器 k 一端加上电压后,延时 X_k 后控制开关合闸),合闸后监测时间整定为 Y_k (分段器 k 加压合闸后,若在规定时间内 Y_k 内监测到再次失压,则闭锁在分闸状态);含自动切换的联络点 H 个(编号 $h=1,2,\dots,H$),联络分段器 h 延时合闸整定为 D_h (一端失去电压 D_h 时间后联络开关合闸),合闸后的失压分闸闭锁时间为 F_h ;重合器重合间隔时间为 t_b 。

根据电压-时间型馈线自动化系统运行机制,将恢复供电过程分为以下 5 个阶段,并以图 1 为例加以阐明。

1) 故障自动隔离阶段:①元件(31)故障,重合器(S1)跳闸,元件(30, 31, 32, ..., 36)因分段器(S14, S18)失压分闸而从系统中被自动隔离。

2) 故障重合阶段:②重合器(S1)延时 t_b 后合闸,分段器(S2, S3, S7, S9, S10, S13, S14)经过整定延时后依次加压合闸,由于分段器(S14)合闸到故障区段,重合器将再次跳闸,并因此产生故障残压。

3) 分闸闭锁阶段:③分段器(S14)在监测时间 Y_{14} 内再次失压,因此闭锁在分闸状态;同时故障元件的下游(逆潮流为上游,反之为下游)分段器(S18)因检测到(S14)合闸到故障区段产生的故障残压,也闭锁在分闸状态。

4) 自动恢复供电阶段:④重合器(S1)延时 t_b 后再次合闸,分段器(S2, S3, S7, S9, S10, S13)依次加压合闸,逐段恢复分段器(S14)上游区域供电;⑤联络点 2 的联络分段器(S25)延时 D_2 后合闸,分段器(S24, S23, S20, S19, S27)依次加压合闸,逐段恢复分段器(S18)下游区域供电。

5) 人工操作阶段:⑥运行人员检查到故障元件(31)后,手动拉开隔离开关(S15)隔离故障,使故障隔离区域(30, 31, 32)最小,并手动合上分段器开关(S18),恢复区域(33, 34, 35, 36)供电,最后通过修复故障元件恢复区域(30, 31, 32)供电。

上述各阶段构成了理想的连续恢复供电过程,但每个分段器在每一阶段其实都存在失效可能,并对整个恢复供电过程产生影响,例如故障自动隔离阶段,若分段器(S14)失压分闸失败,则隔离区域扩大为(28,

29, …, 36);故障重合阶段,若分段器(S2, S3, S7, S9, S10, S13)中任意一个加压合闸失败或分闸闭锁阶段分段器(S18)闭锁失效,都导致自动恢复供电阶段中联络分段器(S25)合闸后,分段器(S18)加压合闸到故障区段,引起联络点电源所在馈线重合器跳闸,该馈线经故障重合阶段恢复供电,而联络分段器(S25)在监测时限 F_h 内再次失压,将闭锁在分闸状态,使得分段器(S25)和(S18)之间的区域自动恢复供电失败。

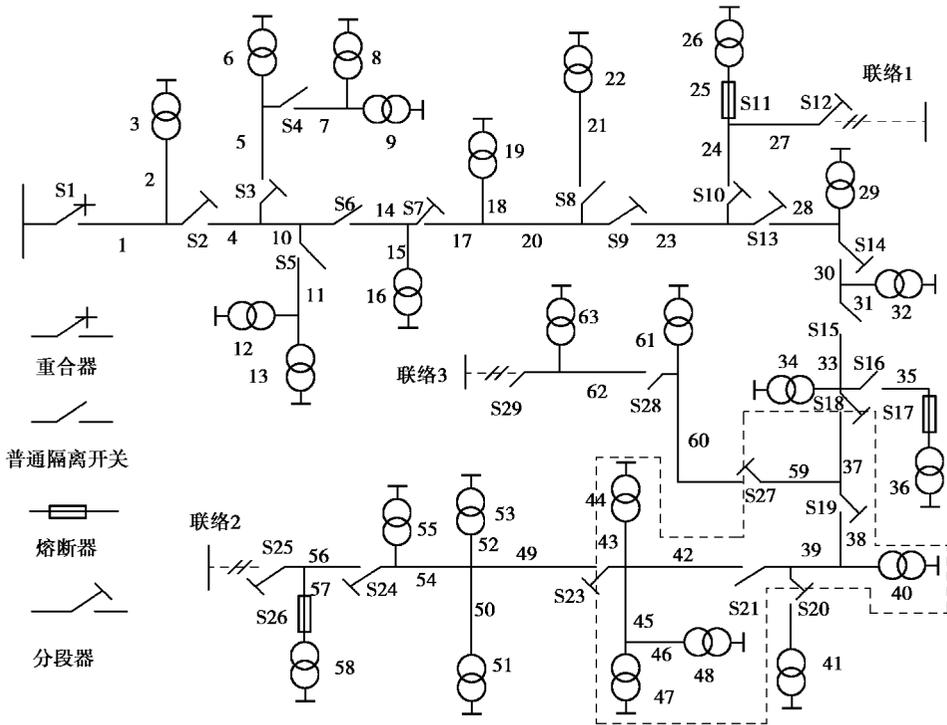


图 1 含重合器式馈线自动化系统的配电网

Fig. 1 Distribution network with feeder automation of recloser mode

2 特征区域定义及分段器失效模式分析

恢复供电过程中出现的特征区域如下:

手动隔离区:以开关(至少有一个开关需手动操作隔离故障)为界手动隔离故障元件的最小区域。

基本自动隔离区:以重合器或分段器为界自动隔离故障元件的最小区域。

扩展自动隔离区:若基本自动隔离区某边界分段器失压分闸失败,则该失效分段器相邻的上游或下游分段器成为隔离故障区的边界分段器,从而形成扩展自动隔离区。

基本自动隔离区和扩展自动隔离区统称为自动隔离区。在自动隔离区中,离电源点最近的边界开关称为上游边界开关,其余边界开关为下游边界开关,若上(下)游边界开关为分段器,则该分段器为上(下)游边界分段器。

如图 1 中元件(31)故障,基本自动隔离区为(30, 31, …, 36),上游和下游边界分段器分别为(S14), (S18)。若(S18)拒分闸,则形成扩展自动隔离区(30, 31, …, 37, 59)。运行人员手动操作开关(S15)隔离故障元件,形成手动隔离区(30, 31, 32)。

分段器具备失压分闸、加压合闸(仅一端加压)、残压检测和闭锁开关 4 种功能,下面从分段器运行逻辑出发对其控制系统失效模式进行分析,并对相同的失效状态进行合并以简化状态空间。

依据第 1 节,各个分段器按照图 2 所示运行逻辑执行其预期功能。流程 1 为隔离区上游边界断路器运行逻辑,由于闭锁开关的条件为监测时间内再次失压分闸,因此流程 1 虚线框中任意一个步骤失效,都导致闭锁开关失败。流程 2 为隔离区下游边界分段器运行逻辑,由于闭锁开关的条件为存在残压,流程 2 虚线框中任意一个步骤失败都将导致闭锁失败。流程 3 为其余分段器运行逻辑。

上述流程中,分段器共表现出 4 种不同的失效模式,分别为:“拒分闸”“拒合闸”“残压检测闭锁失效”及“时限内失压闭锁失效”,表 1 给出了不同位置分段器失效的影响。“拒分闸”表示故障后分段器仍处于合闸状态,不能进行低压分闸,概率为 P_{rb} ;“拒合闸”表示故障后分段器分闸,重合器延时合闸,而分段器不能加压合闸,概率为 P_{rc} ;“残压检测闭锁失效”表示下游边界分段器不能检测到上游边界分段器合闸时产生的残压并闭锁于分闸状态,概率为 P_{locke} ;“时限内失压闭锁失效”表示分段器不能在监测时间 Y_k 内失压后闭锁分段器于分闸状态,概率为 P_{lockl} ;上述概率值可通过对分段器历史运行或维修记录数据归纳统计得到。

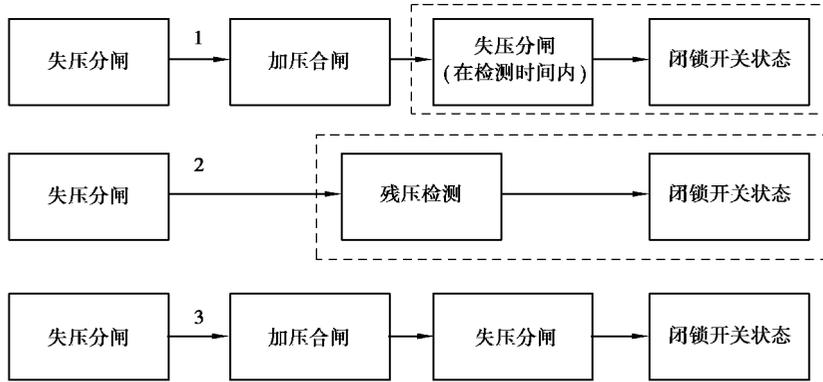


图 2 分段器运行逻辑

Fig. 2 Operational logic of sectionalizer

表 1 分段器失效的影响

Table 1 The failure effect of sectionalizer

失效模式	上游边界分段器	下游边界分段器	其他分段器
拒分闸	自动隔离区范围扩大	自动隔离区范围扩大	无影响
拒合闸	无残压脉冲产生	—	该分段器下游无法自动复电
残压检测闭锁失效	—	该分段器下游无法自动复电	—
时限内失压闭锁失效	b 类区域无法自动复电	—	—

注: b 类区域的定义见 3.1 节

3 分段器故障后果分析及负荷点可靠性评估

第 3 节先划分负荷类型,再结合恢复供电策略以及分段器的运行逻辑和可靠性模型,推导各类负荷点的恢复供电时间(停电时间)。

3.1 负荷区域分类

文献[17]采用分区思想对负荷点进行分类评估,但该文献的负荷分类方法未能涵盖所有负荷情形。文中在此基础上根据元件与自动隔离区的相对位置关系,将含重合器式馈线自动化系统的配电网分为 4 类负荷区域。① a 类区域位于跳闸重合器或者熔断器上游;② b 类区域位于跳闸重合器或熔断器到自动隔离区之间;③ c 类区域位于自动隔离区下游。由于 c 类区域恢复供电情形较复杂,因此依据 c 类区域元件与手动隔离区的拓扑关系进一步将其细分为 7 个子类区域,分类条件如表 2。条件中“有间接联络”指:该子类区域通过自动隔离区中手动隔离区之外的部分与联络点电源间接连通,当手动隔离故障元件后,该类区域可由联络点电源恢复供电;“有直接联络”指该区域与联络点电源直接连通。④ d 类区域为自动隔离区本身,依据与手动隔离区相对位置关系,细分为 4 个子类区域,如表 3 所示。

表 2 c 类子区域划分表
Table 2 The subregion of region c

联络点类型	切换类型	位于手动隔离区上游	位于手动隔离区下游
有直接联络	自动切换	c1	c2
	手动切换	c3	c4
无直接联络	有间接联络	c5	c6
	无间接联络	c5	c7

表 3 d 类子区域划分表
Table 3 The subregion of region d

联络点类型	位于手动隔离区下游	位于手动隔离区上游	手动隔离区本身
有间接联络	d1	d3	d4
无间接联络	d2	d3	d4

如元件(42)故障,若分段器(S19)拒分闸,形成图 1 虚线框所围自动隔离区,b 类区域为元件(1,2,⋯,36),c2 类区域为元件(49,50,⋯,58);c3 类区域为元件(60,61,62,63);c5 类区域为元件(41)。d3 类区域为元件(37,38,39,40,59);d4 类区域为元件(42,43,⋯,48)。

3.2 负荷点恢复供电时间

负荷点恢复供电时间取决于两个重要因素:一是负荷点所处负荷区域类型;二是故障后供电恢复策略。一般的供电恢复策略^[3-5]是:①馈线自动化系统逐段自动恢复 b、c1 与 c2 类区域供电;②运行人员现场查找具体故障元件,若自动隔离区是包含故障元件的最小隔离区域,则无需手动操作隔离故障,否则需手动将隔离开关断开隔离故障元件,并形成手动隔离区。再由原电源点恢复 c3、c5 及 d1 区域供电,耗时为 t_1 (手动隔离时间);③手动切换联络恢复 c4、c6 及 d1 区域供电,耗时为 t_2 (手动切换时间);④修复故障元件后,恢复 c7 与 d2、d4 区域供电,耗时为 t_3 (故障修复时间)。

综合考虑馈线自动化系统运行逻辑、供电恢复策略以及分段器失效模式(表 1),推导各类负荷点的恢复供电时间。考虑到分段器失效概率很小,文中不计分段器高阶故障,即假设自动恢复供电过程中每一个阶段最多出现一个分段器故障。设配电网元件 r 发生故障,负荷点 j 的恢复供电时间具体分析如下:

1)故障自动隔离阶段:若基本自动隔离区某边界分段器“拒分闸”,则形成扩展自动隔离区。扩展自动隔离区随基本自动隔离区不同边界分段器的“拒分闸”而具有多种形态,当最多考虑一个分段器“拒分闸”时,可能出现的形态数为, $N_{U_r} = 1 + C_z^1 (r=1, 2, \dots, R)$, 为形态 g 时,其出现概率为

$$P_g = \begin{cases} (1 - P_{rb})^z, & g = 1, \\ P_{rb} (1 - P_{rb})^{z-1}, & g = 2, 3, \dots, N_{U_r}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: z 为基本自动隔离区的边界分段器数量; $g=1$ 为基本自动隔离区, $g=2, 3, \dots, N_{U_r}$ 为扩展自动隔离区。依据负荷点 j 所在区域类型和供电恢复策略可得出如下结果:

①若负荷点 j 位于 a 类区域,由于 a 类区域处于跳闸重合器或者熔断器上游,其区域内负荷点不受故障影响, $T_{aj} = 0$ 。

②若负荷点 j 位于 c3、c5 及 d3 区域,则在手动隔离故障后恢复供电,负荷点 j 恢复供电时间为 $T_{c3j} = T_{c5j} = T_{d3j} = t_1$;

③若负荷点 j 位于 c4、c6 及 d1 类区域,手动隔离故障后,再手动切换联络恢复供电,恢复供电时间为

$$T_{c4j} = T_{c6j} = T_{d1j} = t_1 + t_2;$$

④若负荷点 j 位于 c7 与 d2、d4 类区域,手动隔离并修复故障后恢复供电。与其他文献一致^[4],在故障修复时间 t_3 中包含手动隔离与切换联络时间,故负荷点 j 恢复供电时间为: $T_{c7j} = T_{d2j} = T_{d4j} = t_3$;

⑤若负荷点 j 位于 b 与 c1、c2 类区域。虽存在自动恢复供电条件,但分段器在故障重合阶段或自动恢复供电阶段可能“拒合闸”,也可能在分闸闭锁阶段闭锁失效,导致负荷点 j 自动恢复供电失败,所以负荷点 j 的恢复供电时间需要结合自动恢复供电的后续流程做深入分析。

2)故障重合阶段:由于成功合闸到故障区段的条件是:自动隔离区 g 到重合器的供电路径上所有分段器不出现“拒合闸”。概率

$$P_{loc} = (1 - P_{rc})^{Mn_g}. \quad (2)$$

MP_g 表示自动隔离区 g 到重合器供电路径上的分段器集合,集合基数 $\text{Card}(MP_g) = Mn_g$ 。

若没有重合到自动隔离区,则会导致自动恢复供电过程中断,概率为 $P_{locf} = 1 - P_{loc}$,此时负荷点 j 的恢复供电时间分析如下:

①若负荷点 j 位于 b 类区域,分两种情况。情况(1)负荷点 j 位于“拒合闸”分段器上游,负荷点 j 可自动恢复供电,由式(3)计算其停电时间 $T_{aub,j1}$;情况(2)负荷点 j 位于“拒合闸”分段器下游,则负荷点 j 需要手动隔离故障后由原电源点恢复供电,耗时为 t_1 。设置标志 $I_{bj,1} = 1$,表示负荷点 j 符合情况(1),否则 $I_{bj,1} = 0$ 。

$$T_{aub,j1} = t_b + \sum_{q \in MP_j} X_q, \quad (3)$$

式中: MP_j 表示负荷点 j 到重合器供电路径上的分段器集合; X_q 为分段器 q 加压延时合闸整定时间。

②若负荷点 j 位于 c1 类区域,由于未合闸到故障区段,导致无故障残压,自动隔离区下游边界分段器残压检测失败而未闭锁在分闸状态,当联络分段器合闸后,此下游边界分段器会加压合闸到故障区段,此时联络点电源所在馈线的重合器(或断路器)跳闸,联络分段器在监测时间内失压分闸后将闭锁在分闸状态,故负荷点 j 可手动隔离故障后由原电源点恢复供电,停电时间为 t_1 。而对于联络点电源所在馈线,经故障重合阶段恢复供电,为避免可靠性评估模型过于复杂,文中不考虑此过程中分段器“拒合闸”,故各馈线段负荷点依次恢复供电,负荷点停电时间可由式(3)计算。

③若负荷点 j 位于 c2 类区域,其分析与 c1 类区域一致,负荷点 j 可手动隔离故障后并手动切换联络后恢复供电,停电时间为 $t_1 + t_2$ 。

若成功重合到自动隔离区,由于故障自动隔离阶段已验证分段器是否“拒分闸”,故此时不再考虑分段器“拒分闸”,此后将进入分闸闭锁阶段。

3)分闸闭锁阶段:当自动隔离区上下游边界分段器闭锁开关失效时,负荷点 j 恢复供电时间如下:

①负荷点 j 位于 b 类区域。若自动隔离区上游边界分段器发生“时限内失压闭锁失效”,则重合器再次跳闸,包括负荷点 j 的区域自动恢复供电失败。其概率为 $P_{lockl} = P_{loc} \cdot P_{lockl}$,在手动隔离故障后可由原电源点恢复供电,耗时为 t_1 ;若闭锁成功,则顺利进入自动恢复供电阶段。

②负荷点 j 位于 c1 类区域。若与负荷点 j 对应的自动隔离区下游边界分段器发生“残压检测闭锁失效”,将导致自动恢复供电阶段联络分段器重合到故障区段,使得自动切换失败。负荷点 j 可手动隔离故障后由原电源点恢复供电,概率为 $P_{locke} = P_{loc} P_{locke}$,停电时间为 t_1 ;若闭锁成功,则顺利进入自动恢复供电阶段。

③负荷点 j 位于 c2 类区域。分析与 c1 类区域一致,负荷点 j 手动恢复供电的概率为 $P_{mac2,j1} = P_{loc} P_{locke}$,负荷点 j 可手动隔离故障后并手动切换联络后恢复供电,停电时间为 $t_1 + t_2$;若闭锁成功,则顺利进入自动恢复供电阶段。

4)自动恢复供电阶段:

①若负荷点 j 位于 b 类区域,负荷点 j 到重合器的供电路径上无分段器“拒合闸”,则自动恢复供电,概率为 $P_{aub,j}$,时间为 $T_{aub,j2}$:

$$P_{aub,j} = P_{loc}(1 - P_{lockl})(1 - P_{rc})Mn_{j-g}, \tag{4}$$

$$T_{aub,j2} = 2t_b + \sum_{q \in MP_j} X_q + \sum_{q \in MP_g} X_q. \tag{5}$$

在故障重合阶段已验证 MP_g 中分段器不会发生“拒合闸”,所以只需考虑集合 $MP_j - MP_g$ 中的分段器是否存在“拒合闸”, Mn_{j-g} 为集合 $MP_j - MP_g$ 的基数 $Card(MP_j - MP_g)$ 。

若负荷点 j 到重合器的供电路径上有分段器“拒合闸”,则负荷点 j 只能手动隔离故障后由原电源点恢复供电,耗时为 t_1 ,概率 $P_{mab,j2}$ 为

$$P_{mab,j2} = P_{loc}(1 - P_{lockl})[1 - (1 - P_{rc})^{Mn_{j-g}}]. \tag{6}$$

②若负荷点 j 位于 c1 类区域中,有自动切换的联络点 I 个($w1, w2, \dots, wI, I \geq 1$)。由于最多只考虑一个分段器故障,故负荷点 j 到各联络点公共路径上分段器无“拒合闸”,负荷点 j 即可自动恢复供电,成功自动复电的概率为 $P_{auc1,j}$,见式(7)。式(8)是自动恢复供电耗时的下限,负荷点 j 的自动恢复供电时间 $T_{auc1,j}$ 采用该式估算。

$$P_{auc1,j} = P_{loc}(1 - P_{locke})(1 - P_{rc})^{Mn^{(w1, w2, \dots, wI)}_j}, \tag{7}$$

$$T_{auc1,j} = \min(D_{w1} + \sum_{q \in MP^{w1}_j} X_q, \dots, D_{wI} + \sum_{q \in MP^{wI}_j} X_q), \tag{8}$$

式中, $MP_j^{(w1, w2, \dots, wI)}$ 表示集合 $(MP_j^{w1} \cap MP_j^{w2} \cap \dots \cap MP_j^{wI})$,是负荷点 j 到联络点($w1, w2, \dots, wI$)的公共路径上的分段器集合,其基数 $Card(MP_j^{(w1, w2, \dots, wI)})$ 用符号 $Mn^{(w1, w2, \dots, wI)}_j$ 表示。

若自动恢复供电条件无法满足,必须手动隔离故障后恢复负荷点 j 供电,时间为 t_1 ,概率为

$$P_{macl,j2} = P_{loc}(1 - P_{locke})[1 - (1 - P_{rc})^{Mn_j^{(w1, w2, \dots, wI)}}]. \tag{9}$$

③若负荷点 j 位于 c2 类区域,将式(7)~式(9)中符号 c1 换为 c2 即可得到自动恢复供电概率、自动恢复供电时间 $T_{auc2,j}$ 以及手动恢复供电概率。当自动恢复供电失败后,手动隔离故障并切换联络恢复供电,耗时为 $t_1 + t_2$ 。

综合上述,负荷点 j 位于 b 类区域,其期望恢复供电时间 T_{bj} 的计算式为

$$T_{bj} = P_{loc}(I_{bj,1} T_{aub,j1} + (1 - I_{bj,1}) t_1) + P_{aub,j} T_{aub,j2} + (P_{mab,j1} + P_{mab,j2}) t_1. \tag{10}$$

若负荷点 j 位于 c1 或 c2 类区域,其期望恢复供电时间分别为 $T_{c1,j}$ 与 $T_{c2,j}$,计算式为

$$T_{c1,j} = (P_{locf} + P_{macl,j1} + P_{macl,j2}) t_1 + P_{auc1,j} T_{auc1,j}, \tag{11}$$

$$T_{c2,j} = (P_{locf} + P_{mac2,j1} + P_{mac2,j2}) (t_1 + t_2) + P_{auc2,j} T_{auc2,j}. \tag{12}$$

3.3 可靠性指标计算式

重合器式馈线自动化系统可减少故障隔离和联络切换时间,有效减少了负荷点 j 的停电持续时间,由于故障率是元件的固定参数,因此馈线自动化系统中负荷点 j 的停运率为常数。当配电网中元件 r ($r=1, 2, 3, \dots, R$)故障后,导致边界分段器下游区域停电,受影响的负荷点集合用 L_r 表示,则负荷点 j 的年停运率计算公式为

$$\lambda_j = \sum_{r=1}^R I_{j \in L_r} \lambda_r. \tag{13}$$

当负荷点 j 属于 L_r ($r=1, 2, 3, \dots, R$)时,指示函数 $I_{j \in L_r} = 1$,反之为 0,下文 $I_{j \in L_{rb}}, I_{j \in L_{rdi}}$ 及同理。 λ_r 为元件 r 的故障率。

当元件 r 故障时,形成自动隔离区 g ,此时负荷点 j 停电时间的计算式为

$$U'_j = I_{j \in L_{rb}} T_{bj} + \sum_{i=1}^7 I_{l \in L_{rci}} T_{cij} + \sum_{i=1}^4 I_{j \in L_{rdi}} T_{dij}. \tag{14}$$

考虑所有元件 $r(r=1,2,3,\dots,R)$ 故障, 负荷点 j 年停电时间 U_j 与平均停电时间 r_j 计算式为

$$U_j = \sum_{r=1}^R \sum_{g=1}^{NU_r} \lambda_r P_g U'_j, \quad (15)$$

$$r_j = U_j / \lambda_j. \quad (16)$$

4 算例分析

馈线自动化系统的可靠性参数见表4, 其中电压时间型和电压电流型馈线自动化系统的参数整定方法及合闸间隔时间等概念见文献[13-14]。为便于对不同类型馈线自动换系统进行比较, 设电压电流型分段器“故障跳闸闭锁失效”的概率 $P_{\text{lock}} = P_{\text{lockl}}$, 电压电流型分段器其他状态的概率与电压时间型分段器取相同数值。过流计数型馈线自动化系统的参数整定见参考文献[7]。

表4 馈线自动化系统可靠性参数
Table 4 The reliability parameters of FA

类别	数值
电压时间型分段器状态概率/ $(P_{\text{rb}}/P_{\text{rc}}/P_{\text{lockl}}/P_{\text{locke}})$	0.005/0.015/0.005/0.03
过流计数型分段器状态概率/ $(P_{\text{cou1}}/P_{\text{cou2}})$	0.002/0.008
分段器合闸间隔/s	7
重合器重合间隔 t_b /s	5

4.1 重合器式馈线自动化系统对可靠性的影响

由于目前尚无文献针对含重合器式馈线自动化的配电网进行深入可靠性评估, 鉴于文献[4]对含 FTU 式馈线自动化的配电网进行了可靠性评估分析, 因此以文献[4]算例分析中的配电网及计算结果作为比较对象, 以映证文中模型的正确性。具体做法是: 将文献[4]配电网的 FTU 式馈线自动化系统更换为重合器式馈线自动化系统。其中远程控制开关更换为分段器, 断路器替换为重合器, 其余类型开关保持不变, 各元件的电气和可靠性参数详见文献[4]。为体现比较效果, 文中考虑 5 种情况: ①含电压时间型馈线自动化(但不计及概率失效特性); ②含电压时间型馈线自动化(计及概率失效特性); ③含电压电流型馈线自动化(计及概率失效特性); ④含过流计数型馈线自动化(计及概率失效特性); ⑤无馈线自动化。最后, 采用文中所提模型对配电网进行可靠性评估, 计算结果见表 5。

表5 文献[4]所示配电网计算结果
Table 5 Reliability evaluation results of literature 4

情况	SAIFI/(次/户/年)	SAIDI/(时/户/年)	SAIDI 改善百分比/%
文献[4]	1.270 0	5.329 0	11.48
1	1.270 0	5.263 6	12.57
2	1.270 0	5.279 2	12.30
3	1.270 0	5.277 2	12.34
4	1.270 0	5.268 6	12.48
5	1.270 0	6.020 0	—

注: SAIDI 指标的改善百分比是以情况 5 为参照基准。

从表 5 可知: ①情况 1~4 的可靠性优于情况 5, 可见馈线自动化系统可有效改善配电网供电可靠性; ②文献[4]假定遥控开关 100%可靠, 这与表 5 情况 1 类似, 即都没有考虑馈线自动化系统概率失效特性。情

况 1 可靠性评估结果略微优于文献[4],因为文献[4]中,FTU 式馈线自动化的故障自动隔离时间和自动切换时间之和取固定值(6 min),而文中模型利用重合器式馈线自动化系统的运行逻辑和各分段器的整定延时计算各负荷点自动恢复供电时间,负荷点的自动恢复供电时间小于文献[4]的固定取值。③表 5 中情况 2 相比情况 1 可靠性有所降低,可见考虑馈线自动化系统的概率失效特性会使自动隔离区扩大,导致可靠性改善效果降低。

文献[4]的配电网算例为典型的辐射状无联络结构,且可安装分段器的位置很少,因此馈线自动化对配电网可靠性的改善作用并不明显,此外由于该配电网没有联络电源,因此电压时间型、电压电流型及过流计数型 3 种不同类型对配电网可靠性的改善程度也难以进行比较而得出客观结论。因此,文中使用图 1 作为算例进行扩展分析。

图 1 所示配电网的可靠性参数见表 6。由于过流计数型分段器无法作为联络分段器,因此当采用过流计数型馈线自动化系统时,联络开关都为手动切换开关,且假设重合器能够满足过流计数型馈线自动化对重合次数的要求。可靠性评估结果见表 7。

表 6 配电网可靠性参数

Table 6 Reliability parameters of distribution network

类别	每段线路故障率/ (次/年)	变压器故障率/ (次/年)	线路维修时间/ h	变压器更换时间/ h	隔离时间/ h	切换时间/ h
数值	0.1	0.015	5.0	24.0	2.0	1.0

表 7 图 1 所示配电网计算结果

Table 7 Calculation results of distribution network of Fig.1

情况	SAIFI/ (次/户·年)	SAIDI/ (时/户·年)	SAIDI 改善百分比/ %	SAIDI 改善百分比之差/ %
1	3.939 5	2.654 3	75.76	—
2	3.939 5	3.243 5	70.38	5.38
3	3.939 5	3.168 6	71.06	4.69
4	3.939 5	4.746 8	56.64	19.11
5	3.939 5	10.948 5	—	—

从表 7 可知:①情况 1 的可靠性好于情况 2,计及电压时间型馈线自动化系统概率失效特性与不计入时的 SAIDI 改善百分比有 5.38% 的差异。在自动恢复供电过程中,电压时间型馈线自动化系统需要各分段器按照图 2 流程执行预期功能,并相互配合才能完成故障自动隔离、故障重合、分闸闭锁及自动恢复供电,任一分段器故障都可能导致自动供电恢复失败,因此不考虑馈线自动化系统的概率失效特性会高估其对可靠性的改善程度。②对比情况 2~4,情况 3 的可靠性优于情况 2。因为:一方面电压电流型馈线自动化系统在自动重合的同时自动恢复非故障区供电,缩短了自动恢复供电时间;另一方面电压电流型分段器无需检测残压闭锁分段器,提高了自动恢复供电成功率。③过流计数型馈线自动化系统只能根据流过的故障电流次数控制分段器开关的分合闸,不能作为联络分段器使用以实现自动切换联络,因此其对供电可靠性的改善程度最低。由上述分析可知:不可忽略馈线自动化系统概率特性及运行逻辑(不同类型的馈线自动化系统具有不同的运行逻辑)对配电网可靠性的影响。

4.2 分段器配置方式对可靠性的影响分析

为了验证不同分段器配置方式对配网可靠性的影响,文中首先减少图 1 中分段器的数量,设置以下 2 种分段器配置方案:①图 1 中开关(S7,S9,S14,S19,S23,S12,S25)为分段器,其余为普通开关;②图 1 中开关(S3,S10,S19,S24,S27,S12,S25)为分段器,其余为普通开关。两种方案的分段器数量相同但安装位置相异,可靠性评估结果见表 8。

表 8 各配置方案下的可靠性评估结果
Table 8 Calculation results of sectionalizer schemes

情况	方案 1		方案 2	
	SAIDI/(时/户·年)	SAIDI 改善百分比/%	SAIDI/(时/户·年)	SAIDI 改善百分比/%
1	3.106 2	71.63	4.569 2	58.27
2	3.462 0	68.38	4.862 9	55.58
3	3.382 1	69.11	4.744 5	56.67
4	5.553 3	49.28	8.421 5	23.08
5	10.948 5	—	10.948 5	—

从表 8 可知:①对比表 7 和表 8,可见表 7 中可靠性指标优于表 8。配电网的可靠性随着分段器的减少而降低,因为分段器数量的减少会使 d 类负荷区域范围扩大,整体上延长了恢复供电时间;②对比表 8 中两种配置,方案 1 的可靠性指标好于方案 2。因为配电网结构以及负荷分布特点决定了分段器的不同安装位置对系统可靠性影响也不同,故通过分段器的安装位置优化,使馈线自动化系统对配电网的可靠性改善程度最大化。在规划设计时,可通过不同分段器配置方案下的可靠性成本效益分析,择优确定分段器配置方案。

为观察分段器数量不断增加对配网可靠性的影响规律,以开关(S2,S13,S18,S19,S24,S12,S25)作为分段器初始配置,每次增加一个分段器,顺序为(S9,S10,S20,S27,S7,S14,S23,S3,S6,S15,S21,S4,S5,S8,S16,S28),由此得到配电网可靠性指标 SAIDI 的变化曲线,见图 3。其中当分段器数为 15 时,对应图 1 所示配电网。

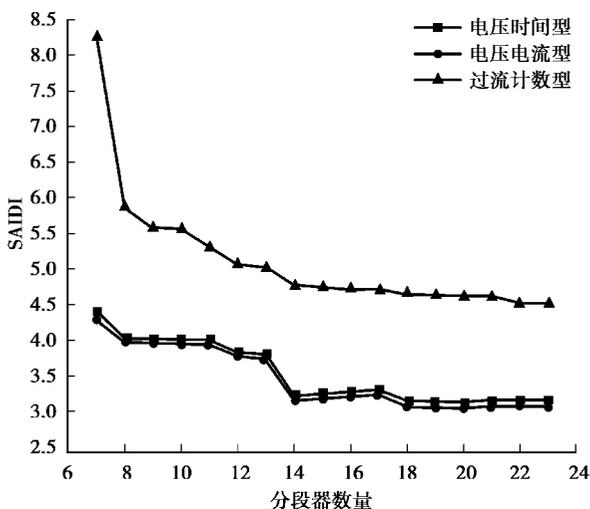


图 3 不同分段器数量下的 SAIDI 指标

Fig.3 SAIDI for different amounts of sectionalizers

从图 3 可见:增加分段器将提高供电可靠性,当分段器数量增加到 18 以后,曲线趋于平稳,即进入饱和区。当分段器数为 13、15、16 与 17 时,增加分段器反而使供电可靠性降低。因为:电压时间型与电压电流型馈线自动化系统采用逐段重合的运行逻辑,各分段器需相互配合才能完成故障自动隔离、故障重合、分闸闭锁及自动恢复供电,任何分段器失效都可能导致自动恢复供电失败。增加分段器,意味自动恢复供电过程需要相互配合的分段器数量相应增加,而分段器本身具有概率失效特性,增加分段器的同时也增加了自动恢复供电失败的概率。当增加分段器引起的配电网可靠性改善不足以抵消其引入的风险时,则配电网可靠性可能反而降低。

5 结 语

通过重新划分配电网区域类型和建立分段器可靠性模型,依据重合器式馈线自动化系统运行逻辑推导了各类负荷点恢复供电时间,建立了含重合器式馈线自动化的配电网可靠性评估模型。由于计及了馈线自动化系统特性(运行逻辑与概率失效特性)对配电网可靠性的影响,可准确评估含电压时间型、电压电流型或过流计数型馈线自动化的复杂配网可靠性。

参考文献:

- [1] Siirto O, Kuru J, Lehtonen M. Fault location, isolation and restoration in a city distribution network[C]//Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ). 2014.[S.l.]: IEEE, 2014; 367-370.
- [2] 袁钦成. 配电系统故障处理自动化技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2007.
YUAN Qincheng. Automation technology of fault handling in distribution system[M]. Beijing: China Electrical Power Press, 2007. (in Chinese)
- [3] He Y, Andersson G, Allan R N. Modeling the impact of automation and control on the reliability of distribution systems [C]//Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. [S.l.]: IEEE, 2000, 1: 79-84.
- [4] Conti S, Rizzo S A, El-Saadany E F, et al. Reliability assessment of distribution systems considering telecontrolled switches and microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 598-607.
- [5] 程红丽, 唐开成, 刘健. 配电自动化条件下配电系统供电可靠性评估[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 166-172.
CHENG Hongli, TANG Kaicheng, LIU Jian. Reliability evaluation for distribution systems with automation [J]. Gaodianya Jishu/ High Voltage Engineering, 2007, 33(7): 166-172.(in Chinese)
- [6] 商海涛, 吴林, 赵渊. 计及集中式馈线自动化的配电网可靠性评估模型[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 1-8.
SHANG Haitao, WU Lin, ZHAO Yuan. Reliability evaluation model of distribution network incorporating centralized feeder automation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 1-8. (in Chinese)
- [7] Haakana J, Lassila J, Kaipia T, et al. Comparison of reliability indices from the perspective of network automation devices[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1547-1555.
- [8] Abdi S, Afshar K, Ahmadi S, et al. Optimal recloser and auto-sectionalizer allocation in distribution networks using IPSO-Monte Carlo approach[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 55: 602-611.
- [9] Popovic D S, Glamocic L R, Nimrihter M D. The optimal automation level of medium voltage distribution networks[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011, 33(3): 430-438.
- [10] Meng Q, Wang T. Effects of distribution automation on distribution system reliability[C]//Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2014 IEEE Conference and Expo. [S.l.]:IEEE, 2014: 1-4.
- [11] Nimrihter M D. Reliability indices estimation of distribution circuits by application of distribution automation[J]. DA/DSM DistribuTech Europe, 1996, 96: 547-558.
- [12] Kazemi S, Fotuhi-Firuzabad M, Sanaye-Pasand M, et al. Impacts of automatic control systems of loop restoration scheme on the distribution system reliability[J]. Generation, Transmission & Distribution, IET, 2009, 3(10): 891-902.
- [13] 刘健, 张伟, 程红丽. 重合器和电压-时间型分段器配合的馈线自动化系统的参数整定[J]. 电网技术, 2006, 30(16): 45-49.
LIU Jian, ZHANG Wei, CHENG Hongli. The parameter setting of feeder automation system based on mutual coordination of recloser with voltage-time type of sectionalizers[J]. Power System Technology. 2006, 30(16): 45-49. (in

Chinese)

- [14] 刘健, 程红丽, 李启瑞. 重合器与电压-电流型开关配合的馈线自动化[J]. 电力系统自动化, 2004, 27(22): 68-71.
LIU Jian, CHENG Hongli, LI Qirui. Feeder automation based on reclosers and voltage-current-mode pole-mounted switches[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 68-71. (in Chinese)
- [15] Lee Y, Meliopoulos A P, Lee J. New feeder automation scheme using VIT reclosers and VIT sectionalizers[C]// PowerTech (POWERTECH), 2013 IEEE Grenoble. Grenoble: IEEE, 2013: 1-6.
- [16] 吴林. 计及馈线自动化的配电网可靠性分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
WU Lin. Reliability analysis of distribution network considering feeder automation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)
- [17] 李卫星, 李志民, 刘迎春. 复杂辐射状配电系统的可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 69-73.
LI Weixing, LI Zhimin, LIU Yingchun. Evaluation of complex radial distribution system reliability[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 69-73. (in Chinese)

附录 A

1. 计及电压电流型馈线自动化的配网可靠性评估

电压电流型^[14-15]与电压时间型的主要区别为:电压电流型分段器的开关本体为断路器,当自动隔离区边界分段器合闸于故障时,可直接跳闸并闭锁开关。其自动恢复供电流程为:①故障自动隔离阶段与电压时间型完全一样;②在自动重合阶段,重合器重合以及联络分段器合闸,其余分段器逐个合闸到自动隔离区,同时 b、c1 与 c2 类区域暂时复电;③分闸闭锁阶段,自动隔离区边界分段器合闸到故障,直接跳闸并闭锁,此时 b、c1 与 c2 类区域才完全自动复电。

分段器可靠性模型:分段器的执行流程如图 4。自动隔离区边界分段器按流程 1 执行,其余分段器按流程 2 执行。边界分段器有 3 种失效模式,“故障跳闸闭锁失效”表示分段器不能完成跳闸和闭锁功能,对应的 b、c1 与 c2 区域无法自动恢复供电,概率为 P_{lock} ;“拒分闸”则会导致自动隔离区扩大;“拒合闸”对自动恢复供电无影响。除边界分段器外的其余分段器,其失效后对自动恢复供电的影响与电压时间型分段器一致。

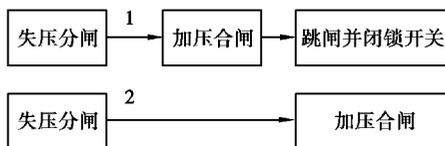


图 4 分段器动作流程

Fig. 4 Action process for sectionalizer

故障自动隔离阶段:此阶段的分析过程与电压时间型完全一样,不再赘述。

自动重合阶段:在最多计及一个分段器故障的条件下,自动隔离区 g 到 b 类区域内各电源点(重合器以及联络点 I 个, $I \geq 0$)公共供电路径上的分段器不出现“拒合闸”,则上游边界分段器成功合闸到自动隔离区, b 类区域顺利进入分闸闭锁阶段。自动隔离区 g 到 c1 或 c2 区域内各联络点(联络点 I 个, $I \geq 1$)公共供电路径上的分段器不出现“拒合闸”,则对应的下游边界分段器合闸到自动隔离区,对应的 c1 或 c2 区域顺利进入分闸闭锁阶段。

若没有合闸到自动隔离区,负荷点 j 的恢复供电时间如下:

1)若负荷点 j 位于 b 类区域, b 类区域内有可自动切换的联络点 I 个($w_1, w_2, \dots, w_I, I \geq 0$)。

若负荷点 j 可自动恢复供电,则负荷点 j 到各电源点(重合器与联络点)的公共供电路径上无分段器“拒合闸”,其概率为 $P_{aub,j1} = (1 - P_{rc}) Mn_j^{(0, w_1, \dots, w_I)}$, 其中 $MP_j^{(0, w_1, w_2, \dots, w_I)}$ 表示集合 $(MP_j \cap MP_j^{w_1} \cap MP_j^{w_2} \cap \dots \cap MP_j^{w_I})$, 是负荷点 j 到重合器及联络点 (w_1, w_2, \dots, w_I) 的公共路径上的分段器集合, 同理有集合 $MP_g^{(0, w_1, w_2, \dots, w_I)}$ 。 $Mn_j^{(0, w_1, w_2, \dots, w_I)}$ 表示基数 $Card(MP_j^{(0, w_1, w_2, \dots, w_I)})$ 。

由于上游边界分段器没有合闸到自动隔离区 g , 则自动隔离区 g 到各电源点(重合器与联络点)的公共供电路径上必然存在分段器“拒合闸”, 且该分段器只能是集合 $MP^{(0, w_1, w_2, \dots, w_I)} - MP_j^{(0, w_1, w_2, \dots, w_I)}$ 中元素。

由上述可知, 负荷点 j 自动恢复供电的概率 P_{aub, j_1} 和耗时估计 $T_{\text{aub}, j}$ 分别为

$$P_{\text{aub}, j_1} = (1 - P_{rc}) Mn_j^{(0, w_1, \dots, w_I)} C_{Mn_1^{(0, w_1, \dots, w_I)g-j}} P_{rc} (1 - P_{rc}) Mn_{g-j}^{(0, w_1, \dots, w_I)} - 1, \quad (17)$$

$$T_{\text{aub}, j} = \min(t_b + \sum_{q \in MP_j} X_q, D_{w_1} + \sum_{q \in MP_j^{w_1}} X_q, \dots, D_{w_I} + \sum_{q \in MP_j^{w_I}} X_q), \quad (18)$$

式中, $Mn_{g-j}^{(0, w_1, w_2, \dots, w_I)}$ 为基数 $\text{Card}(MP_g^{(0, w_1, w_2, \dots, w_I)} - MP_j^{(0, w_1, w_2, \dots, w_I)})$ 。

2) 若负荷点 j 位于 c1 类区域中, 有可直接自动切换的联络点 I 个($w_1, w_2, \dots, w_I, I \geq 1$), 分析过程与 b 类区域类似。即: 自动隔离区 g 到各联络点的公共供电路径上有分段器“拒合闸”, 但该“拒合闸”分段器不在负荷点 j 到各联络点的公共供电路径上时, 负荷点 j 可自动恢复供电, 概率为 P_{auc1, j_1} , 见式(19), 耗时估算 $T_{\text{auc1}, j}$ 可采用式(8)估算。

$$P_{\text{auc1}, j_1} = (1 - P_{rc}) Mn_j^{(w_1, \dots, w_I)} C_{Mn_{g-j}^1} P_{rc} (1 - P_{rc}) Mn_{g-j}^{(w_1, \dots, w_I)} - 1. \quad (19)$$

3) 若负荷点 j 位于 c2 类区域, 分析与 c1 类似。

若自动重合阶段成功合闸到自动隔离区, 负荷点 j 的恢复供电时间将取决于下述的分闸闭锁阶段是否成功。

分闸闭锁阶段:

1) 若负荷点 j 位于 b 类区域, 且 b 类区域中有自动切换联络点 I 个($w_1, w_2, \dots, w_I, I \geq 0$)。如果成功重合到自动隔离区, 且自动隔离区上游边界分段器无“故障跳闸闭锁失效”, 同时负荷点 j 到各电源点的公共路径上无分段器“拒合闸”, 则可自动恢复供电。耗时估算见式(18), 概率为

$$P_{\text{aub}, j_2} = (1 - P_{rc}) Mn_g^{(0, w_1, \dots, w_I)} (1 - P_{\text{lock}}) (1 - P_{rc}) Mn_{j-g}^{(0, w_1, \dots, w_I)} = (1 - P_{\text{lock}}) (1 - P_{rc}) Mn_{j+g}^{(0, w_1, \dots, w_I)}, \quad (20)$$

式中: $Mn_{j+g}^{(0, w_1, w_2, \dots, w_I)}$ 为基数 $\text{Card}(MP_g^{(0, w_1, w_2, \dots, w_I)} \cup MP_j^{(0, w_1, w_2, \dots, w_I)})$; P_{lock} 为电压电流型分段器“故障跳闸闭锁失效”的概率。

2) 若负荷点 j 位于 c1 类区域中, 有直接自动切换的联络点 I 个($w_1, w_2, \dots, w_I, I \geq 1$), 与 b 区域类似, 自动隔离区下游边界分段器不发生“故障跳闸闭锁失效”, 且负荷点 j 到各联络点的公共分段器无分段器“拒合闸”, 则自动恢复供电, 概率 P_{auc1, j_2} 为

$$P_{\text{auc1}, j_2} = (1 - P_{rc}) Mn_g^{(w_1, \dots, w_I)} (1 - P_{\text{lock}}) (1 - P_{rc}) Mn_{j-g}^{(w_1, \dots, w_I)} = (1 - P_{\text{lock}}) (1 - P_{rc}) Mn_{j+g}^{(w_1, \dots, w_I)}, \quad (21)$$

式中, $Mn_{j+g}^{(w_1, \dots, w_I)}$ 为 $\text{Card}(MP_j^{(w_1, \dots, w_I)} \cup MP_g^{(w_1, \dots, w_I)})$ 。

3) 若负荷点位于 c2 类区域, 分析与 c1 类似。

因此, 若负荷点 j 位于 b、c1 或 c2 类区域, 其期望恢复供电时间分别为 T_{bj} 、 $T_{c1, j}$ 、 $T_{c2, j}$ 。

$$T_{bj} = (P_{\text{aub}, j_1} + P_{\text{aub}, j_2}) T_{\text{aub}, j} + (1 - P_{\text{aub}, j_1} - P_{\text{aub}, j_2}) t_1, \quad (22)$$

$$T_{c1, j} = (P_{\text{auc1}, j_1} + P_{\text{auc1}, j_2}) T_{\text{auc1}, j} + (1 - P_{\text{auc1}, j_1} - P_{\text{auc1}, j_2}) t_1, \quad (23)$$

$$T_{c2, j} = (P_{\text{auc2}, j_1} + P_{\text{auc2}, j_2}) T_{\text{auc2}, j} + (1 - P_{\text{auc2}, j_1} - P_{\text{auc2}, j_2}) (t_1 + t_2). \quad (24)$$

2. 计及过流计数型馈线自动化的配网可靠性评估

图 5 为安装了过流计数型馈线自动化系统的配电网。各分段器允许流过故障电流的整定次数为: S6 与 S5 为 1 次; S4 与 S2 分别为 2 和 3 次^[7]。假设元件 4 故障, 重合器跳闸(分段器失压后仍然处于合闸状态, 启动计数器), 自动恢复供电过程为: ①重合器重合第一次, 分段器(S4)流过一次故障电流, 计数加 1。重合器分闸后再次重合, 分段器(S4)再次流过故障电流, 计数再加 1。分段器(S4)流过故障电流次数达到整定次数 2, 分段器(S4)达到分闸条件, 重合器跳闸后分段器(S4)也分闸, 从而实现隔离故障; ②重合器再次重合, 恢复 b 类区域供电。注意: 该类型馈线自动化仅适合分段较少的配电网, 因不具电压检测功能, 无法自动切换联络。

过流计数型分段器按计数条件控制开关分闸。本文将过流计数型分段器的失效模式分为两种: “失效误分闸”表示分段器计数尚未达到分闸条件就错误分闸, 概率 P_{cou1} ; “失效拒分闸”表示分段器流过故障电流次数到达分闸条件但不能分闸, 开关维持在合闸状态, 概率 P_{cou2} 。

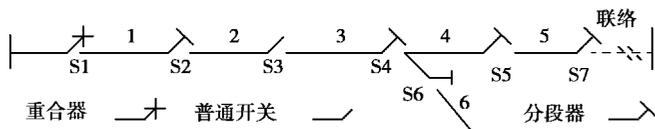


图 5 含过流计数型馈线自动化的配电网

Fig. 5 A distribution network with feeder automation of over-current pulse counting type

负荷点 j 恢复供电时间分析如下:

1) 某元件 r 故障后,若基本自动隔离区上游边界分段器存在“计数失效拒分闸”,则形成扩展自动隔离区。当最多只考虑一个分段器故障时,扩展隔离区形态总数为 1,其概率为 $P_{\text{cou}2}$ 。基本自动隔离区的概率为 $1 - P_{\text{cou}2}$ 。

正文中的负荷分类以及 $a, c_i (i=3, 4, \dots, 7)$ 与 d 类区域的恢复供电时间在此依然可用,但 c_1 与 c_2 类区域负荷无法自动恢复供电,将在人工手动操作阶段恢复供电。依据操作策略,若负荷点 j 属于 c_1 与 c_2 类区域,其恢复供电时间为: $T_{c_1j} = t_1, T_{c_2j} = t_1 + t_2$ 。

2) 形成自动隔离区 g 后,馈线自动化系统可自动恢复 b 类区域供电。

若负荷点 j 位于 b 类区域,其成功自动恢复供电的条件是:负荷点 j 到重合器供电路径上不出现分段器“失效误分闸”,概率 $P_{\text{aub},j}$ 为

$$P_{\text{aub},j} = (1 - P_{\text{cou}1}) M n_j, \quad (25)$$

自动恢复供电时间 T_{bj} 的计算式为

$$T_{\text{aub},j} = (y + 1) t_b. \quad (26)$$

式中, y 为自动隔离区上游边界分段器整定的过流次数。

若负荷点 j 位于 b 区域,但自动恢复供电失败,则手动隔离故障后恢复供电,时间为 t_1 。因此,负荷点 j 位于 b 区域时的期望恢复供电时间 T_{bj} 为

$$T_{bj} = P_{\text{aub},j} T_{\text{aub},j} + (1 - P_{\text{aub},j}) t_1. \quad (27)$$

(编辑 詹燕平)