

文章编号:1671-6833(2024)01-0114-08

集中式馈线自动化配电网供电可靠性评估

陈根永¹, 高翔宇¹, 谭超², 范旭光³

(1. 郑州大学 电气与信息工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 国网河南省电力公司新乡供电公司, 河南 新乡 453000;
3. 国网河南省电力公司宝丰县供电公司, 河南 平顶山 467400)

摘要: 计及集中式馈线自动化的配电网可靠性评估尚存在较多研究空白, 且多数研究仅计及故障停电的影响, 在考虑预安排检修容量约束的情况下, 计及负荷转供影响, 结合馈线自动化的类型及运行逻辑, 依据馈线自动化相关技术指标, 对恢复供电过程中出现的负荷点进行详细分类, 推导出不同类型负荷期望恢复供电时间和配电网供电可靠性指标计算公式。结合算例进行分析可知, 不同终端配置下馈线系统平均停电持续时间 SAIDI 可减少 0.95~1.08 h/(用户·a), 说明了优化终端配置可有效提高配电网供电可靠性, 证明了所提评估方法的准确性和实用性, 并比较了不同终端配置对可靠性的影响。

关键词: 集中式馈线自动化; 配电网; 供电可靠性; 预安排检修; 负荷转供

中图分类号: TM715

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2023.04.006

馈线自动化是配电自动化的一个重要组成部分, 是提高配电网生产运行管理水平和提升供电可靠性的重要手段。已有部分文献对馈线自动化技术在配电网可靠性评估中的应用进行了初步研究。Meng 等^[1]分析了馈线自动化对配电网可靠性的影响, 但尚未建立相应的评估模型。商海涛等^[2]通过建立集中式馈线自动化的可靠性评估模型, 量化出集中式馈线自动化对配电网供电可靠性的影响。赵渊等^[3]通过建立就地型馈线自动化的可靠性评估模型, 量化出就地型馈线自动化对配电网供电可靠性的影响。向真等^[4]分析了馈线自动化技术对配电网的影响, 以故障分类为基础, 通过网络等值法对配电网供电可靠性进行评估。目前, 结合预安排停电和负荷转供对含有馈线自动化的配电网进行可靠性评估的研究较少。

本文针对集中式馈线自动化, 结合此模式下的基本原理^[5]、设备配置和动作逻辑, 依据相关技术指标, 在故障模式后果分析法^[6-7]的基础上, 考虑预安排检修^[8-9]和容量约束^[8-10]的情况下, 构建出含集中式馈线自动化的配电网供电可靠性评估模型, 从而给出采用集中式馈线自动化模式下对配电网供

电可靠性影响的量化计算结果。

1 馈线自动化概述

1.1 集中式馈线供电恢复逻辑

集中式馈线自动化根据其运行方式可分为全自动方式和半自动方式。其整体架构如图 1 所示。

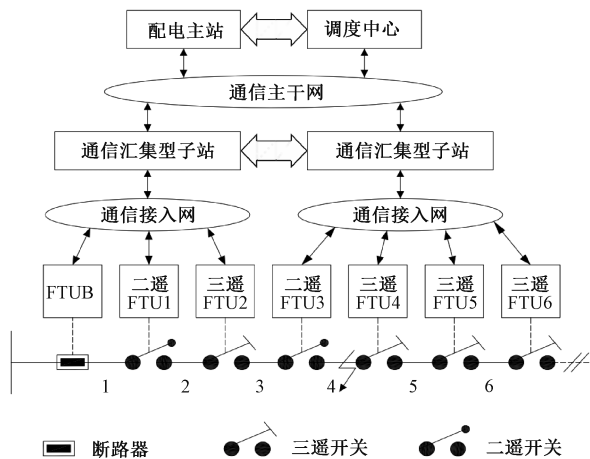


图 1 集中式馈线自动化系统整体架构图

Figure 1 Overall architecture diagram of centralized feeder automation system

收稿日期: 2022-11-09; 修订日期: 2022-12-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61803343)

作者简介: 陈根永(1964—), 男, 河南禹州人, 郑州大学教授, 主要从事电力系统运行与分析的研究, E-mail: ezzucgy@163.com。

引用本文: 陈根永, 高翔宇, 谭超, 等. 集中式馈线自动化配电网供电可靠性评估[J]. 郑州大学学报(工学版), 2024, 45(1): 114-121. (CHEN G Y, GAO X Y, TAN C, et al. Evaluation of power supply reliability of centralized feeder automation distribution network[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024, 45(1): 114-121.)

集中式馈线自动化的运行逻辑如下。图 1 中,若馈线段 4 发生故障,出口断路器跳闸且重合失败,出口终端设备将故障过程中的遥测信息和遥信信息上传至主站,主站基于故障定位算法^[11-13],将故障点分段定位至 FTU3 和 FTU4 之间。定位成功后,对配备 FTU3 的开关通过人工操作进行故障隔离;对配备 FTU4 的开关通过系统远程操作进行故障隔离。故障隔离后,主站向 FTUB 下发合闸命令,实现故障上游恢复供电;主站向 FTU4 下发合闸命令,实现故障下游恢复供电。

1.2 馈线终端功能

相比普通开关,自动化终端的配置主要靠缩短故障查找时间、隔离时间和负荷转供时间来提升配电网的供电可靠性,具体表现在:具有遥信和遥测功

能的二遥开关可以在很短的时间内将故障信息传输至主站,同时给出联络开关和分段开关的工作方案,再由人工到现场进行倒闸操作,其中故障查找时间可忽略不计;三遥开关在遥测和遥信的基础之上增加了遥控功能,可远程控制开关动作,对应的线路故障查找时间、隔离时间和转供时间均较小。

1.3 特征区域定义

由于故障停电是无法预知的,预安排停电是有计划的,加之集中式馈线自动化的运行逻辑受馈线终端类型的影响,因此,不同停电状态下(含故障停电和预安排停电)的特征区域存在较为明显的差别。

含集中式馈线自动化系统的配电网如图 2 所示。

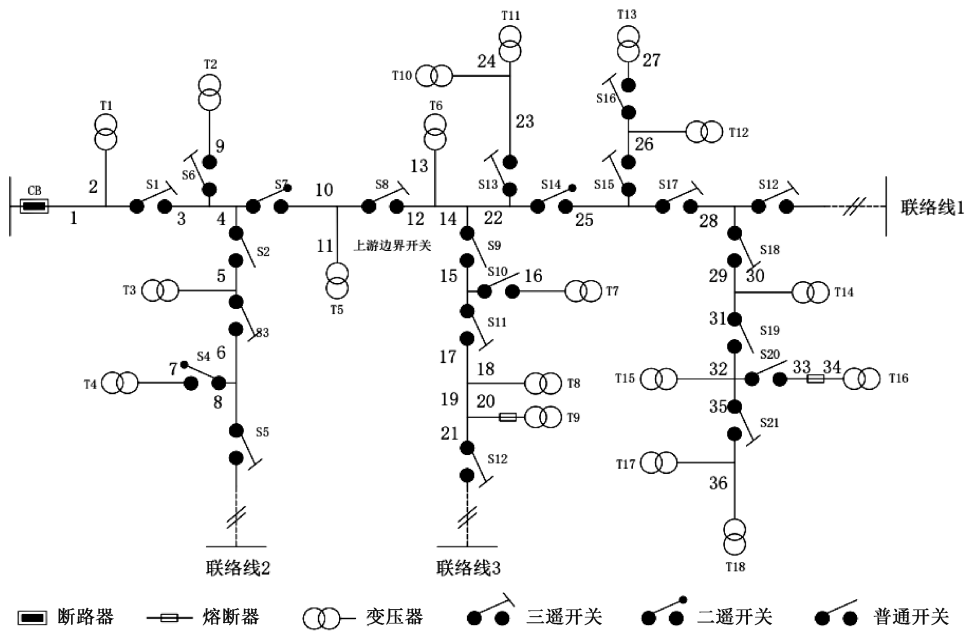


图 2 含集中式馈线自动化系统的配电网

Figure 2 Distribution network diagram with centralized feeder automation system

1.3.1 故障停电状态下的特征区域

- 供电恢复过程中出现的特征区域如下。
- (1)手动隔离区:指手动隔离故障元件的最小区域。
 - (2)基本自动定位区:以三遥或二遥开关为边界通过遥测量确定故障元件区域。
 - (3)扩展自动定位区:如果基本自动定位区某边界三遥或二遥开关失效,则以该失效三遥或二遥开关为起点,向上游或下游搜索三遥或二遥开关,此时基本自动定位区扩大为扩展自动定位区。
 - (4)基本自动隔离区:以三遥开关为边界满足故障自动隔离条件的最小区域。
 - (5)扩展自动隔离区:如果基本自动隔离区某

边界三遥开关失效,则该失效三遥开关上游或下游的三遥开关成为隔离故障的边界开关,进而形成扩展自动隔离区。

若图 2 中元件 13 发生故障,元件集合 {12,13,14,22,T6} 构成手动隔离区,元件集合 {12,13,14,15,16,22,25,T6,T7} 构成基本自动隔离区,若三遥终端 S8 失效,元件集合 {3,4,5,10,11,12,13,14,15,16,22,25,T3,T5,T6,T7} 构成扩展自动隔离区。

1.3.2 预安排停电状态下的特征区域

- 供电恢复过程中出现的特征区域如下。
- (1)预安排隔离区:以保护开关为边界,预安排停电隔离的最小区域。
 - (2)预安排恢复供电区:对于有联络通道的区

域,以保护开关为边界,满足预安排转供的区域,该区域预安排停电 1 次;对于无联络通道的区域,以保护开关为边界,不满足预安排转供的区域,该区域预安排停电 1 次。

(3)正常供电区:以保护开关为边界,在进行预安排检修时,保护开关能可靠切断负荷电流,供电不受影响。

若图 2 中元件 12 进行预安排停电检修,元件集合 $\{12,13,14,22,T6\}$ 构成预安排隔离区,元件集合 $\{15,16,\cdots,21,23,24,25,\cdots,36,T7,T8,\cdots,T18\}$ 构成预安排恢复供电区,元件集合 $\{1,2,\cdots,11,T1,T2,\cdots,T5\}$ 构成正常供电区。

2 负荷区域分类

2.1 故障停电状态下的负荷区域分类

故障发生后,考虑到集中式馈线自动化系统供电恢复逻辑的影响以及停电时间的不同,将负荷区域分为 4 大类。①A 类区域处于开关设备上游,不受停电影响;②B 类区域处于开关设备与自动隔离区之间;③C 类区域处于自动隔离区下游,考虑到 C 类区域可能存在联络线的情况,其恢复供电情况往往较为复杂,因此根据 C 类区域元件与手动隔离区的相对位置,结合联络情况和切换类型,进一步将其细分为 8 个子类区域,如表 1 所示。④D 类区域为自动隔离区本身,根据与手动隔离区的位置关系,结合联络情况和切换类型,进一步将其细分为 5 个子类区域,如表 2 所示。

表 1 C 类子区域划分表

Table 1 Area division results of class-C

切换类型	有直接联络		是否存在间接联络	
	自动	人工	有	无
Area-u	C1	C3	C5	C7
Area-d	C2	C4	C6	C8

注:①对于存在自动和手动两种切换方式的联络区域,可将此区域视为自动切换区域;②Area-u、Area-d 分别表示处于手动隔离区上游和处于手动隔离区下游。

表 2 D 类子区域划分表

Table 2 Area division results of class-D

联络点类型	有间接联络	无间接联络
Area-u	D1	D3
Area-d	D2	D4
Area-o	D5	D5

注:Area-o 表示手动隔离区。

2.2 预安排停电状态下的负荷区域分类

类比故障停电,在预安排停电的情况下,将集中

式馈线自动化系统的配电网分为 3 类负荷区域。

①E 类区域位于正常供电区,不受预安排停电影响;②F 类区域位于预安排恢复供电区,预安排停电 1 次,停电时间受联络情况和切换类型的影响,因此进一步将其细分为 6 个子类区域,如表 3 所示;③G 类区域位于预安排隔离区,预安排停电 1 次,停电时间为预安排停运时间,根据隔离区内开关的切换类型,进一步将其细分为 2 个子类区域,如表 4 所示。

表 3 F 类子区域划分表

Table 3 Area division results of class-F

联络情况	隔离类型	切换类型	F 类子区域
有联络通道	自动	自动	F1
	自动	手动	F2
	手动	自动	F3
	手动	手动	F4
无联络通道	自动		F5
	手动		F6

表 4 G 类子区域划分表

Table 4 Area division results of class-G

区域类型	切换类型	G 类子区域
G 类区域	自动	G1
	手动	G2

注:对于既有手动开关又有自动开关的区域,其切换类型按照手动类型来考虑。

若图 2 中元件 12 进行预安排停电检修,E 类区域元件集合为 $\{1,2,\cdots,11,T1,T2,\cdots,T5\}$,F3 类区域元件集合为 $\{15,16,\cdots,21,25,26,\cdots,36,T1,T2,\cdots,T9,T12,\cdots,T18\}$,F5 类区域元件集合为 $\{23,24,T10,T11\}$,G2 类区域元件集合为 $\{12,13,14,22,T6\}$ 。

3 负荷点可靠性评估

3.1 各类负荷点供电恢复时间

3.1.1 故障停电

故障停电类负荷的供电恢复时间与故障后供电恢复策略相关。设 t_1 为自动隔离时间、 t_2 为自动切换时间、 t_3 为故障查找时间、 t_4 为手动隔离故障时间、 t_5 为手动切换时间、 t_6 为修复时间。本文供电恢复策略为①自动恢复 B、C1 和 C2 类区域供电,其中 B 类区域耗时为 t_1 ,C1 与 C2 类区域耗时为 t_2 ;②工作人员定位故障位置,耗时为 t_3 ;③手动隔离定位故障后的区域形成手动隔离区,继而恢复 C3、C5、C7、D1 和 D3 类区域供电,耗时为 t_4 ;④对于存在联络通道的 C4、C6 及 D2 区域,通过手动的方式恢复供电,耗时为 t_5 ;⑤对于不存在联络通道的 C8、D4

及 D5 类区域,经故障修复后恢复供电,耗时为 t_6 。

通过集中式馈线自动化的辅助定位故障功能^[2]缩短了故障查找时间。故障查找时间 t_3 的计算公式为

$$t_3 = t_7 \frac{d_g}{K} \quad (1)$$

式中: t_7 为人工查找故障所需时间; d_g 为形态为 g 的自动定位区内元件的数量; K 为整条馈线元件的数量。

3.1.2 预安排停电

类比于故障停电,在预安排停电检修情况下,供电恢复策略为①根据预安排停电检修的范围,确定预安排隔离区;②预安排隔离区隔离出来后,E类区域供电正常,F类区域暂时停电1次,F1类区域耗时为 t_1 与 t_2 之和,F2类区域耗时为 t_1 与 t_5 之和,F3类区域耗时为 t_4 与 t_2 之和,F4类区域耗时为 t_4 与 t_5 之和,F5类区域耗时为 t_1 与 t_8 (预安排停电时间)之和,F6类区域耗时为 t_4 与 t_8 之和;③预安排隔离区内 G1 类区域耗时为 t_1 与 t_8 之和,G2 类区域耗时为 t_4 与 t_8 之和。

3.2 容量约束

考虑到中压配电网的复杂性、获取基础数据的困难性以及网络参数的不确定性,准确的负荷数据获取难度较大。因此,为了兼顾计算的效率,本文以配变容量为参考来计及负荷对馈线转供的影响。

文献[10]给出了考虑预留一定容量裕度的最大配变容量:

$$S_{\max} = \frac{\sqrt{3}\alpha UI}{\delta\beta} \quad (2)$$

式中: S_{\max} 为馈线上允许挂接的最大配变容量; I 为馈线允许通过的最大电流; α 为馈线容量裕度,取值为 0.9; U 为线电压,取值为 10 kV; δ 为配变的最大负荷同时率,取值为 0.8; β 为配变负载率,取值为 0.6。

对于含有联络线的馈线,该联络线的可转供容量为

$$S_g = S_{\max} - S_p \quad (3)$$

式中: S_p 为联络线本身所挂接的配变容量总和; S_g 为联络线可提供给与其联络的其他馈线的容量极限。

3.3 转供判断

发生故障时,以故障点为参照点,存在两种联络线路,分别为上游联络线路和下游联络线路。如果下游联络线路可提供转供通道和转供容量,且无须经过故障节点,则馈线元件故障后一定能实现负荷

的转供,如 C2、C4、C6 及 D2 类区域负荷。如果下游联络线路可提供转供容量,但由于故障节点的存在阻断了联络通道,则无法实现负荷的转供,如 D4 类区域负荷。如果上游联络线路可提供转供通道和转供容量,则馈线元件故障后一定能实现负荷的转供,如 B、C1、C3、C5、C7、D1 和 D3 类区域负荷。

3.4 考虑预安排停电

通常情况下预安排停电是可预知的,因此,对于处于预安排隔离区内的用户必须停电;对于处于正常供电区的用户可通过隔离操作由原馈线供电;对于处于预安排恢复供电区的负荷,当满足转供通道和转供容量的要求时,可由相关联络线供电,否则必须停电。

3.5 可靠性指标计算

由于元件的故障率是固定参数,因此馈线自动化系统中负荷点的故障率也为常数。当配电网中某一区域元件 r ($r=1,2,\dots,R$) 故障后,致使该区域下游区域停电,用 L_r 表示受影响的负荷集合,则负荷 j 的故障率为

$$\lambda_j = \sum_{r=1}^R I_{j \in L_r} \lambda_r \quad (4)$$

$$I_{j \in L_r} = \begin{cases} 1, j \in L_r; \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中: λ_r 为元件 r 的故障率。

若馈线自动化不可用,当元件 r 故障时,负荷点 j 的期望停电时间 U'_{Gj} 为

$$U'_{Gj} = I_{j \in L_{rB}} T'_{Bj} + I_{j \in L_{rC}} T'_{Cj} + I_{j \in L_{rD}} T'_{Dj}; \quad (6)$$

$$T'_{Bj} = t_4 + t_7; \quad (7)$$

$$T'_{Cj} = t_4 + t_5 + t_7; \quad (8)$$

$$T'_{Dj} = t_6 \quad (9)$$

式中: L_{rB} 、 L_{rC} 、 L_{rD} 分别为 B 类、C 类、D 类停电负荷点集合, $I_{j \in L_{rB}}$ 、 $I_{j \in L_{rC}}$ 、 $I_{j \in L_{rD}}$ 与式(5)中 $I_{j \in L_r}$ 同理。

同理,当进行预安排停电检修时,负荷点 j 的期望停电时间 U'_{Yj} 为

$$U'_{Yj} = I_{j \in L_{rF}} (T'_{F4j} + T'_{F6j}) + I_{j \in L_{rG}} T'_{G2j}; \quad (10)$$

$$T'_{F4j} = t_4 + t_5; \quad (11)$$

$$T'_{F6j} = T'_{G2j} = t_4 + t_8 \quad (12)$$

若馈线自动化可用,当元件 r 故障时,假设二遥和三遥终端均能可靠工作,形成自动定位区 d 及自动隔离区 g 。 L_{rCi} ($i=1,2,\dots,8$) 对应于子类区域 Ci ($i=1,2,\dots,8$), 同理 L_{rDi} ($i=1,2,\dots,5$) 对应于子类区域 Di ($i=1,2,\dots,5$), 负荷点 j 的期望停电时间 U''_{Gj} 为

$$U''_{Gj} = I_{j \in L_{rB}} T''_{Bj} + \sum_{i=1}^8 I_{j \in L_{rCi}} T''_{Cij} + \sum_{i=1}^5 I_{j \in L_{rDi}} T''_{Dij} \quad (13)$$

$$T''_{Bj} = t_1 \circ \quad (14)$$

$$T''_{Cij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^2 t_k, i=1,2; \\ \sum_{k=1}^4 t_k, i=3,5,7; \\ \sum_{k=1}^5 t_k, i=4,6; \\ t_6, i=8. \end{cases} \quad (15)$$

$$T''_{Dij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^4 t_k, i=1,3; \\ \sum_{k=1}^5 t_k, i=2; \\ t_6, i=4,5. \end{cases} \quad (16)$$

同理,当进行预安排停电检修时,负荷点 j 的期望停电时间 U''_{Yj} 为

$$U''_{Yj} = I_{j \in L_{rF}} T''_{Fij} + I_{j \in L_{rG}} T''_{Gij} \circ \quad (17)$$

$$T''_{Fij} = \begin{cases} t_1 + t_2, i=1; \\ t_1 + t_5, i=2; \\ t_2 + t_4, i=3; \\ t_4 + t_5, i=4; \\ t_1 + t_8, i=5; \\ t_4 + t_8, i=6. \end{cases} \quad (18)$$

负荷点 j 的年停电时间 U_j 和平均停电时间 r_j 为

$$U_j = \sum_{r=1}^R \lambda_r [(1 - P_{\text{aut}})(U'_{Gj} + U'_{Yj}) + P_{\text{aut}}(U''_{Gj} + U''_{Yj})]; \quad (19)$$

$$r_j = T''_{Fij} = \frac{U_j}{\lambda_j} \circ \quad (20)$$

式中: P_{aut} 为馈线自动化系统的可用概率。

计及预安排停电的影响,在获得各负荷点的可靠性指标后,进而求得整个中压配电网的可靠性指标。中压配电网可靠性指标有系统平均停电频率 $SAIFI$ 、系统平均停电持续时间 $SAIDI$ 、用户平均停电持续时间 $CAIDI$ 、系统平均缺供电量 $AENS$ 和平均供电可靠率 SAI 计算式如下:

$$SAIFI = \sum_{j=1}^n \lambda_j N_j / \sum_{j=1}^n N_j; \quad (21)$$

$$SAIDI = \sum_{j=1}^n U_j N_j / \sum_{j=1}^n N_j; \quad (22)$$

$$CAIDI = SAIDI/SAIFI; \quad (23)$$

$$AENS = \sum_{j=1}^n U_j S_j \beta / \sum_{j=1}^n N_j; \quad (24)$$

$$SAI = 1 - \sum_{j=1}^n U_j N_j / (8760 \sum_{j=1}^n N_j) \circ \quad (25)$$

式中: S_j 为负荷点 j 的配变容量。

3.6 经济性分析

本文基于集中式馈线自动化的接线模式,以不同终端配置下的可靠性指标为边界,以无馈线自动化系统的可靠性指标为参照基准,通过可靠性提升的增售电量计算带来的经济效益。

配备集中式馈线自动化后 1 a 内平均增售电量 (AIS) 和经济收益 (EB) 如下所示:

$$AIS = (AENS_0 - AENS_1) \cdot \sum_{j=1}^n N_j; \quad (26)$$

$$EB = AIS \cdot AESP. \quad (27)$$

式中: $AENS_0$ 为无馈线自动化的系统平均缺供电量; $AENS_1$ 配备馈线自动化的系统平均缺供电量; $AESP$ 为平均售电价。

4 算例分析

现以某城区的一条馈线为例进行配电网供电可靠性评估,如图 3 所示。图 3 中馈线存在多个联络,其所挂接的配变总容量为 10.93 MVA,主干线长度为 4.51 km,分支线长度为 15.7 km,其中架空线截面为 240 mm²,电缆线截面为 300 mm²,B1 为出口断路器,B2 为分段开关,B3 为联络开关,S1、S2 为负荷开关,K1、K2 为开关站,H1 为环网柜,D1~D4 为电缆分支箱,其中开关站、环网柜和电缆分支箱均配备 10 kV 馈线柜,柜内均配备负荷开关。

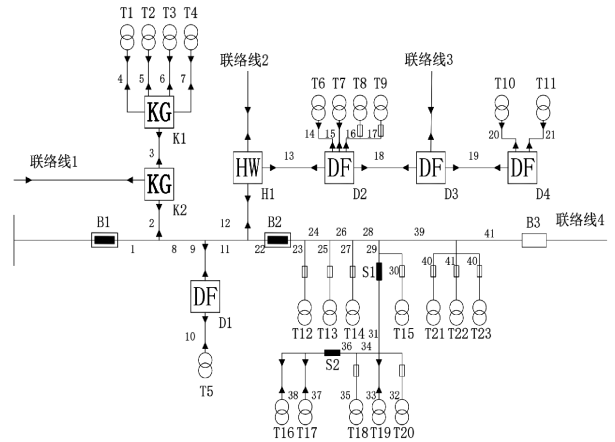


图 3 算例配网图

Figure 3 Distribution network of example

算例考虑预安排停电和负荷转供的影响,在不计遥控开关失效的情况下,分 4 种情况进行计算:①无馈线自动化系统;②含集中式馈线自动化系统,馈线中所有开关均配备三遥开关;③含集中式馈线自动化系统,馈线中所有开关均配备二遥开关;④含集中式馈线自动化系统,主干线上开关 B1、B2、B3 以及分支线上 K2、H1 中的进线开关配备三遥开关

外,其余配备二遥开关。

依据配电网各类元件的典型可靠性参数^[14]以及评估区域相关设备的历史运行数据,可得出配电网各类设备的故障率和修复时间,如表 5 所示。

通过当地供电调度部门可得配电网停电时间类数据,鉴于部分数据收集困难,此类数据可参考文献[14],如表 6 所示。采用本文方法对该算例进行供电可靠性评估,结果如表 7 所示。

表 5 设备停运参数

Table 5 Parameters for equipment outage

设备类型	故障率/(次·a ⁻¹)	故障修复时间/(h·a ⁻¹)
架空线	0.040 9	3.28
电缆	0.027 8	3.49
配变	0.003 8	3.52
断路器	0.003 7	2.27
负荷开关	0.006 5	2.58
熔断器	0.008 6	2.56

表 6 配电网停电时间类参数

Table 6 Parameters of power outage time

馈线自动化类型	故障定位 时间/h	故障隔离时间/h		开关切换时间/h		预安排停电时间/(h·次 ⁻¹)	
		故障停电	预安排停电	故障停电	预安排停电	架空	电缆
集中式自动化	—	0.15(0.50)	0.08(0.10)	0.10(0.20)	0.08(0.10)	4	5
无馈线自动化	0.27	1.00	0.10	0.50	0.10	6	7

注:括号内外分别表示配备二遥开关和三遥开关的停电时间类参数。

表 7 算例供电可靠性指标计算结果

Table 7 Calculate the calculation result of power supply reliability index

情况	可靠性指标	SAIFI/(次· (用户·a) ⁻¹)	SAIDI/(h· (用户·a) ⁻¹)	CAIDI/(h· (停电用户·a) ⁻¹)	ASAI/%	AENS/ ((kW·h)·a ⁻¹)	1 a 内增售电量/ (kW·h)	1 a 内经济 收益/元
1	故障引起	0.33	0.94	2.86	99.989 26	238.51	0	0
	预安排停电引起	0.46	1.60	3.48	99.981 76	344.87	0	0
	总可靠性指标	0.79	2.54	3.22	99.971 03	583.38	0	0
2	故障引起	0.33	0.29	0.90	99.996 64	120.88	2 940.75	1 764.45
	预安排停电引起	0.46	1.17	2.54	99.986 70	251.50	2 334.22	1 400.53
	总可靠性指标	0.79	1.46	1.85	99.983 34	372.38	5 274.97	3 164.98
3	故障引起	0.33	0.42	1.27	99.995 22	176.51	1 549.79	929.88
	预安排停电引起	0.46	1.17	2.55	99.986 62	253.34	2 288.31	1 372.99
	总可靠性指标	0.79	1.59	2.02	99.981 84	429.85	3 838.11	2 302.86
4	故障引起	0.33	0.36	1.11	99.995 84	149.97	2 213.47	1 328.08
	预安排停电引起	0.46	1.17	2.54	99.986 66	252.47	2 310.06	1 386.04
	总可靠性指标	0.79	1.53	1.95	99.982 50	402.44	4 523.53	2 714.12

由表 7 可知,集中式馈线自动化系统可显著提高配电网的供电可靠性。对于由故障引起的停电,通过故障的自动隔离,可迅速实现 B 类及 C1 类区域负荷的供电;通过联络开关的自动切换,可快速实现 B 类及 C2 类区域负荷的供电。对于由预安排检修引起的停电,通过自动隔离停电区域,可迅速实现 F1 及 F2 类区域负荷的供电。当计及馈线自动化系统不同终端配置方案后,可明显看出不同的配置方案对可靠性效益的显著影响。全线布置三遥开关可以最大程度发挥馈线自动化的作用,经济收益最好,但一次投资较大。全线布置二遥开关虽无法最大程度发挥馈线自动化的作用,经济收益也有待提高,但是一次投资较小。对馈线联络节点和大分支节点处配备三遥开关,其余节点配备二遥开关,既提高了供电可靠性,也取得了较好的经济效益。因此在进行

配电网规划设计时,可通过不同馈线终端配置方案下的成效分析,择优选取配电终端的布置方案。

5 结论

(1)本文研究了集中式馈线自动化模式对配电网供电可靠性的影响,基于集中式馈线自动化的工作原理、终端配置及动作逻辑,探讨了各类负荷点供电恢复时间,推导出了不同馈线自动化模式下负荷点的可靠性指标。本文所提模型更贴近配电网的实际运行情况。

(2)本文在故障停电的基础上又引入了预安排停电,完善了停电模型,通过引入计及容量约束的负荷转供,进一步加强了可靠性评估的准确性。本文所提的系统评估指标弥补了传统配电网可靠性评估模型不计及预安排停电事件的影响以及系统可靠性

评估结果与实际统计结果相差过大的不足。

(3) 本文所述的配电网可靠性评估模型兼具计算的准确性和实用性,既考虑了配电网不同网架下实际的运行工况,又计及了影响可靠性评估的多种因素。依据本文所提模型量化配电网可靠性指标,可以对配电网建设改造工作提供技术支持。

参考文献:

[1] MENG Q H, WANG T Z. Effects of distribution automation on distribution system reliability [C] // 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific. Piscataway: IEEE, 2014: 1-4.

[2] 商海涛, 吴林, 赵渊, 等. 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): 129-135, 141.

SHANG H T, WU L, ZHAO Y, et al. Reliability evaluation model of distribution network incorporating centralized feeder automation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 129-135, 141.

[3] 赵渊, 吴林, 刘庆尧, 等. 含重合器式馈线自动化的配电网可靠性评估[J]. 重庆大学学报, 2018, 41(5): 1-14.

ZHAO Y, WU L, LIU Q Y, et al. Reliability evaluation of distribution system with recloser feeder automation[J]. Journal of Chongqing University, 2018, 41(5): 1-14.

[4] 向真, 杜亚松, 邢恩靖, 等. 配网自动化建设对供电可靠性影响[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(10): 20-24.

XIANG Z, DU Y S, XING E J, et al. Influence of distribution automation construction on the power supply reliability[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(10): 20-24.

[5] 陈彬, 张功林, 黄建业. 配电自动化系统实用技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.

CHEN B, ZHANG G L, HUANG J Y. Practical technology of distribution automation system [M]. Beijing: China Machine Press, 2015.

[6] 李闫远, 刘会家, 肖隆恩, 等. 基于自动区域故障模式与后果分析法的配电网可靠性评估[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2015, 37(2): 55-58.

LI Y Y, LIU H J, XIAO L E, et al. Reliability evaluation of distribution system based on automatic area failure mode and effects analysis method [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2015, 37(2): 55-58.

[7] 王主丁, 韦婷婷, 万凌云, 等. 计及多类开关和容量约束的中压配电网可靠性估算解析模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 146-155.

WANG Z D, WEI T T, WAN L Y, et al. Analytical

reliability estimation model of medium voltage distribution networks considering different types of switches and capacity constraints [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17): 146-155.

[8] 杨建林, 陈龙, 郭明星, 等. 考虑预安排停电的配电网可靠性评估方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1248-1255.

YANG J L, CHEN L, GUO M X, et al. Reliability evaluation method of distribution network in consideration of prearranged power cut [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1248-1255.

[9] 王浩浩, 管霖, 吴漫红. 配电网可靠性评估中预安排停电的实用数学模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 59-63, 81.

WANG H H, GUAN L, WU M H. Mathematical model of scheduled outage in reliability assessment of distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 59-63, 81.

[10] 邱生敏, 王浩浩, 管霖. 考虑复杂转供和预安排停电的配电网可靠性评估[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 121-126.

QIU S M, WANG H H, GUAN L. An improved algorithm for reliability assessment of distribution network considering complex load transfer and scheduled outage [J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 121-126.

[11] 郝玉东, 包宇喆, 杨淑霞, 等. 配电网故障快速定位及图形显示软件系统的设计[J]. 郑州大学学报(工学版), 2012, 33(3): 52-55.

HAO Y D, BAO Y Z, YANG S X, et al. Design of rapid automatic fault location and graphics display software system of lines in distribution network [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2012, 33(3): 52-55.

[12] BAXEVANOS I S, LABRIDIS D P. Implementing multiagent systems technology for power distribution network control and protection management [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 433-443.

[13] 李冠斌. 基于馈线自动化信息的配电网故障区段定位方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.

LI G B. Research on faulted section location method for distribution network based on feeder automation information [D]. Jinan: Shandong University, 2021.

[14] 王主丁. 高中压配电网规划: 实用模型、方法、软件和应用(下册) [M]. 北京: 科学出版社, 2020.

WANG Z D. High and medium voltage distribution network planning: practical models, methods, software and applications (volume II) [M]. Beijing: Science Press, 2020.

Evaluation of Power Supply Reliability of Centralized Feeder Automation Distribution Network

CHEN Genyong¹, GAO Xiangyu¹, TAN Chao², FAN Xuguang³

(1. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Xinxiang Power Supply Company of State Grid Henan Electric Power Company, Xinxiang 453000, China; 3. Baofeng Power Supply Company of State Grid Henan Electric Power Company, Pingdingshan 467400, China)

Abstract: There were still some research gaps in reliability evaluation of distribution network considering centralized feeder automation, and most studies only focused on the impact of power failure. Considering the pre-arranged maintenance and capacity constraints, the influence of load transfer, and combined with the type and operation logic of feeder automation, according to the related technical indexes of feeder automation, the load nodes appearing in the process of power restoration were classified in detail. And the calculation formulas of expected power restoration time and power supply reliability indexes of different types of loads were derived. Combined with an example, the average outage duration *SAIDI* of feeder system was reduced by 0.95–1.08 h/(user·a) with different terminal configurations in the example, which showed that optimized the terminal configuration could effectively improve the power supply reliability of distribution network, which proved the accuracy and practicability of the evaluation method in this study. The influences of different terminal configurations on reliability were compared.

Keywords: centralized feeder automation; distribution network; power supply reliability; pre-arranged maintenance; load transfer

(上接第 77 页)

Video Frame Prediction Model Based on Gated Spatio-Temporal Attention

LI Weijun^{1, 2}, ZHANG Xinyong¹, GAO Yuxiao¹, GU Jianlai¹, LIU Jintong¹

(1. School of Computer Science and Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021, China; 2. The Key Laboratory of Images and Graphics Intelligent Processing of State Ethnic Affairs Commission, North Minzu University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: A video frame prediction model based on gated spatio-temporal attention was proposed to address the issues of low accuracy, slow training, complex structure, and error accumulation in recurrent video frame prediction architectures. Firstly, high-level semantic information of the video frame sequence was extracted by a spatial encoder while preserving background features. Secondly, a gated spatio-temporal attention mechanism was established, utilizing multi-scale deep bar convolutions and channel attention to learn both intra-frame and inter-frame spatio-temporal features. A gate fusion mechanism was employed to balance the feature learning capability of spatio-temporal attention. Finally, a spatial decoder reconstructed the high-level features into predicted realistic images and complements background semantics to enhance the details. Experimental results on the Moving MNIST, Taxi-BJ, WeatherBench, and KITTI datasets showed that compared to the multi-input multi-output model SimVP, the mean squared error (*MSE*) was reduced by 14.7%, 6.7%, 10.5%, and 18.5%, respectively. In ablation and expansion experiments, the proposed model achieved good overall performance, demonstrating advantages such as high prediction accuracy, low computational complexity, and efficient inference.

Keywords: video frame prediction; convolutional neural network; attention mechanism; gated convolution; codec network