

DOI: 10.7667/PSPC161160

计及信息系统故障的配电网可靠性分析

欧林¹, 赵晓龙², 段祥骏², 宋祺鹏², 寇凌峰²

(1. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 在传统的配电系统和信息系统可靠性分析中, 通常仅考虑其各自的可靠性, 很少计及两者之间的相互影响。为了在配电网可靠性分析中计及信息系统的影响, 研究了信息系统与配电系统的关系。着重分析了信息系统发生故障对变压器、断路器和备用电源工作情况的影响。在此基础上采用序贯蒙特卡洛法进行仿真, 并在仿真过程中对这3种元件的处理方式进行修改。同时计及配电系统和信息系统故障对配电网可靠性的影响, 得出了计及信息系统故障的配电网可靠性分析方法。最后通过对 IEEE-RBTS Bus6 改进系统的仿真分析, 得出了配电网可靠性的一部分影响因素, 据此可得出提高配电网可靠性的措施。

关键词: 配电网; 信息系统; 元件; 可靠性; 蒙特卡洛; 影响因素

Reliability analysis of distribution network considering the fault of information system

OU Lin¹, ZHAO Xiaolong², DUAN Xiangjun², SONG Qipeng², KOU Lingfeng²

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 401123, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: In traditional reliability analysis of distribution system and information system, their own characteristics are usually considered, but the mutual influence between them is always ignored. To evaluate the reliability of the distribution network considering the influence of the information system, this paper studies the relationship between the information system and the distribution system. And the influence of the information system malfunction to the working condition of the transformer, circuit breaker and standby power are analyzed emphatically. The sequential Monte Carlo method is used to simulate, and the process modes of the three kinds of components are modified. The influence of the power distribution system and the information system faults on the reliability of the distribution network is considered at the same time. A new reliability evaluation of the distribution network is proposed. Finally, the IEEE-RBTS Bus 6 system is taken as an example, and some influence factors of the distribution network reliability are obtained. According to the various influencing factors, some measures are put forward to enhance the reliability of the distribution network.

This work is supported by Science and Technology Foundation of Chongqing (Research of Unified Data Acquisition and Centralized Monitoring Host Station for Distribution Network).

Key words: distribution network; information system; element; reliability; Monte Carlo; influence factor

0 引言

随着国民经济和科学技术的快速发展, 人们的生活水平日渐提高, 电能需求和供电质量要求也随之增长。配电网作为输配电系统的最后一个环节, 直接与用户相连接, 与供电质量有着直接的关系, 随着智能化电网的快速发展, 为保证配电网运行的

可靠性, 必须考虑信息通信技术(Information and Communication Technologies, ICT)的加入, 这将成为可靠性分析必不可少的考虑因素^[1-3]。

信息通信技术是信息技术与通信技术的融合, 近年来, 它在电网调度、保护、控制等系统中迅速发展, 对保证电力系统运行的可靠性和经济性起着重要作用, 随着 ICT 的逐渐深入, 其与电力系统的联系愈加紧密, 忽略信息系统故障对电网的影响, 可能导致严重的后果。信息系统故障可能导致输电网络故障, 从而引发大停电事故。例如 2006 年西欧电

基金项目: 重庆市重点科技项目“配电网统一数据采集与集中监控主站系统研究”

网 11.4 大停电事故的主要原因是没有完善的沟通、协调机制, 导致发生潮流的大规模转移使事故范围扩大^[4]; 2011 年国外也发生了多起大面积停电事故, 其中不乏有监控盲区的影响^[5]。另外, 信息系统故障对配电网的可靠运行也有一定影响, 例如信息的误发和丢失, 造成故障判断失误, 可能导致变电站的错误动作^[6], 尤其对于无人值班变电站而言, 信息系统故障对于配电网可靠性的影响越发明显^[7]。因此, 在考虑配电网可靠性时, 必须要计及信息系统的影响。

目前, 考虑信息系统影响下的配电网可靠性分析还并不完善, 大部分专家学者在进行可靠性分析时只考虑了两者之间的部分联系, 并未计及所有关系。文献[8]分析了配电自动化的终端设备, 提出了一种基于 HMAC 算法的通信安全策略。文献[9]针对现有的电力通信路由算法, 改进了最大不相交双路由算法, 在可靠性分析中考虑了节点与链路的可靠性。文献[10]中给出了断路器和变压器在信息系统中的可靠性模型, 并采用非序贯蒙特卡洛法进行仿真分析, 提出了信息系统对电力系统可靠性的影响; 文献[11-12]分别通过状态表法分析了信息系统与电力系统的直接作用和间接作用对可靠性分析的影响, 但仅考虑了其中一种关系而忽略了另一种。文献[13]基于直流潮流模型建立了较为符合电力系统运行实际的电力网络和通信网络交互作用模型, 通过调节相关参数研究了电力通信网络不同的路由策略对于电力系统连锁故障大停电的影响, 并结合复杂网络的理论讨论了复杂网络之间的内在相似性。文献[14]从信息网中边的角度出发, 基于直流潮流模型, 建立了信息网对电力网连锁故障影响的模型, 研究了通信光缆遭受随机故障对电力网连锁故障的影响。

本文将综合考虑信息系统与配电系统的直接作用和间接作用, 定量评估计及信息系统故障情况下的配电网可靠性。综合考虑配电系统和信息系统中主要元件的可靠性模型, 通过序贯蒙特卡洛法进行可靠性分析, 并得出可靠性的部分影响因素, 寻求提高可靠性的有效措施。

1 信息系统与配电系统的相互依存关系

电力系统是世界上最复杂的系统之一, 一般可分为发电系统、输电系统和配电系统三部分^[15], 本文主要考虑配电网部分。信息系统是配电系统的辅助部分, 负责监测、保护和控制配电系统。没有了信息系统, 配电系统无法做到可靠运行, 因此, 两

者之间存在相关性。这种相关性可以用相互依存关系来表示, 相互依存关系通常是指一个元件的正确运行取决于其他一些元件的存在及其带来的影响。根据信息系统的性质和故障位置的不同, 配电系统和信息系统的相互依存关系可分为以下四类。

1.1 元件与元件的直接相关(Direct Element-element Interdependency, DEEI)

DEEI 是最简单的相互依存关系, 这种关系表示一个系统中的某一个元件故障将会导致另一个系统中的元件故障或工作异常。信息系统和配电系统的连接点通常就属于这种直接关系。例如, 信息系统中的控制器故障将直接导致配电系统中与之相连的断路器发生故障。

1.2 网络与元件的直接相关(Direct Network-element Interdependency, DNEI)

DNEI 表示一个系统的性能将会导致另一系统中的元件故障或工作异常。在分析配电系统可靠性的时候, 要计及这类故障的影响, 就必须充分考虑信息系统的工作情况, 并找出信息系统通信网络故障对配电系统的影响。例如, 信息系统中的主机和控制器之间的通信线路故障可能会导致配电系统中断路器接收到错误的控制信息或信息接收延迟。

1.3 元件与元件的间接相关(Indirect Element-element Interdependency, IEEI)

IEEI是指一个系统中的某一元件故障不会直接导致另一系统中的元件故障或工作异常, 但是可能会影响元件的工作情况使其可能发生故障。这种关系可能使元件故障率提高, 或延迟对故障的响应。例如, 信息系统会通过配电系统的各项指标监测配电系统的运行情况, 当配电系统中某一元件发生故障时, 信息系统会发出警报。

1.4 网络与元件的间接相关(Indirect Network-element Interdependency, INEI)

INEI是指一个系统的性能不会直接导致另一系统中的元件故障或工作异常, 但是会影响元件的工作情况使其可能发生故障。例如, 配电系统中的距离保护、纵联保护和断路器失灵保护等, 其保护装置之间均采用点对点通信, 通信系统中任何故障都可能导致保护装置的误动或拒动。

2 计及信息系统故障的配电网元件模型

配电网常见元件包括变压器、断路器和备用电源等^[16], 本文对原有的元件可靠性仿真分析进行修改, 引入信息系统故障的影响。

2.1 配电系统元件模型

配电系统元件一般可采用两状态模型描述，即正常状态和故障状态，能够引起配电系统元件故障的主要因素包括：

- 1) 元件不正常运行，引起继电保护装置动作，例如短路故障等，其故障率记为 λ_1 ；
 - 2) 元件本身故障，例如制造缺陷、部分老化、绝缘破坏等，其故障率记为 λ_2 ；
 - 3) 外界环境导致配电系统元件故障，例如雷击、洪水、地震、雨雪、山林火灾、风害、兽害、树害、鸟害等，其故障率记为 λ_3 ；
 - 4) 人为误操作或保护误动作，其故障率记为 λ_4 。
- 元件的整体故障率可如式(1)计算。

$$\lambda_i = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 \quad (1)$$

式中， i 为元件编号。

2.2 信息系统模型

信息系统传输的信息包括电力线路的切除信息和调度中心优化调度时产生的调整发电机出力和切除负荷的信息。信息传输的过程大致可以表示为：配电系统出现故障时，信息采集系统采集到相应故障信息，产生线路切除的信息，调度中心接收到线路切除信息后对电力网络进行优化调度，同时将调整发电机出力和切除负荷的信息送往各目标节点。

信息系统可分为接口层、通信网络层、信息业务层和应用层。其中接口层包括电流互感器、电压互感器、断路器和远程终端单元等，主要负责采集电力系统的信息并转化成相应信号上传，执行上级下发的控制命令；通信网络层负责传递各类信息，可以采用不同的网络结构，每种结构都存在其各自的特点；信息业务层是通信网络层与应用层之间的接口，可以实现不同业务类型数据的接入；应用层负责处理状态测量数据和下发指令，并且可以与工作人员进行沟通，实现电网状态可视化等功能。整个信息系统的模型较为复杂，为简化计算，本文进行可靠性分析时主要考虑通信层故障以及接口层故障。

信息系统的可靠性可分为基本可靠性和任务可靠性。基本可靠性是仅考虑物理上的线路或节点故障时，通信系统能保持各节点间正常通信的概率；任务可靠性是指具备一定任务的通信系统在工作过程中完成预定任务的能力。为贴合实际情况，本文中考虑任务可靠性。

在计算通信系统的故障时，一般可采用最小路径法。通信系统的路径为发信节点经过一定的链路到达收信节点所经过的一条路径，每条路径都是节

点与链路的组合，一条路径的可靠性就是该路径中所包含的节点与链路的可靠性。在本文的分析过程中，将信息系统的元件例如控制器、主机和通信线路等分别看作节点和链路，并根据各元件的连接情况以及各元件的可靠性，计算该条路径的可靠性。

在一条路径中，假设共存在 n 个节点和 m 条链路，则这条路径的可靠性可通过式(2)计算。

$$R_p = \prod_{i=1}^n R_{Ni} \prod_{j=1}^m R_{Lj} \quad (2)$$

式中： R_p 为路径的可靠性； R_{Ni} 为节点 i 的可靠性； R_{Lj} 为链路 j 的可靠性； n 为节点数； m 为链路数。

对于发信节点和收信节点而言，通信的路径往往不止一条，只有两者之间的全部路径均失效，才可认为两点之间的通信功能故障，即节点 p 和节点 q 之间的通信可靠性可通过式(3)计算。

$$R_{pq} = 1 - \prod_{i=1}^x (1 - R_{pi}) \quad (3)$$

式中： R_{pq} 为节点 p 和节点 q 之间的通信可靠性； x 为两节点间路径的数量； R_{pi} 为路径 i 的可靠性。

信息系统属于可维修的系统，其中的元件类似于配电系统中的可修复元件，因此，在进行可靠性仿真时可采取相同的方法进行抽样分析。

2.3 信息系统对配电系统的影响

配电网中的基本元件包括变压器、断路器和备用电源等，在进行可靠性分析时，一方面要考虑配电系统自身元件故障引发的停电故障，另一方面也要考虑信息系统故障引起的停电故障。

根据配电系统与信息系统的工作情况，可将配电网的工作状态分为四种：配电系统故障信息系统正常、配电系统正常信息系统故障、两系统均故障和两系统均正常。其中，信息系统与配电系统的关系按照故障元件与故障位置结合第一节中所述情况判断。

当配电系统故障信息系统正常时，数据采集装置可采集到各元件的电压电流数据，通过通信系统上传到信息处理系统，由信息处理系统判断故障地点和故障原因，并根据实际情况进行倒负荷、切负荷等操作或派遣工作人员进行修复。

当配电系统正常信息系统故障时：若为 DEEI 或 DNEI 情况，则通信系统的故障将直接导致配电系统相关位置故障，应先对信息系统进行修复，再根据信息系统的情况对配电系统采取相应措施；若为 IEEI 或 INEI 情况，则信息系统的故障不会直接对配电系统产生影响，但若在信息系统故障期间，配电系统发生故障，由于此时故障信息不能及时传送或处理，可能造成故障范围扩大等情况，此时转

变为两者均故障情况。

当两系统均故障时, 由于通信系统修复较快, 因此应先修复通信系统, 再根据信息系统所得信息及时对配电系统采取相应措施。

当两系统均正常时, 配电系统正常供电, 通信系统实时采集信息并上传给调度中心, 对网络进行监管。

信息系统对配电网的具体影响主要体现在变压器、断路器和备用电源上。

2.3.1 信息系统对变压器的影响

在配电网的运行中, 电压会出现波动, 为保证电压不越限, 可采取调节有载调压变压器分接头位置的办法, 该调整过程需要信息系统的配合。当电压互感器检测到某一位置的电压存在越限情况时, 若能够判断为无功分布不合理而非无功不足, 则调度中心会下发变压器分接头调整的控制指令, 经过通信系统的传输, 由收信装置接收信号, 变压器会根据所接收到的控制信息对变压器的分接头进行相应调整, 其具体流程如图 1 所示。

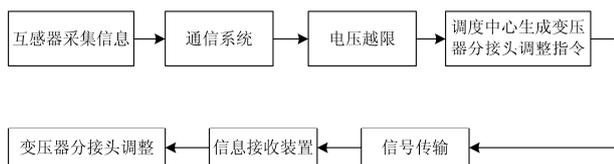


图 1 变压器的分接头控制过程

Fig. 1 Control process of transformer tap

在进行仿真分析时, 若信息系统工作正常, 则变压器分接头能够正常进行调整, 若信息系统工作异常, 例如控制信号传输错误或由于网络拥堵导致控制信息延迟等, 都将导致变压器分接头不能进行正常调整, 引起电能质量异常。

2.3.2 信息系统对断路器的影响

断路器是配电系统中必不可少的元件, 可人为控制或由保护装置自动控制动作, 同时还具备重合闸功能, 这几种功能的正常实现均需要信息系统的协助。具体过程为调度系统或保护系统发出控制指令, 经由通信系统传输到达断路器的信息接收装置, 断路器再根据控制指令控制其开断或重合闸。其过程如图 2 所示。

2.3.3 信息系统对备用电源的影响

由于负荷的特点不同, 可分为重要负荷和一般负荷, 在配电网发生故障时, 一般负荷允许停电, 而重要负荷原则上应保证其供电。因此, 为保证重

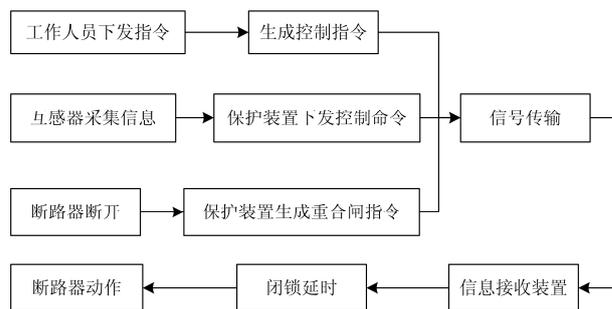


图 2 断路器动作过程

Fig. 2 Action process of circuit breaker

要负荷的可靠供电, 需要设置备用电源。当配电系统发生故障时, 由备用电源为重要负荷供电, 当然在配置备用电源时, 要充分考虑可靠性和经济性的关系。

当配电系统发生故障时, 电压互感器和电流互感器等会采集相应信息并上传, 由调度系统判断备用电源需发电量, 并通过通信系统将指令下发到各备用电源, 备用电源根据接收到的指令进行发电, 供给重要负荷, 其过程如图 3 所示。其中任一环节发生问题, 都将导致备用电源不参与调度, 这种情况会导致重要负荷停电。

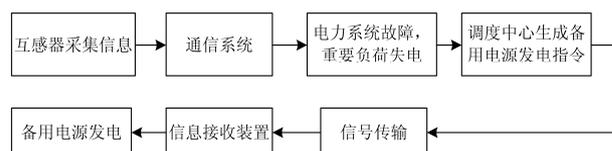


图 3 备用电源供电过程

Fig. 3 Supply process of standby power

备用电源工作时应满足相应的等式约束和不等式约束(等式约束为潮流约束, 即式(4)和式(5), 不等式约束为备用电源出力约束, 即式(6)和式(7))以及节点电压约束和变压器变比约束, 即式(8)和式(9)。当不满足条件时, 应根据重要程度适当削减负荷。

潮流约束

$$P_{Gi} - P_{Di} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (4)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (5)$$

备用电源出力约束

$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max} \quad (6)$$

$$Q_{Gi \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \max} \quad (7)$$

节点电压约束

$$U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max} \quad (8)$$

变压器变比约束

$$K_{i \min} \leq K_i \leq K_{i \max} \quad (9)$$

式中： P_{Gi} 和 Q_{Gi} 为备用发电机组发出的有功、无功功率； P_{Di} 和 Q_{Di} 为切除负荷的有功、无功功率； U_i 为各节点电压； $P_{Gi\max}$ 和 $P_{Gi\min}$ 为备用发电机组有功功率上下限； $Q_{Gi\max}$ 和 $Q_{Gi\min}$ 为备用发电机组无功功率上下限； $U_{i\max}$ 和 $U_{i\min}$ 为节点电压上下限； $K_{i\max}$ 和 $K_{i\min}$ 为变压器有载调压上下限。

3 基于序贯蒙特卡洛法的可靠性分析

蒙特卡洛法是国外一种比较成熟的算法，属于统计实验类方法，比较直观，计算量几乎不受规模和复杂程度的影响，易于理解和掌握，可以用于分析结构复杂、规模巨大的配电网的可靠水平。本文采取序贯蒙特卡洛法进行可靠性分析。序贯蒙特卡洛法保留了系统的时序特性，一般是根据元件在一年中的工作、故障情况，以小时为单位，每次检测系统中一个小时的工作状态(完好或故障)。这种方法较为接近系统的真实情况，可以得出系统停电时间及停电电量等数值，常用于结合经济性进行分析。但是，该方法的每次抽样需按时间顺序进行，因此仿真过程略显复杂。

3.1 可靠性指标

用于衡量配电系统可靠性的指标有许多，本文采用系统平均停电频率 SAIFI 和系统期望缺供电量 EENS，另外，为衡量信息系统故障对可靠性的影响，引入仅由信息系统故障引起的负荷缺供电量 EENS_c 指标。各指标定义如下所述。

$$SAIFI = \sum_i \lambda_i N_i / \sum_i N_i \quad (10)$$

式中： N_i 为负荷点 i 处所连接的用户数目； λ_i 为负荷点 i 的平均故障率。

$$EENS = \sum_i T_i L_i \quad (11)$$

式中： T_i 为负荷点的年停运时间平均值； L_i 为负荷点 i 的平均负荷值。

$$EENS_c = \sum_i T_{ci} L_i \quad (12)$$

式中， T_{ci} 为负荷点 i 由信息系统故障引发的停电时间平均值。

3.2 可靠性评估步骤

使用蒙特卡洛法进行分析时，需先找到故障元件影响的所有负荷点，形成数据表，然后对该系统中所有元件的状态进行抽样，根据准则和抽样所得的参数判断是否为故障状态，进而计算可靠性指标。其具体流程如图 4 所示。

1) 初始化数据：初始化系统仿真时间并确定仿真时限。

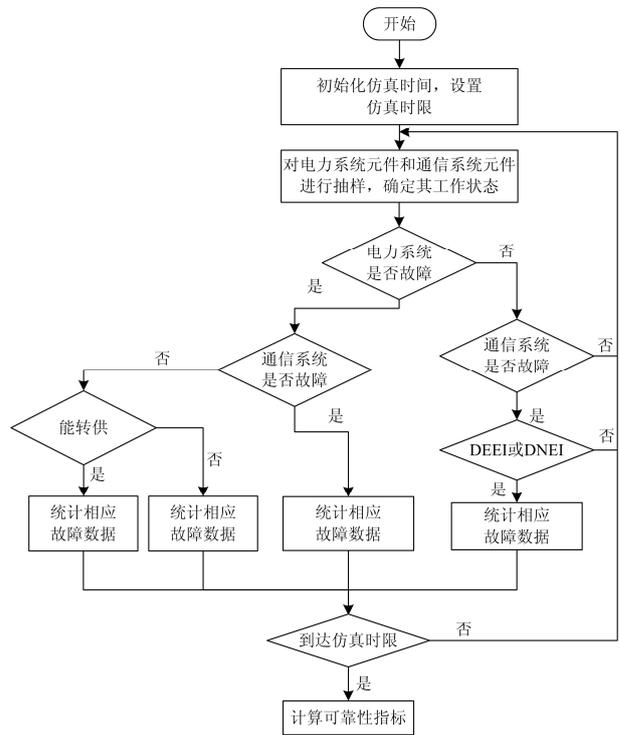


图 4 流程图

Fig. 4 Flow chart

2) 读入配电网的各个数据，确定系统拓扑结构。

3) 分别对配电系统元件和通信系统元件进行抽样，利用式(13)和式(14)得到各元件的正常工作时间和故障时间，判断配电系统及信息系统是否故障及故障类型。

$$t_{TTF} = -1 / [\lambda \ln(n)] \quad (13)$$

$$t_{TTR} = -1 / [\mu \ln(n)] \quad (14)$$

4) 根据配电系统和信息系统是否故障分成四种情况，配电系统故障信息系统正常(转第 5)步)、配电系统正常信息系统故障(转第 6)步)、两系统均故障(转第 7)步)和两系统均正常(转第 8)步)。

5) 对于能通过转供恢复负荷供电的情况，停电时间为转供所需要的时间；对于不能通过转供恢复供电的情况，停电时间应为该次故障的持续时间。

6) 若在此情况下信息系统的故障未导致配电系统元件误动作(IEEI 或 INEI)，则所有负荷不停电，转第 8)步；若在此情况下信息系统的故障会直接导致配电系统元件误动作(DEEI 或 DNEI)，则相应负荷停电，其停电时间为信息系统的修复时间。

7) 配电系统与信息系统均故障属较严重情况，由于信息系统元件一般修复较快，应首先修复信息系统，再根据信息系统所得信息对配电系统进行修复，则其故障时间一般为通信系统的修复时间与配

电系统的修复时间之和。

8) 判断当前时间是否超过系统给定时间限制, 若未超过限制, 则返回第 4)步; 否则, 进行下一步。

9) 根据各负荷点的停电时间和停电次数等数据计算负荷点可靠性指标。

10) 根据各负荷点可靠性指标计算系统可靠性指标。

4 算例与分析

4.1 仿真系统及参数

本文在 Matlab 上编程实现了基于序贯蒙特卡洛法的计及信息系统故障的配电网可靠性分析, 并对图 5 所示的测试系统进行了可靠性评估。本文中假设配电网的电力来源充足, 即主网的电力充足。

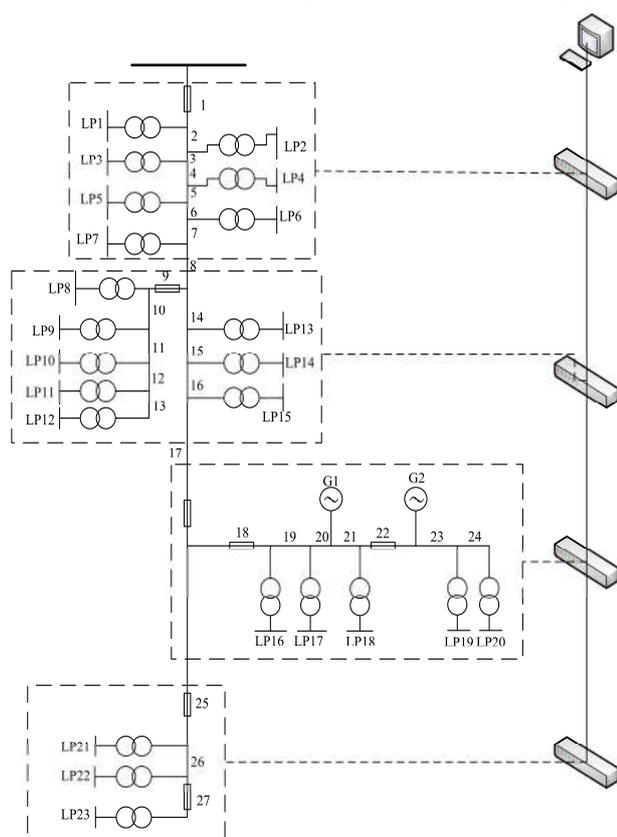


图 5 信息系统及配电系统结构图

Fig. 5 Information system and distribution system structure

负荷分为重要负荷和一般负荷, 其中重要负荷为负荷 16 到负荷 20, 为保证其供电可靠性, 在该分支上设置两台柴油发电机组作为备用电源。由于信息系统中存在多个交换机, 信息系统可采用不同的结构, 常见结构有总线型结构、星型结构和环型结构。其中, 配电系统元件的参数见表 1, 信息系统元件的参数见表 2。

表 1 配电系统元件参数

元件	故障率	平均修复时间/h
线路	0.05 次/(km·年)	4
变压器	0.015 次/(台·年)	200
断路器	0.006 次/(台·年)	4

表 2 信息系统元件参数

元件	MTTF/h	MTTR/h
主机	125 000	48
交换机	438 000	48
通信线路	11 750 000	48
控制器	168 000	48

4.2 算例及结果分析

为分析通信系统对配电网可靠性的影响, 本文首先讨论以下两种情况。

情况 1: 不考虑通信系统故障, 只计及配电系统元件的故障;

情况 2: 通信系统采用总线结构, 同时计及通信系统和配电系统故障。

对上述两种情况进行配电网可靠性分析, 结果如表 3 所示。

表 3 可靠性仿真结果

情况	通信系统结构	SAIFI/(次/年)	EENS/(MWh/年)	EENS _c /(MWh/年)
情况 1	不计及	1.3255	32.7990	—
情况 2	总线结构	1.6249	49.4427	16.6437

通过分析情况 1 和情况 2 发现, 考虑信息系统故障后配电系统的可靠性指标 SAIFI 增加了 20%左右, 而信息系统故障引起的用户缺供电量达到了不计信息系统情况下 EENS 的 50%左右。这证明了信息系统对配电网可靠性影响很大, 因此在对配电网进行可靠性分析时, 必须计及信息系统故障, 否则将会导致结果较大程度地偏离实际值。

4.3 可靠性影响因素分析

4.3.1 通信网络结构及元件故障率对可靠性的影响

假设通信网络结构为环型结构和星型结构, 并改变信息系统元件故障率, 再次计算配电网的可靠性。

情况 3: 通信系统采用环型结构, 同时计及通信系统和配电系统故障;

情况 4: 通信系统采用星型结构, 同时计及通信系统和配电系统故障;

情况 5: 通信系统采用总线结构, 主机的 MTTF 增加 30%;

情况 6: 通信系统采用总线结构, 交换机的 MTTF 增加 30%;

情况 7: 通信系统采用总线结构, 控制器的 MTTF 增加 30%;

情况 8: 通信系统采用总线结构, 通信线路的 MTTF 增加 30%;

对上述几种情况进行配电网可靠性分析, 结果如表 4 所示。

表 4 通信系统结构变化后的可靠性仿真结果

Table 4 Results of the reliability simulation with different

communication system structures				
情况	通信系 统结构	SAIFI/ (次/年)	EENS/ (MWh/年)	EENS _d / (MWh/年)
情况 3	环型结构	1.4392	46.5832	13.7842
情况 4	星型结构	1.9428	54.6707	21.8717
情况 5	总线结构	1.6199	49.3618	16.5628
情况 6	总线结构	1.6157	49.3592	16.5602
情况 7	总线结构	1.5106	48.0536	15.2546
情况 8	总线结构	1.6218	49.4338	16.6348

通过情况 2、情况 3 和情况 4 的对比发现, 相较于总线型结构, 通信系统改为环型结构时, 配电网的可靠性有所提高, 而通信系统改为总线型结构时, 配电网可靠性反而降低了, 因此在进行配电网设计时应仔细选择通信系统的结构, 采取适当的结构可以提高可靠性水平, 采取不当的结构反而会使可靠性降低。

通过情况 2 与情况 5 到情况 8 的对比发现, 主机、交换机、通信线路的故障率改变对配电网可靠性的影响非常小, 而控制器的故障率对配电网可靠性的影响十分明显, 因此, 欲提高配电网可靠性时, 应主要关注控制器的故障率。

4.3.2 备用电源容量对可靠性的影响

本文中备用电源选取的是柴油发电机组, 当柴油发电机组的额定容量不同时, 配电网的可靠性也会有所变化。

情况 9: 每台柴油发电机组额定容量为 0.25 MW;

情况 10: 每台柴油发电机组额定容量为 0.5 MW;

情况 11: 每台柴油发电机组额定容量为 0.75 MW。

对上述 3 种情况进行配电网可靠性分析, 结果如表 5 所示。

由情况 9、情况 10 和情况 11 分析可知, 当备用电源容量增大时, 配电网可靠性有所提高, 但是考虑到实际情况和经济性问题, 备用电源容量不可能无限增大, 因此需要结合经济性选择合适的备用电源容量。

表 5 不同备用容量下的可靠性仿真结果

Table 5 Results of the reliability simulation with different spare capacity

情况	柴油发电机组额定 容量/MW	SAIFI/ (次/年)	EENS/ (MWh/年)
情况 9	0.25	1.4729	35.0628
情况 10	0.5	1.3255	32.7990
情况 11	0.75	1.2956	30.4922

5 结论

本文采用蒙特卡洛法对配电网可靠性进行了分析, 并得出以下结论。

1) 在可靠性分析中忽略信息系统故障会导致较大的误差, 因此, 在对配电网进行可靠性分析时必须计及信息系统的影响。

2) 通信系统采用不同结构时, 配电网的可靠性结果并不相同, 采取适当的结构可提高配电网可靠性, 采取不当的结构反而事倍功半, 其中效果较好的为环型结构。

3) 信息系统各元件对配电网可靠性的影响不尽相同, 其中控制器对可靠性的影响显著, 其他元件的影响则几乎可以忽略不计。

4) 综合上述结论, 为提高配电网可靠性可采取以下方法: (a) 结合配电网的特点以及地区地理特性, 采用合理的通信网络结构以及适当的通信方式; (b) 采用高质量的控制或适当增设冗余设备; (c) 适当增加备用电源的容量或加入分布式电源。

参考文献

- [1] 胡勇. 主动配电网用户侧能量管理系统设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 149-155.
HU Yong. Design and implementation of user energy management system on active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 149-155.
- [2] 镐俊杰, 王丹, 杨东海. 电力信息系统网络安全态势在线评估框架与算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 116-120.
HAO Junjie, WANG Dan, YANG Donghai. Research of security situation online-assessing framework and algorithm in electric power information system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 116-120.
- [3] 曾鸣, 李红林, 薛松, 等. 系统安全背景下未来智能电网建设关键技术发展方向——印度大停电事故深层次原因分析及对中国电力工业的启示[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 175-181.
ZENG Ming, LI Honglin, XUE Song, et al. Key

- technologies of future smart grid construction based on power system security: a view of blackout in India and experience and enlightenment to power industry in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 175-181.
- [4] 高翔, 庄侃沁, 孙勇. 西欧电网“11.4”大停电事故的启示[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 25-31.
GAO Xiang, ZHUANG Kanqin, SUN Yong. Lessons and enlightenment from blackout occurred in UCTE grid on November 4, 2006[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 25-31.
- [5] 王健, 丁屹峰, 宋方方. 2011年国外大停电事故对我国电网的启示[J]. 现代电力, 2012, 29(5): 1-5.
WANG Jian, DING Yifeng, SONG Fangfang. The enlightenment of foreign large scale blackouts in 2011 to power grid in China[J]. Modern Electric Power, 2012, 29(5): 1-5.
- [6] 邓国新, 赵冬梅, 张旭. 对地区电网故障诊断系统中信息纠错的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(1): 50-54.
DENG Guoxin, ZHAO Dongmei, ZHANG Xu. Research of informations identification on the fault diagnosis system for regional power grid[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(1): 50-54.
- [7] 翟瑞聪, 高雅. 电力设备远程监测诊断中心系统遥视信息联动应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 150-154.
ZHAI Ruicong, GAO Ya. Research on application of remote video information linkage of the power equipment monitoring and diagnosis center system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 150-154.
- [8] 黄梦婕. 配网自动化通信系统的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
HUANG Mengjie. Research of power distributed automation communication system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [9] 何玉钧, 陈冉, 张文正, 等. 一种电力通信网最大不相交双路由配制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 60-68.
HE Yujun, CHEN Ran, ZHANG Wenzheng, et al. A maximally disjoint routing algorithm for power communication networks[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 60-68.
- [10] 俞斌, 郭创新, 王越, 等. 考虑信息系统作用的电力系统可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 7-13.
YU Bin, GUO Chuangxin, WANG Yue, et al. Research on the reliability of the power system considering impacts of the information system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 7-13.
- [11] FALAHATI B, FU Y, WU L. Reliability assessment of smart grid considering direct cyber-power interdependencies[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1515-1524.
- [12] BAMDAD F, YONG Fu. Reliability assessment of smart grids considering indirect cyber-power interdependencies[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1677-1686.
- [13] 曹一家, 张宇栋, 包哲静. 电力系统和通信网络交互影响下的连锁故障分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 7-11.
CAO Yijia, ZHANG Yudong, BAO Zhejing. Analysis of cascading failures under interactions between power grid and communication network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 7-11.
- [14] 王先培, 田猛, 董政呈, 等. 通信光缆故障对电力网连锁故障的影响[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 58-62.
WANG Xianpei, TIAN Meng, DONG Zhengcheng, et al. Impact of failure of communication optical cable on cascading failures of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 58-62.
- [15] 齐先军, 彭翔天, 张晶晶. 基于浴盆形故障率函数的配电系统可靠性评估算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 81-87.
QI Xianjun, PENG Xiangtian, ZHANG Jingjing. Reliability evaluation algorithm of power distribution system based-on bathtub-shaped hazard function[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 81-87.
- [16] 赵洪山, 赵航宇. 考虑元件故障率变化的配电网可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 56-62.
ZHAO Hongshan, ZHAO Hangyu. Distribution system reliability analysis considering the elements failure rate changes[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 56-62.

收稿日期: 2016-07-28; 修回日期: 2016-09-21

作者简介:

欧林(1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事配电网自动化运行、配用电数据采集及协同应用等方面的研究工作; E-mail: cqepoulin@163.com

赵晓龙(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事配电网规划设计、经济运行、配电变压器节能技术等工作; E-mail: zhaoxiaolong@epri.sgcc.com.cn

段祥骏(1980—), 男, 工程师, 主要从事智能配用电技术、配电网电能质量治理、配电网经济运行等方面的研究工作。E-mail: duanxj@epri.sgcc.com.cn

(编辑 葛艳娜)