

基于负荷分类评估的配电网可靠性分析方法^{*}

孔祥玉^{1†}, 吕鑫鹏¹, 董旭柱², 吴争荣², 刘志文²

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072;

2. 南方电网电力科学研究院, 广东 广州 510080)

摘要:快速准确的可靠性评估技术对提高配电网运行水平至关重要. 本文在传统配电网可靠性评估基础上, 针对具有快速转供功能的含分布式电源配电网, 提出了一种基于负荷分类的可靠性评估方法. 该方法基于概率和抽样方法确定系统运行状态及故障或失效发生地点, 将配电网分为不同类型的负荷进行分析, 并考虑了含分布式电源情况下的网络重构和负荷转供等功能. 该方法有效地简化了传统可靠性评估过程的复杂性, 提高了分析效率, 能应用于配电网的实时可靠性评估. 采用改进的 IEEE—RBTS Bus6 系统验证了所提模型及方法的可行性.

关键词:配电网; 可靠性; 负荷分类; 分布式电源

中图分类号:TM732

文献标志码:A

Reliability Analysis Method of Distribution Network Based on Load Classification Evaluation

KONG Xiangyu^{1†}, LÜ Xinpeng¹, DONG Xuzhu², WU Zhengrong², LIU Zhiwen²

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China)

Abstract: The rapid and accurate reliability assessment technique is critical to the improvement of distribution network operational level. A reliability evaluation method of distribution network based on load classification is proposed in the paper, which uses probabilities and sampling approach to determine the operating state of the system and the place where the fault or failure occurs. The distribution system is divided into different types of loads for analysis, and the functions of network reconfiguration and load transfer are taken into account under the case of distributed generation. This method can effectively simplify the traditional reliability evaluation process and improve the efficiency of analysis. It can be also suitable for the real-time reliability evaluation of the distribution network. The validity of the proposed method is verified by the improved IEEE—RBTS Bus 6 system as an example.

Key words: distribution system; reliability; load classification; distributed generation

^{*} 收稿日期:2017-08-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51377119), National Natural Science Foundation of China(51377119); 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0901104), the National Key Research and Development Program of China (2016YFB0901104); 南方电网有限责任公司科技项目(WYKJ00000020), Technology Project of China Southern Power Grid Co Ltd (WYKJ00000020)

作者简介:孔祥玉(1978—), 男, 天津人, 天津大学副教授, 博士

[†] 通讯联系人, E-mail: eekongxy@tju.edu.cn

随着石化能源的枯竭,以及环保意识的增强,分布式电源(Distributed Generation, DG)越来越多地接入配电网,这些改变使配电系统从简单的无源网络变成了复杂有源网络,影响了配电系统的结构和运行,同时也改变了原有的配电系统可靠性评估的理论与方法^[1]. 对于含有分布式电源的配电网,其复杂性主要体现在:1)配电网潮流方向由单一性变为双向性,系统运行状态的不确定性大大增加;2)并网运行方式与孤岛运行方式的切换问题等;3)DG 功率输出具有波动性与间歇性,影响供电的充裕度. 当配电网中含有多点、高密度 DG 时,如何对配电网的可靠性进行评估,是配电网规划和运行中必须考虑的问题.

含 DG 配电网可靠性评估主要有解析法^[2-4]、模拟法^[5-8]两类. 其中解析法通过严格的数学手段计算可靠性,计算结果可信度高,但难以考虑元件运行状态、DG 出力水平等因素的随机性. 因此,目前针对含 DG 的配电网可靠性多采用模拟法,即蒙特卡罗法. 文献[5]较早地提出了一种对 DG 与储能组成的联合供电单元进行了建模分析的方法,在考虑 DG 出力特性的基础上用时序蒙特卡罗法进行了可靠性计算,得到了不错的结果. 文献[6]在此基础上进一步考虑了故障后孤岛情况下,不同负荷削减策略对可靠性造成的影响,但二者均未考虑 DG 出力与负荷之间相关性的影响. 文献[7]则考虑了不同场景下电网内发电和负荷的不均衡情况,从期望负荷损失角度分析了切负荷策略对系统可靠性的影响. 文献[8]对蒙特卡罗法进行了优化,提出了一种快速评估方法,但无法解决不同区域负荷点故障率和停电时间受主馈线故障和 DG 双重故障的影响.

然而,上述方法无法很好解决具有复杂转供功能的配电网可靠性评估,为此,文献[9]通过搜索策略提出了节点分类的概念,并应用于含复杂转供的配电网,得到了不错的效果. 文献[10]进一步地考虑了 DG 的引入,但没有过多地考虑 DG 受限转供的影响. 文献[11]则另辟蹊径,通过对保护元件进行分级,实现可靠性指标的全网传递,实现了多备用电源情况下的可靠性快速评估. 此外,随着目前配电系统自动化水平的发展,也有部分学者对自动化技术对可靠性的影响进行了研究. 文献[12]指出合理地利用配电自动化数据有助于配电网的运行. 文献[13]则基于 GIS 系统数据对传统算法进行了改进,取得了不错的效果. 文献[14]进一步地通过配电自动化数据对未来一定时刻的可靠性指标参数进行了预

测,判断系统运行可靠性水平,具有很强的指导意义.

针对目前智能配电网的发展,具有快速转供功能的含分布式电源配电网逐渐成为主流. 同时,信息采集系统的逐步上线也能够为可靠性评估提供一定帮助. 基于此,本文在传统配电系统可靠性评估方法的基础上,结合配电网自愈网络重构技术^[15]和 DG 特点,提出了一种基于负荷分类的含 DG 配电网可靠性评估方法. 该方法以当前电网状态为基础通过主要元件的模拟抽样以预测电网的未来状态,针对潜在故障后的系统,依据负荷节点分类进行可靠性指标的求解,实现配电网的可靠性评估. 与已有基于概率的可靠性评估方法相比较,其优点包括:1)考虑了配电网在发生故障后能够实现网络重构和负荷转供的功能,同时计及了 DG、储能设备对故障后孤岛中重要负荷供电的情况,更符合配电网发展的趋势. 2)评估中基于概率方法确定系统运行状态及故障或失效发生地点,将配电网分为不同类型的负荷进行分析,简化了可靠性评估过程的复杂性,提高了分析效率. 同时,方法所需的数据可以通过信息采集系统实时获得,能够集成于智能化信息平台进行实时分析,为部分预防性措施的实施提供了一定支持.

1 基于故障点的负荷分类方法

1.1 基于抽样的配电网运行状态

对于包含 m 个重要设备的配电网系统,在仅考虑重要设备发生故障的情况下,系统状态 x 取决于系统重要设备的状态组合. 假设配电网设备仅包含正常工作和非正常工作两种状态,且设备失效是相互独立的,则设备状态可通过随机抽样获得. 令 s_i 表示设备 i 基于概率的运行状态,1 表示设备正常工作状态,0 表示设备非正常工作状态(发生故障或失效). 对于非正常工作率服从 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数据 R_i 的设备,基于式(1)获得设备 i 的状态抽样:

$$s_i = \begin{cases} 1 & \text{if } 1 \geq R_i > Q_i \\ 0 & \text{if } Q_i \geq R_i \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 Q_i 表示重要设备在可靠性分析周期 T 时段内发生故障或失效概率,实施中可以包括所有外界自然因素、人为因素或设备自身因素等导致系统发生故障的概率,数值可由历史统计获得;分析周期 T 可基于可靠性评估需求设定,通常取值为 1 h 或 1

d,相应地也需要根据取值修改 Q_i 大小.若元件有 3 种及以上状态时,式(1)可进行拓展,并采用轮盘赌选择法^[16]对其进行状态抽样.

配电网的故障类型可分为瞬时性故障和永久性故障两类,相应的保护控制也包括故障后重合闸、网络重构以及备自投等.由于瞬时性故障发生后,保护控制可以使故障相断路器快速合闸,恢复故障相供电,对于故障停电时间等可靠性指标影响极小,可忽略不计.因此为加快求解速度,在抽样过程中仅考虑永久性故障,故障类型以最严重的故障为准,如线路的三相短路故障.配电网中所有主要设备的状态集合,则视为系统状态 x ,由式(2)表示:

$$x=(s_1,s_2,\cdots,s_m)$$

(2)

由于设备发生故障或失效的概率较小,因此基于抽样获得的配电网运行状态多数为正常,即在假设输电网具有供电充裕度情况下,配电网能够正常供电.如果确定为发生故障,则需分析该故障对负荷供电的影响,并计算该状态的可靠性指标.

1.2 基于故障扩散的负荷节点分类

基于配电网运行状态 x 获得故障或失效发生的元件,进而判定故障或失效发生地点,经断路器等设备隔离故障后,系统形成潜在的分块子系统,依据子系统中负荷点在故障发生后恢复供电的情况可将负荷节点划分为 a、b、c、d 和 e 5 类.具体分类方法如下:

1)逆着故障发生元件正常潮流方向搜索第一个出现的断路器,则该馈线上断路器前的节点(包括该馈线上动作断路器前端的节点和其他馈线的所有节点)为 a 类负荷节点.

2)顺着故障发生元件正常潮流各方向搜索,当遇到断路器或达到线路末端时便终止该方向的扩散,断开任意方向上第一个出现的断路器,将配电网解列成多个子系统.

3)重新以故障发生元件为起点进行遍历搜索,当遇到隔离开关、线路末端或在前两步中断开的断路器时便终止该方向的搜索,断开任意方向上出现的第一个隔离开关,进一步解列系统.

4)解列后的子系统若仍与其他常规电源直接相连,则该类子系统内的负荷节点为 b 类负荷节点.

5)若解列后的子系统中可通过开关操作与常规电相连,恢复负荷供电(包括通过原电源重新供电或通过备用电源进行转供),则需考虑系统转供能力,若可以进行转供,则该类子系统内的负荷节点为 c 类负荷节点.

6)解列后子系统中不可通过常规电源恢复供电,但连接有 DG(包括通过快速自启动实现)或储能设备(包括具有 V2G 功能的电动汽车)的系统,该类子系统中负荷节点为 d 类负荷节点.

7)系统解列后,若子系统未与任何类型电源相连,且无法切换开关进行转供,抑或由于其他馈线容量限制无法转供,则该类子系统中负荷节点为 e 类负荷节点.

故障后确定子系统节点类型主要流程如图 1 所示.在任意故障发生后,上述 5 种类型的子系统,a 类负荷节点在故障上游,完全不受影响;b 类负荷节点,由于双电源供电,类似于 a 类负荷节点,亦不会影响连续供电;c 类负荷节点可基于配电网自愈控制中的网络重构实现快速恢复供电,仅会发生短时间的停电,停电时间取决于开关操作时间;d 类负荷节点的停电时间需要取决于 DG 的供电能力,储能的容量,以及间歇性 DG 的功率输出特性,且存在负荷削减的可能,需要对解列后子系统进行进一步分析;对于 e 负荷节点,则将完全受影响,直到故障完全修复后才可恢复供电.

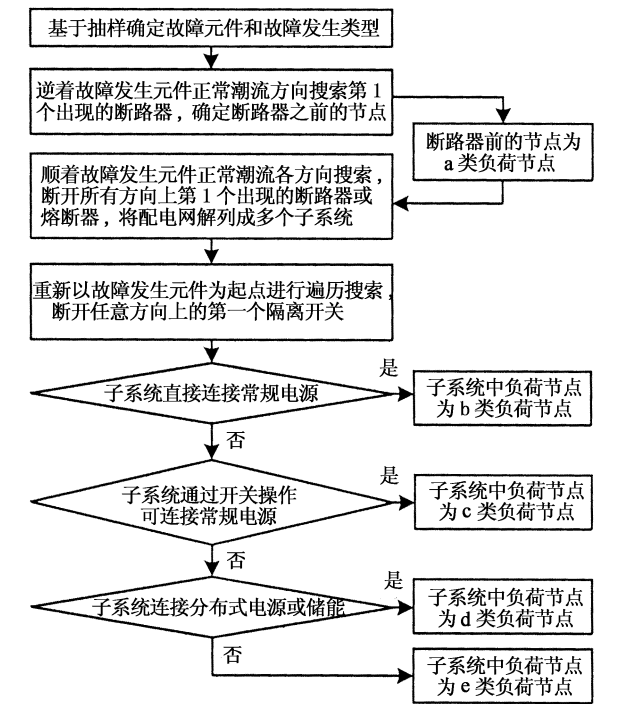


图 1 故障后确定子系统节点类型流程

Fig. 1 The type node analyzing process after the failure

2 负荷点与系统的可靠性指标求取

2.1 配电网可靠性指标

配电系统可靠性指标中主要有三个基本的负荷点可靠性指标^[17]:负荷点故障率、负荷点不可用率以及停电持续时间。以上述负荷点可靠性指标为基础,结合停电范围(即负荷点用户数 N 与负荷点受到影响用户数 M)分别可以求得配电网系统的可靠性指标,如系统平均停电频率指标(System Average Interruption Frequency Index, SAIFI)、系统平均停电持续时间指标(System Average Interruption Duration Index, SAIDI)、电量不足指标(Energy Not Supplied, ENS)等,计算公式如下:

$$\lambda_{SAIFI} = \sum \lambda_i N_i / \sum N_i \quad (3)$$

$$U_{SAIDI} = \sum U_i N_i / \sum N_i \quad (4)$$

$$E_{ENS} = \sum E_{ENS,j} = \sum L_i U_i \quad (5)$$

式中: λ_i 、 U_i 、 L_i 与 N_i 分别为负荷点 i 的故障率、故障时间、平均负荷与用户数。

其他可靠性指标,如用户平均停电持续时间指标(Customer Average Interruption Duration Index, CAIDI)、平均供电可用率(Average Service Availability Index, ASAI)等,同样可按照类似方法求取。

当前配电网对上述指标的统计多以年为周期,但在本文研究中,由于分析周期 T 不确定,其单位也需要进行调整,且由于本文采用多次抽样综合分析,将在全部抽样完成后再根据分析周期求取对应负荷点的 λ_i 、 U_i 。

2.2 计及网络重构的负荷点可靠性指标求取

网络重构可应用于系统正常运行状态下和系统故障情况下两个方面,本文主要研究系统故障情况下的网络重构,即在考虑网络重构和负荷转供的情况下,针对不同类型子系统节点负荷,进行分类可靠性指标求解。

系统故障情况下的网络重构主要是通过分段、联络开关的状态转换,实现非故障停电区域的快速恢复供电。在配电网自动化及智能化水平较高的地方,故障发生后 c 类负荷节点可通过自动进行开关切换操作实现与电源相连;在配电网自动化及智能化水平一般的地方,可通过人工参与的操作,实现网络重构和负荷转供,两种在网络重构切换操作时间,具体可根据实际配电网运行情况确定取值。负荷转供范围可基于实际电网运行情况,依据馈线负载进

行确定,在分析过程中,通常认为网络重构正常,可以完全转供以简化计算。

在进行配电网可靠性评估时,以 T 为分析周期进行抽样,若抽样结果为在分析周期 T 内发生一次单元件故障,则各类负荷节点在分析周期 T 内的停电次数 $\lambda_i T$ 、故障停电持续时间 $U_i T$ 和缺失电量 $E_{ENS,i}$ 可依据负荷点类型取值如表 1 所示。

表 1 不同类型负荷的可靠性指标

Tab. 1 Reliability indexes of different types of loads

负荷节点	停电次数/次	停电持续时间/h	缺失电量/MWh
a 类节点	0	0	0
b 类节点	0	0	0
c 类节点	1	T_{recg}	$L_i T_{\text{recg}}$
d 类节点	1	待定	待定
e 类节点	1	T_{repair}	$L_i T_{\text{repair}}$

对于 c 类负荷节点,受影响时间仅为故障断路器动作加网络重构切换操作时间 T_{recg} ,则 $U_i T = T_{\text{recg}}$, $E_{ENS,j} = L_i T_{\text{recg}}$,其中 L_i 为负荷点 i 的功率水平。对于 e 类负荷,停电时间将会是故障修复时间 T_{repair} ,类似地,有 $U_i T = T_{\text{repair}}$, $E_{ENS,j} = L_i T_{\text{repair}}$ 。若分析周期 $T < T_{\text{repair}}$,则在分析周期结束时故障尚未修复, e 类负荷无法恢复供电,则令 $U_i T = T$,不对下一周期的情况进行分析。

针对 d 类负荷节点,在考虑 DG 以及储能设备供电情况下,进行相应的指标求解。

实施过程中,故障情况下所述 d 类负荷节点所在孤岛子系统内的供电电源通常包括可控 DG、不可控 DG 以及储能设备(抑或具有 V2G 功能的电动汽车等)。DG 和储能设备可向负荷提供的输出功率 P_s ,可通过式(6)计算得到:

$$P_s = \sum_{i \in \text{DGc}} P_{\text{DGc},i} + \sum_{i \in \text{DGUC}} P_{\text{DGUC},i} + \sum_{i \in \text{ST}} P_{\text{ST},i} \quad (6)$$

式中 DGc 、 DGUC 与 ST 分别为孤岛子系统内可控 DG、不可控 DG 与储能设备的集合; $P_{\text{DGc},i}$ 、 $P_{\text{DGUC},i}$ 分别为孤岛子系统内可控/不可控 DG 期望输出功率; $P_{\text{ST},i}$ 为第 i 个储能设备的输出功率。

考虑储能设备的允许放电功率和最小荷电容量,储能设备 i 故障后可持续供电时间为:

$$T_{\text{ST},i} = W_{\text{ST},i} (\delta_{\text{SOC},i} - \delta_{\text{SOCmin},i}) / P_{\text{STmax},i} \quad (7)$$

式中: $W_{\text{ST},i}$ 为第 i 个储能设备额定容量; $\delta_{\text{SOC},i}$ 为第 i 个储能设备初始时荷电状态; $\delta_{\text{SOCmin},i}$ 为第 i 个储能设备的允许最小荷电容量。如果 $T_{\text{ST},i} < T$, 当 $t < T_{\text{ST},i}$ 时,可以认为储能设备 i 是一个功率 P_{STmax} 的恒

定功率源; $t > T_{ST,i}$, 储能无法供电. 如果 $T_{ST,i} \geq T$, 则认为储能一直可以以 $P_{STmax,i}$ 的功率供电.

实施过程中, d 类负荷节点停电时间 $U_i T$ 求取公式为:

$$U_i T = T_{i,recg} + I_i(P_S) \cdot T_i(P_S) \tag{8}$$

式中: $T_{i,recg}$ 为 d 类负荷形成孤岛并通过 DG 恢复供电的时间, 其值取决于孤岛子系统是否需要等待隔离开关断开; $T_i(P_S)$ 为当孤岛子系统输出功率为 P_S 时, 为了保证重要负荷, 对负荷点 i 停电的持续时间; $I_i(P_S)$ 为供电能力为 P_S 时, 对负荷点 i 进行切负荷操作的标识. 对于第 j 个孤岛区域 D_j , 若孤岛内负荷满足不等式 $\sum_{i \in D_j} L_i \leq P_S$, $j = 1, 2, 3, \dots, L_i \leq P_S$, 则 $I_i(P_S)$ 均为 0; 若孤岛内负荷不满足不等式 $\sum_{i \in D_j} L_i \leq P_S$, $j = 1, 2, 3, \dots, L_i \leq P_S$ 时, 则按照负荷优先供电顺序, 依次对优先级较低负荷点 i 的 $I_i(P_S)$ 标识至 1, 直至至剩余负荷小于孤岛系统最大出力.

同理, d 类负荷节点电量不足期望 $E_{ENS,i}$ 求取公式为:

$$E_{ENS,i} T = L_i T_{i,recg} + L_i \cdot I_i(P_S) \cdot T_i(P_S) \tag{9}$$

式中, $T_i(P_S)$ 可以根据配电网原始数据信息, 结合故障时 DG, 储能以及负荷的运行状态, 结合负荷优先级水平^[7]进行设定求取.

前文分析均基于分析周期内仅发生单一故障的情况, 实际分析中若模拟周期内发生 m 次故障, 若不计及多重故障, 可以依次分析并进行线性叠加求取负荷点可靠性指标.

2.3 系统的可靠性指标求取

实际分析中, 设定抽样次数 K , 进行抽样计算. 对于同一状态下配电网进行 K 次抽样所获得的分析周期 T 的负荷点指标分别为:

$$\lambda_i T = \sum_{k=1}^K \lambda_{i,k} T / K \tag{10}$$

$$U_i T = \sum_{k=1}^K U_{i,k} T / K \tag{11}$$

$$E_{ENS,i} T = \sum_{k=1}^K E_{ENS,i,k} T / K \tag{12}$$

式中: $\lambda_{i,k} T$ 、 $U_{i,k} T$ 、 $E_{ENS,i,k} T$ 分别为负荷点 i 在第 k 次模拟中的故障次数、故障时间以及缺失电量.

根据式(10)~式(12)以及选定的时间周期 T , 可求得各负荷点可靠性指标 λ_i 、 U_i 、 $E_{ENS,i}$. 进而根据式(3)~式(5)即可求得单次模拟下系统的可靠性指标 SAIFI、SAIDI 和 ENS.

3 配电网可靠性评估实现流程

本文所提出的基于负荷分类的含分布式电源配电网可靠性评估方法实现流程如图 2 所示. 配电网

原始数据信息的来源, 可以包括从运行调度系统、MIS 系统获得电网参数和结构, 设备属性参数等; 从 EMS 系统中获取变电站功率、线路运行情况、从 GIS 系统获得电网地理接线图等; 通过短期负荷预测和短期 DG 发电预测获得负荷需求以及分布式电源发电能力; 基于配电网运行状态及分布式电源和负荷预测信息, 以及网络拓扑变化情况, 并获得相应的重要设备集合. 分析周期 T 与模拟次数 K 通常针对配电网的实际需求进行设定.

通常系统中负荷功率、分布式电源出力并非完全相关, 依据短期预测曲线对 d 类负荷节点指标进行精确求取又过于耗费时间与系统性能. 在实际应用中, 若分析周期 T 较小, 可认为数值大致不变, 采用系统当前数值进行分析, 以提高分析效率.

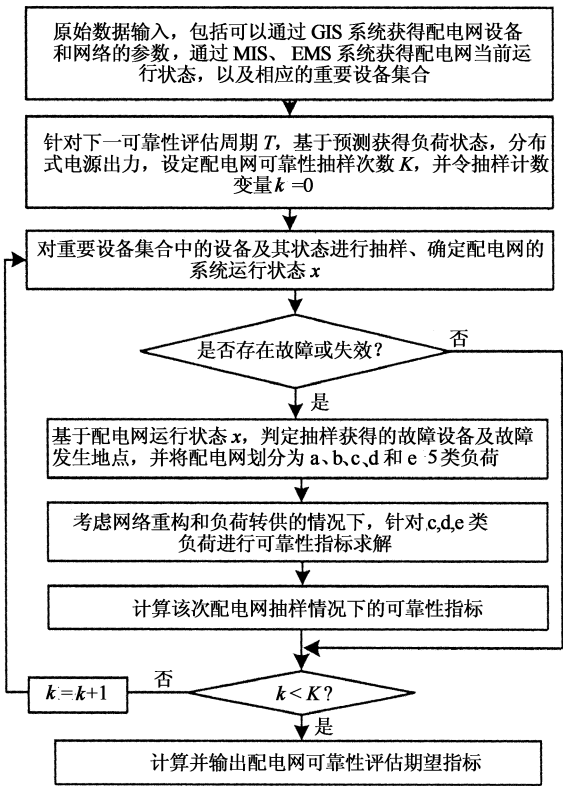


图 2 含 DG 的配电网可靠性评估实现流程
Fig. 2 Reliability evaluation implementation flow of distribution network with DGs

4 算例分析

以 IEEE RBTS BUS6 系统的 F4 馈线为基础^[18], 增加 DG 及储能设备, 并补充了隔离开关、母

线以方便研究,改造后的系统结构如图 3 所示.

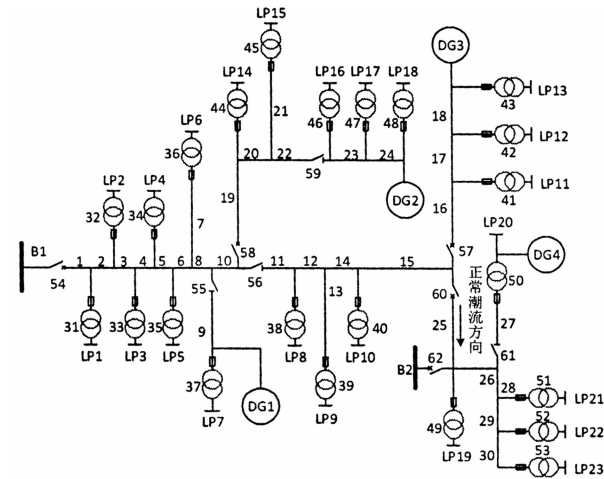


图 3 含 DG 配电网接线图
Fig. 3 One-line-diagram of distribution network with DG

改造后的系统中有两个供电电源、30 条线路、23 个熔断器、5 个断路器、3 个隔离开关、以及 4 组 DG 供电模块(DG 组均配置断路器以及保护装置,图中未画出),共有 23 个负荷点、1 183 个用户,负荷点和线路原始数据参见文献[18]. DG 供电模块及储能设备具体参数如表 2 所示.

表 2 DG 供电模块参数

编号	风机 /MW	光伏 /MW	可控 DG/MW	储能	
				容量/MWh	最大放电功率/MW
DG1	—	0.5	—	0.2	0.1
DG2	0.8	—	0.5	0.5	0.25
DG3	0.8	0.5	—	0.2	0.1
DG4	—	—	0.5	—	—

假设故障均发生在抽样时间段的起始时刻,网络重构恢复时间 $T_{\text{recg}}=0.01\text{ h}$,可控 DG 启动时间 $T_c=0.1\text{ h}$,故障后负荷恢复供电的优先级如表 3 所示^[11].若某时刻 t ,假设从量测系统中得知负荷水平为峰值的 70%,光伏出力为额定状态,风机出力为额定状态的 40%,储能荷电状态均为 80%,最低荷电容量为 10%,为简化分析,假设负荷完全相关,设定分析周期 $T=1\text{ h}$,抽样次数 $K=10\ 000$ 次.

表 3 负荷恢复供电优先级

优先级	负荷点	优先级	负荷点
1	1,6	6	7,23
2	5	7	9,21
3	2	8	4,18
4	8,11,14,19	9	3,13,17
5	10,12,16,22	10	15,20

若在抽样过程中获得 4 号元件具有潜在故障,

按图 1 所示流程进行负荷分类,具体过程如下:逆着故障发生元件正常潮流方向搜索,第一个断路器为 54,上游无负荷节点,即不存在 a 类负荷节点.顺着故障发生元件正常潮流搜索,断开任意方向上出现的第一个断路器,即 58、57、60 三个断路器,解列成子系统;重新以元件 4 为起点进行遍历,断开任意方向上出现的第一个隔离开关,即 55、57 两个隔离开关,将子系统进一步解列.在系统解列后,断路器 60 后子系统与常规电源 B2 相连,可继续供电,因此该子系统中负荷节点 19~23 为 b 类负荷节点.负荷节点 8~13 所在子系统可通过重合断路器 57、60,通过 B2 电源进行转供,则负荷节点 8~13 为 c 类负荷节点.负荷节点 14~18 所在子系统可通过 DG2 进行供电,负荷节点 7 所在子系统可通过 DG1 恢复供电,则负荷节点 7,14~18 为 d 类负荷节点.负荷节点 1~6 所在子系统无法转供,需等待故障元件 4 修复,为 e 类负荷节点.

进行 K 次抽样,共 6 次抽样中发生故障,故障元件分别为 4、22、15、38、26、17.各次故障负荷分类情况如表 4 所示.

表 4 故障情况与负荷分类

故障元件	a 类节点	b 类负荷	c 类负荷	d 类负荷	e 类负荷
4	—	19~23	8~13	7, 14~18	1~6
22	1~13,19~23	—	—	16~18	14~15
38	1~7, 9~23	—	—	—	8
15	—	19~23	1~7, 14~18	11~13	8~10
26	1~18	—	—	20	19,21~23
17	1~10, 14~23	—	—	—	11~13

以 4 号元件故障为例,分别计算各节点可靠性指标,其中,对于 d 类负荷可靠性指标,根据系统情况及表 3 可知,负荷 15,17 被削减,负荷 18 需等待柴油机启动才可恢复供电,具体参数如表 5 所示.再分别计算其余 4 次故障的情况,根据式(10)~式(12),得到负荷点可靠性指标如表 6 所示.

根据式(3)~式(5)求得配电网的可靠性指标如表 7 中原始系统一行所示,经过具体分析可知.

1)对于未来一小时内配电网的可靠性情况,SAIFI、SAIDI、ENS 三指标均为 10^{-4} 数量级,与年平均可靠性指标基本一致,不同的变化量主要表现在负荷水平,DG 发电情况,以及配电网网络状态,能够体现出未来 T 时刻内配电网负荷持续供电概率.

2)负荷点 15、17 的停电概率较高,这与 DG2 供

电能力有关,DG2 的出力不足以保证负荷点 14~18 的全部供电,优先级较低的负荷点 15、17 通常处于被削减状态,此外,在模拟中发生了一次变压器故障,致使负荷点 8 的停电时长较长。

3)对比表 1、表 4 与表 6,可以看出 e 类负荷对

负荷点停电指标贡献最为明显,不能转供的 d 类负荷次之,分布式电源和快速转供的存在有效地减少了停电时间与电量不足.同时,算例中分布式电源和储能供电能力较强,可一定程度保证 T 时刻内的输出功率稳定.

表 5 元件 4 故障后各负荷点可靠性指标
Tab. 5 Reliability index of different load pointsafter fault of part 4

负荷点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\lambda_i T/\text{次}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$U_i T/\text{h}$	1	1	1	1	1	1	0.01	1.01	0.01	0.01	0.01	0.01
$E_{\text{ENS},i}/\text{MWh}$	0.207 5	0.226 0	0.456 2	0.480 2	0.258 9	0.207 5	0.005 6	0.196 3	0.005 2	0.002 0	0.001 9	0.002 0

负荷点	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
$\lambda_i T/\text{次}$	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
$U_i T/\text{h}$	0.01	0	1	0	1	0.1	0	0	0	0	0
$E_{\text{ENS},i}/\text{MWh}$	0.004 6	0	0.351 8	0	0.456 2	0.048 0	0	0	0	0	0

表 6 系统各负荷点可靠性指标
Tab. 6 Reliability index of different load points

负荷点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Sigma \lambda_{i,k} T/\text{次}$	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	3
$\Sigma U_{i,k} T/\text{h}$	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	0.01	2.01	1.01	1.01	1.01	1.01
$\Sigma E_{\text{ENS},i,k}/\text{MWh}$	0.209 6	0.228 3	0.460 8	0.485 0	0.261 4	0.209 6	0.005 6	0.390 6	0.521 4	0.200 2	0.196 3	0.200 2

负荷点	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
$\Sigma \lambda_{i,k} T/\text{次}$	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1
$\Sigma U_{i,k} T/\text{h}$	1.01	1.01	2.01	0.02	2.01	0.21	1	0.1	1	1	1
$\Sigma E_{\text{ENS},i,k}/\text{MWh}$	0.460 8	0.196 3	0.707 0	0.004 0	0.916 9	0.100 8	0.194 3	0.035 2	0.516 3	0.198 2	0.557 6

若系统转供能力,转供时间,储能荷电容量发生变化,无法保障负荷的快速复电过程,配电网可靠性将会受到影响,如表 7 后三行所示.若在配电网自动化水平较低的情况下,转供时间为 $T_{\text{recg}}=0.5\text{ h}$ 时,相比于原始系统 ENS 和 SAIDI 指标有较大幅度恶化,可见快速转供能够较大程度的提升系统可靠性.同理转供能力不足时也会影响一部分可由其他电源进行转供的负荷节点的可靠性,以本文算例为例,若电源 B2 无法转供除负荷 19~23 以外的负荷,则在元件 4 发生故障时,c 类负荷节点 8~10 将变为 e 类负荷,负荷节点 11~13 将变为 d 类负荷,其可靠性指标有较大的降低.而对于 d 类负荷,若储能耗尽,则有部分负荷将,若储能电量不足,无法供电,对于 d 类节点负荷点 7 而言,仅靠 DG 无法提供足够的功率,其负荷被削减;对于负荷点 16,则需等待可控 DG 启动后才能恢复供电。

由于故障修复时间 r 大于本文选定的分析周期 T ,若发生故障,在分析周期 T 结束时故障尚未修复,因此预测可靠性指标相对偏小,同时, T 、 T_{recg} 、 T_c 与 r 之间比例的变化也会对结果造成一定影响。

实际应用中,对于地市级区域配电网,在系统拓扑不发生改变的情况下,可通过不同状态下评估结果建立评判集,采用数学方法,如模糊综合评价法,进行可靠性指标的划分并进一步判断系统状态。

表 7 不同情况下的系统可靠性
Tab. 7 Reliability index with different condition

不同系统情况	λ_{SAIFI} (次/户·T)	U_{SAIDI} (h/户·T)	$E_{\text{ENS},i}$ (MWh/T)
原始系统	$2.198\ 6\times10^{-4}$	$1.011\ 3\times10^{-4}$	$7.256\ 0\times10^{-4}$
$T_{\text{recg}}=0.5\text{ h}$	$2.198\ 6\times10^{-4}$	$1.468\ 0\times10^{-4}$	$10.543\ 4\times10^{-4}$
B2 转供能力不足	$2.198\ 6\times10^{-4}$	$1.141\ 8\times10^{-4}$	$8.155\ 6\times10^{-4}$
储能耗尽	$2.198\ 6\times10^{-4}$	$1.019\ 4\times10^{-4}$	8.719×10^{-4}

5 结 语

本文提出一种含 DG 的配电网可靠性分析方法,该方法的实质是应用概率和抽样方法确定系统运行状态及故障或失效发生地点,将配电网分为不同类型的负荷节点进行可靠性分析,简化了可靠性评估过程的复杂性,提高了分析效率.评估考虑了配

电网在发生故障后能够实现网络重构和负荷转供的功能,以及 DG、储能设备对配电网故障情况下对重要负荷的供电功能,符合配电网发展需求。随着电网信息化水平逐渐加强,数据采集系统逐步上线,本方法也能够依托信息采集系统中获取的数据信息,对当前系统状态进行分析,为系统可靠运行提供一定的帮助。

由于本文所采用的故障后负荷分类方法依赖于断路器能够正确动作,以及网络重构实现负荷转供,这些假设取决于配电自动化和自愈控制技术,而配电网所处发展水平不同,如何考虑这些因素对所提出方法的影响,有待进一步研究。同时,如何细化负荷削减以及储能出力模式,从而获得更精确的结果,也是值得考虑的一个方向。

参考文献

- [1] 李扬,王蓓蓓,李方兴. 灵活互动的智能用电展望与思考[J]. 电力系统自动化,2015,39(17):2-9.
LI Yang, WANG Beibei, LI Fangxing. Outlook and thinking of flexible and interactive utilization of intelligent power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 2-9. (In Chinese)
- [2] 何禹清,彭建春,孙芊. 考虑风电能量随机性的配电网可靠性快速评估[J]. 中国电机工程学报,2010,30(13):16-22.
HE Yuqing, PENG Jianchun, SUN Qian. Fast algorithm for distribution system reliability evaluation considering the random energy output of wind power generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 16-22. (In Chinese)
- [3] 李志铿,汪隆君,王钢,等. 计及故障重构的含分布式电源配电网可靠性评估[J]. 电力系统自动化,2013,37(4):35-40.
LI Zhikeng, WANG Longjun, WANG Gang, et al. Reliability evaluation for distribution system with distributed generations considering reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 35-40. (In Chinese)
- [4] ATWA Y M, SAADANY E F, SALAMA M M A, et al. Adequacy evaluation of distribution system including wind/solar DG during different modes of operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4):1945-1952.
- [5] 梁惠施,程林,刘思革. 基于蒙特卡罗模拟的含微网配电网可靠性评估[J]. 电网技术,2011,35(10):76-81.
LIANG Huishi, CHENG Lin, LIU Sige. Monte carlo simulation based reliability evaluation of distribution system containing microgrids[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 76-81. (In Chinese)
- [6] 王杨,万凌云,胡博,等. 基于孤岛运行特性的微网可靠性分析[J]. 电网技术,2014,38(9):2379-2385.
WANG Yang, WAN Lingyun, HU Bo, et al. Isolated island operating characteristics based analysis on reliability of microgrid[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2379-2385. (In Chinese)
- [7] 陈璨,吴文传,张伯明,等. 基于多场景技术的有源配电网可靠性评估[J]. 中国电机工程学报,2012,32(34):67-73.
CHEN Can, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. An active distribution system reliability evaluation method based on multiple scenarios technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 67-73. (In Chinese)
- [8] CONTI S, RIZZO S A. Monte carlo simulation by using a systematic approach to assess distribution system reliability considering intentional islanding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1): 64-73.
- [9] 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 Shengmin, WANG Haohao, GUAN Lin. 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. (In Chinese)
- [10] 王昌照,汪隆君,王钢,等. 分布式电源出力与负荷相关性对配电网可靠性的影响分析[J]. 电力自动化设备,2015,35(6):99-105.
WANG Changzhao, WANG Longjun, WANG Gang, et al. Impact of distributed generation output and load correlation on distribution network reliability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 99-105. (In Chinese)
- [11] 林灏凡,王怀智,余涛,等. 基于开关分级传递的配电网可靠性评估快速算法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(增刊):54-60.
LIN Haofan, WANG Huaizhi, YU Tao, et al. Reliability indexes hierarchical delivering algorithm for distribution network reliability evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(S): 54-60. (In Chinese)
- [12] 赵腾,张焰,张东霞. 智能配电网大数据应用技术与前景分析[J]. 电网技术,2014,38(12):3305-3312.
ZHAO Teng, ZHANG Yan, ZHANG Dongxia. Application technology of big data in smart distribution grid and its prospect analysis[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3305-3312. (In Chinese)
- [13] 陈雪,罗毅初,黄科维,等. 基于 GIS 系统拓扑数据的配电网改进最小路可靠性算法[J]. 南方电网技术,2017,11(1):1-7.
CHEN Xue, LUO Yichu, HUANG Kewei, et al. GIS data based improved minimal path method for distribution network reliability[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(1): 1-7. (In Chinese)
- [14] 胡丽娟,刁赢龙,刘科研,等. 基于大数据技术的配电网运行可靠性分析[J]. 电网技术,2017,41(1):265-271.
HU Lijuan, DIAO Yinglong, LIU Keyan, et al. Operational reliability analysis of distribution network based on big data technology[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 265-271. (In Chinese)
- [15] 江亚群,陈祝峰,黄纯,等. 基于启发式规则与和声搜索的配电网重构算法[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2014,41(3):61-67.
JIANG Yaquin, CHEN Zhufeng, HUANG Chun, et al. Distribution network reconfiguration based on heuristic rules and harmony search algorithm[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41(3): 61-67. (In Chinese)
- [16] BAKER J E. Adaptive selection methods for genetic algorithms[C] // First International Conference on Genetic Algorithms and Their Application, 1985:867-872.
- [17] 阿里 A 乔杜里,唐·科瓦尔. 配电系统可靠性:实践方法及应用[M]. 北京:中国电力出版社,2013:70-71.
ALI A Chowdhury, DON O Koval. Power distribution system reliability: Practical methods and applications[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013: 70-71. (In Chinese)
- [18] ALLAN R N, BILLINTON R, SJARIEF I, et al. A reliability test system for educational purposes-basic distribution system data and results[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 813-820.