配电网故障风险预警系统开发与应用

为了及时了解配电网的故障状态，开发了一套配电网故障风险预警系统。从配电自动化等系统获取实时运行数据，管理信息系统等获取配电网设备参数，利用设备重要程度和设备故障概率两个参数计算出设备故障风险值，进而计算出馈线级、系统级的故障风险值。当风险值超过预定的阈值时，自动进行告警处理。系统运行结果表明，通过故障预警，能够及时发现故障隐患，提高供电可靠性。

李天友[1] 陈敏维[1] 韩国政[2] 林智远[1]/1.国网福建省电力有限公司 2.齐鲁工业大学电气工程与自动化学院

李天友/高级工程师

关键词/Keywords
配电网故障·
风险评估·
风险预警·
设备故障概率·

根据我国电监会的统计[1]，配电网引起的故障停电时间占到用户故障停电时间的80%以上。及时准确掌握配电网的运行状态，实现配电网故障风险值的实时计算和预警，对于减少故障停电时间和次数，提高用户供电质量有着重要的意义。

国内外的专家学者对配电网故障风险的评估已开展了广泛的研究，并取得了一些成果[2-5]。由于配电网本身的复杂性和运行状态的多变性，实现故障风险实时在线计算和预警的相关案例还不是很多。本文提出了一种将设备重要程度与设备故障概率相结合的计算故障风险值的方法，并开发了相应的系统，实现了配电网故障的在线预警。

配电网故障风险预警系统整体结构

1. 配电网的故障对象

配电网一般采用闭环设计、开环运行的方式。在实际运行中，配电网中的馈线一般只通过联络开关进行关联，配电网的运行方式以辐射状为主。

国家电网公司科技项目（技术031[2012]19）。

配电网由多条汇合于变电站低压侧母线的馈线构成，各条馈线又由众多的电力设备组成，因而配电网故障风险涵盖了以下3个方面：设备级故障风险、馈线级故障风险和系统级故障风险。配电网设备级风险评估对象主要包括架空线、电缆线、杆上设备、杆上变压器以及站房设备。馈线是由支路、配电变压器、开关和负荷组成的网络。系统级是由馈线组成的网络。因此，设备级故障风险是馈线上的不同设备发生故障后带来的风险，它是馈线级故障风险的评估基础，而馈线级故障风险又是系统级故障风险的评估基础。

2. 预警系统整体结构

配电网故障风险预警系统的整体结构如图 1所示。设备故障风险主要由两个维度构成，即设备的重要程度和设备故障概率。设备的重要程度通过其停电带来的后果大小进行表征，故障停电后果严重的设备，其在配电网中的重要程度就越高，其停电带来的风险就越大。设备故障概率表示设备发生故障的可能性，概率越大的设备越容易发生故障。馈线级的故障风险通过计算来源于该馈

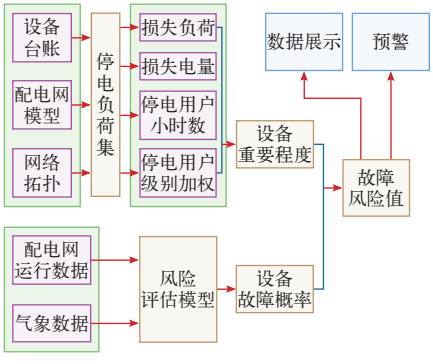

图1 配电网故障风险预警系统的整体结构

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

线上设备发生故障的风险获得，系统故障风险表示系统中所有设备的故障风险。

计算出故障风险值后可以进行多方位、可视化的展示，给用户以直观的显示，及时发现、排除故障及故障隐患。故障风险值超过一定的阈值后，起动预警程序，进行故障预警，以减少故障发生的可能性，提高供电可靠性。

配电网故障风险值计算

1. 设备级故障风险值计算

（1）设备重要程度计算

配电网馈线上设备发生故障后，主要是通过熔断器、断路器或负荷开关的熔断或分闸操作将故障段隔离，并通过自动重合闸和联络开关合闸操作实现对非故障段的继续供电。对于配电网中的不同设备，其故障发生后的后果影响不尽相同，有的波及范围广，有的影响较小。

配电网中各设备的故障影响程度，即设备的重要程度。设备的重要程度可以用其故障停电带来的后果进行表征，故障停电后果严重的设备，其在配电网中的重要程度就越高，其停电带来的风险就越大。设备故障停电带来的后果主要是针对供电企业、负荷或电力用户而言的，且与供电可靠性密切相关。为此，构建以下反映设备重要程度的指标[6]：损失负荷（LL）、损失电量（LE）、停电用户小时数（POUH）和停电用户级别加权（WPOU）指标，如图1所示。

（2）设备故障概率计算

设备故障的发生主要是内部因素和外部因素共同作用的结果。内部因素主要包括设备运行过负荷、设备缺陷、设备隐患和设备使用年限（设备老化）；外部因素主要包括风雨、雷击等天气因素以及施工破坏、异物等，这些主要因素构成了配电网设备故障的风险源。

建立各风险源状态与各风险源导致各类设备发生故障概率间的对应关系。其中，设备自身因素所引起的风险源的状态可用设备使用年限以及设备本身的故障率表示；设备运行过负荷风险源的状态为过负荷级别；风雨、雷击以及施工风险源的状态为0或1，存在时为1，否则为0。

（3）设备故障风险值计算

设备故障风险值为设备故障概率与设备重要程度的乘积，设备重要程度取值范围为0～1，设备发生故障概率取值范围为0～1。如配电网中某设备的重要度为0.6，在某评估时段上，考虑各风险源后该设备的故障概率为0.025，则该设备的故障风险值为0.015。

2. 馈线级故障风险值计算

馈线级故障风险来源于该馈线上设备发生故障的风险，馈线上各主要设备均存在一个故障风险值。反映馈线级风险大小情况的指标为该馈线上设备风险的均值、最大值和次大值。

考虑到配电网风险的多面性和复杂性，单一指标受随机误差的影响会相应大一些，为减少随机误差带来的不良影响，将各分项指标进行综合，建立馈线风险评价的综合指标。

3. 系统级故障风险值计算

配电网由多条馈线构成，因而系统级故障风险来源于馈线级故障风险。考虑到不同的接地方式对配电网可靠性的影响不同（小电流接地可以带故障运行2 h，而大电流接地需要马上切除故障），需要将中性点接地方式因素考虑在配电网系统故障风险值中。为此，将中性点接线方式作为一个指标。

配电网故障在线预警方法

配电网故障在线预警是基于配电网故障风险值计算结果的，当风险值超过预设的阈值时就进行告警。根据故障监测的对象可分为设备级预警、馈线级预警和系统级预警3种方式。

1. 设备级预警

根据配电网运行实际情况，对设备故障风险值设定合理的阈值，当某设备故障风险值超过设定的阈值，系统进行着色、闪烁等预警，基于相关数据库操作，按设备故障风险值大小进行排序，同时可查询其风险源，从而帮助配电网运维人员在查看该设备主要风险源因素后有针对性地采取必要的防范措施。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2. 馈线级预警

通过计算各馈线的风险综合指标，找出其中风险最大的馈线作为重点关注对象，进一步对该馈线上各设备风险的实际情况进行观察，实现对关键馈线及其设备的风险和馈线上敏感性负荷用户数的查询。同时，根据配电网运行实际情况，对馈线故障风险值设定合理的阈值，当配电网某条馈线的故障风险值超过设定的阈值，系统进行着色、闪烁等预警。

3. 系统级预警

根据配电网运行实际情况，对配电网系统故障风险值设定合理的阈值，当配电网系统故障风险值超过设定的阈值，系统进行着色、闪烁等预警，基于相关数据库操作，可查询与系统故障风险值对应的馈线故障风险相关信息。

系统开发

1. 基本功能

配电网故障风险预警系统的基本功能为：①配电网设备重要程度评估；②配电网设备风险源监测、识别；③基于风险源状态，评估配电网设备故障概率；④配电网设备故障风险值、馈线故障风险值和系统故障风险值的计算，按风险值高低排序；⑤根据配电网故障风险的严重程度，当风险值超过设定的阈值时，系统进行着色、闪烁等安全预警；⑥提示配电网运行薄弱环节，并可查看风险源，为系统运行维护人员制订相应的预防控制措施提供支持。

2. 系统架构

配电网故障风险预警系统的软件实现主要包括两个部分，即故障风险评估计算模块和数据接口模块。系统架构如图 2所示。

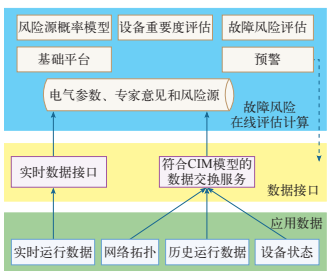

图2 系统架构

（1）数据接口模块

图2中，配电网实时运行数据具有实时要求，通过专用的实时数据接口接入到电气参数数据库中，配电网网络拓扑、设备状态和历史数据等实时性要求不高的数据转换成符合国际电工委员会（International Electrotechnical Commission，IEC）公共信息模型（Common Information Model，CIM）存入到电气参数数据库中。

（2）故障风险评估计算模块

故障风险评估计算模块是系统实现的核心，主要包括：

1）配电网电气参数数据库。数据库中主要存放了配电网中各主要设备的参数、历史运行数据等。为其他功能模块提供数据支持。

2）基础平台。提供系列通用服务工具，包括：电网模型管理、电网图形服务和权限管理等。

3）设备重要程度评估。根据配电网拓扑结构、系统故障转载能力情况以及配电网运行历史数据，运用故障遍历法和综合评价法评估各设备在配电网中的重要程度。

4）风险源概率模型。在线监测配电网设备运行风险源状态，结合风险源概率统计表，利用概率理论计算配电网设备实时故障概率。

5）配电网故障风险评估。结合设备的重要程度以及实时的设备故障概率指标，评估配电网中各设备故障风险的高低，进而评估配电网馈线及系统级故障风险。

6）预警模块。当故障风险值超过设定的阈值时，系统进行着色、闪烁等安全预警，并可进行风险源查询。

3. 可视化与人机交互功能

（1）多层次的配电网风险评估可视化界面

为全面和深入地了解配电网不同评估点的故障风险情况，系统提供了配电网、馈线和设备3种故障风险可视化界面，如图 3所示。

（2）接线图和地理图两种背景模式

电网接线图在电网应用系统中十分常见，具有简单、直观和应用广泛的优势，而电网地理图则表达了电网对象的实际地理位置信息，具有信

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图3　配电网故障风险展示界面

息丰富、真实感强和易于理解的优势。系统提供了接线图和地理图两种背景模式，支持接线图/地理图模式切换。

（3）丰富的可视化和交互功能

为了使风险信息的表达更加直观有效，系统提供了基于图形的风险可视化方法和基于统计图表可视化两种方式实现风险信息可视化的功能。图形展示在接线图/地理图上着色、闪烁超过预警阈值的设备，直接展示了有哪些设备超过预警阀值以及这些设备的分布情况，并且可进一步查询相关的风险数据。该方法可以对所有配电网对象、所有故障风险信息进行全面查询和表达，也是一种有效的辅助可视化方法，包括与配电网当前故障风险、模拟态故障风险和历史故障风险曲线相关的各种窗体、盘表、表格、图表和曲线等。

实际应用

2013年7月，配电网故障风险预警系统开发完成，在福建厦门开始实际运行。2013年7月18日22时～7月19日9时洪塘安置房5#风险走势图如图4所示。由图4可以看出，22：00～3：00由于运行电流较大，该设备风险值较高；3：00～4：00由于受台风西马仑的影响，厦门地区有强降雨，该设备风险值较高。

结束语

采用设备重要程度和设备故障概率计算出设备故障风险值，进而计算出馈线故障风险值、系统故障风险值。当风险值超过预定的阈值时，进行故障预警。

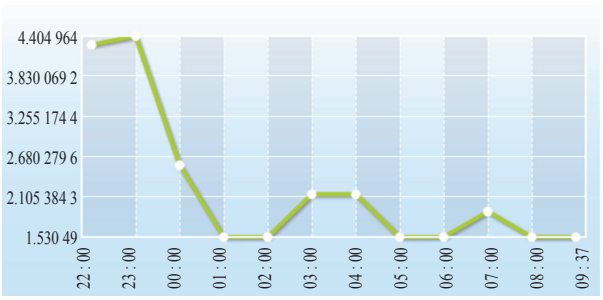

图4　设备风险走势图

在此基础上开发出了配电网故障风险预警系统，实现了配电网故障风险值的实时计算和在线预警。系统运行结果表明，通过故障预警，及时的进行设备检修，提高了设备检修的针对性，既能减少检修的次数，又可以提高供电可靠性，是配电设备状态检修有益的尝试。

参考文献

[1] 胡小正，王鹏．2009年全国城市用户供电可靠性现状分析 [J]．供用电，2010，27 (5)：15-18，30.

[2] Das D，Wallenberg B F．Risk Assessment of generators bidding in day-aheadmarket [J]．IEEE Transactions on Power Systems，2005，20 (1)：416-424.

[3] 吴文传，宁辽逸，张伯明，等．电力系统在线运行风险评估与决策 [J]．电力科学与技术学报，2009，24 (2)：28-33.

[4] Ni Ming，Mc Calley James D，Vittal V，et al．On-line risk-based security assessment [J]．IEEE Transactions on Power Systems，2003，18 (1)：258 -265.

[5] 赵会茹，李娜娜，李天友，等．基于AHP—云模型配电网故障对象的停电后果评估 [J]．华东电力，2013，41 (7)：1456-1460.

[6] 赵会茹，欧大昌，张奇，等．基于ANP灰色关联的电力用户重要性评估 [J]．能源技术经济，2012，24 (7)：38-43.

（收稿日期：2014－03－10）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net