

DOI: 10.7667/PSPC170981

基于拓扑建模和关联集分解的电网设备风险评估技术

牛进苍¹, 许奕斌², 辜超¹, 楼贤嗣², 郭创新²

(1. 国网山东电科院, 山东 济南 250061; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对当前基于风险的检修辅助决策在工程实践方面的不足, 提出一种基于拓扑建模和关联集分解的电网设备风险评估技术方案。通过解析 IEC61970 标准的公共信息模型数据, 建立电网拓扑的等值模型, 同时为简化分析, 引入设备关联集的概念作为风险评估的基本单元。基于设备停运模型、故障筛选策略及最优切负荷模型, 评估关联集停运引起的电网 $N-1$ 运行风险, 并利用风险评估结果指导设备检修决策。结合山东电网应用实例, 展示了该技术方案对检修决策的指导意义。

关键词: 公共信息模型; 风险评估; 设备关联集; 电网拓扑

Risk assessment technique for power equipment based on topology modeling and association sets decomposition

NIU Jincang¹, XU Yibin², GU Chao¹, LOU Xiansi², GUO Chuangxin²

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250061, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In view of the deficiency of risk based maintenance assistant decision-making in engineering practice, a risk assessment technique for power equipment based on topology modeling and association sets decomposition is proposed. Based on the analysis of IEC61970 standard CIM data, the equivalent model of power grid topology is established, and the concept of Equipment Association Set is introduced as the basic unit of risk assessment for simplified analysis. Based on the outage model, the contingency screening strategy and the optimal load shedding model, the $N-1$ operational risk caused by the association set outage is evaluated. The application example of Shandong power grid has demonstrated the guidance significance of the proposed technique for maintenance decision.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA050204) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 520626150032).

Key words: CIM; risk assessment; equipment association sets; power grid topology

0 引言

识别系统薄弱设备对于电力系统可靠运行、防止大面积停电具有重要意义。对于“薄弱”程度的量化, 国内外学者给出了诸如灵敏度^[1]、结构脆弱性^[2]之类的指标, 但有其各自局限性。从薄弱设备的风险意义出发, 文献[3-5]提出了基于风险的检修(Risk Based Maintenance, RBM)的概念。RBM是以电网设备风险评估为基础, 分析设备停运的概率及可能造成的各种损失, 从而辨识出迫切需要检修的

设备, 以此指导状态检修决策。RBM使检修决策更为经济和科学, 具有很好的应用前景。对RBM辅助决策的现有研究主要集中于风险评估的理论分析, 而工程应用的实例较少。

为解决上述问题, 本文面向工程研发, 提出一种基于拓扑建模和关联集分解的电网设备风险评估技术方案。该方案遵循从设备个体损失拓展到电网运行风险的思路, 将设备在电网的地位纳入设备风险的考量中^[6-7]。拓扑建模是实现风险评估从设备层面过渡到系统层面的基础, 关联集则体现了设备间的功能关联性^[8-9], 二者结合可全面统筹地构建设备与电网之间的关联模型。

本文所提风险评估技术中, 首先基于 IEC61970

公共信息模型(Common Information Model, CIM)数据的解析, 建立电网拓扑的等值模型; 其次, 为简化风险评估过程, 引入设备关联集的概念作为风险评估的基本单元; 随后, 基于设备停运模型、故障集筛选策略及最优切负荷模型, 构建电网 $N-1$ 运行风险评估模块, 计算各关联集的风险, 并利用风险评估结果指导设备检修决策; 最后, 对该技术在国网山东省电力公司输变电设备状态评估平台上的应用效果作了详细说明。

1 基于 CIM 的电网拓扑建模

电网拓扑模型是对电网所有设备及其逻辑连接关系的抽象。本文借助 CIM 数据实现电网拓扑建模。CIM 规定了能量管理系统应用程序接口(EMS-API)的语义^[10], 其目的是实现系统信息的开放和一体化, 促进电力系统各种应用与 EMS 之间的信息共享和功能解耦^[11-12]。本文应用了 CIM 的核心包(Core)和拓扑包(Topology), 在其数据解析的基础上生成 IEEEIsland 格式的电网拓扑模型。

核心包主要描述设备的层次关系, 拓扑包中的一组导电设备(Conducting Equipment)构成核心包中的间隔(Bay)和电压等级(Voltage Level)。拓扑包描述了设备间的物理连接关系, 如图 1 所示, 用元件(Device)、端子(Terminal)和连通点(Connectivity Node, CN)三种模型来描述设备连接关系^[13]。元件包括发电机、变压器绕组、线路、负荷、母线及开关等; 端子代表从属于元件并与电网相连的连接点, 发电机、负荷等具有 1 个端子, 线路、绕组、开关等具有 2 个端子, 母线可具有 3 个以上端子; 连通点的功能是将端子与端子匹配起来, 多个端子从属于一个连通点。

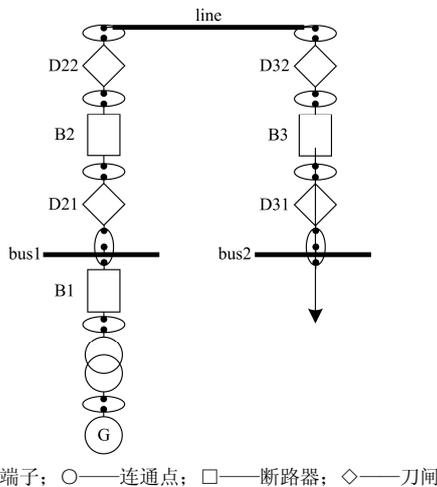


图 1 电网对应 CIM 模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CIM model of power grid

在读取所有电网元件信息后, 根据各元件之间物理连接关系可生成初步的“元件网络”, 称为 Model 对象。在此基础上, 读取某一电网运行断面 SCADA 数据中的开关量信息, 将所有状态为“1”的开关元件闭合, 可进行拓扑收缩。若两个连通点之间的开关元件闭合, 则两个连通点可收缩为一个拓扑节点(Topological Node, TN), 即隐去开关元件。经过如图 2 所示的拓扑收缩, 物理连接关系转化为逻辑连接关系, 电网模型精简为仅含有拓扑节点和支路的点-线图, 称为 Bridge 对象。

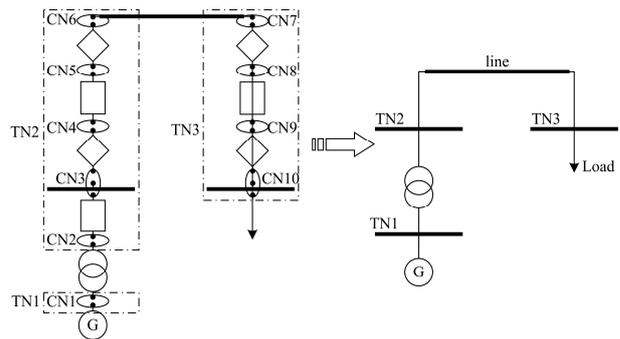


图 2 拓扑收缩示意图

Fig. 2 Schematic diagram of topological contraction

继续读取 SCADA 数据中的模拟量测信息, 即支路潮流和节点电压等, 则构成具有完整电气量数据的“电气岛”, 称为 IEEEIsland 对象, 作为电网拓扑的等值模型。

在纳入线路容量、机组容量和主变容量等约束信息后, 可将 IEEEIsland 对象转化为 Psat 格式的电网标准潮流计算数据(bus/branch data), 作为电网运行风险评估的基础。

电网 CIM 文件解析及拓扑模型生成的流程图如图 3 所示。

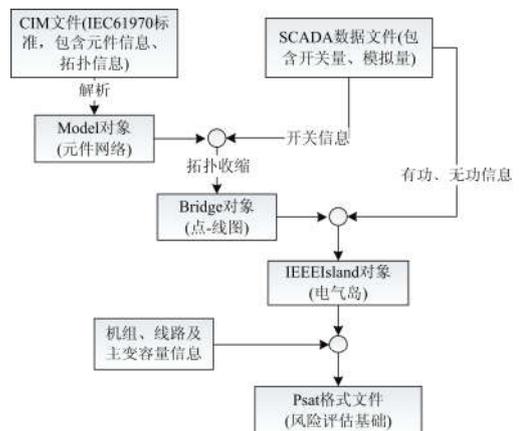


图 3 基于 CIM 的电网拓扑模型生成流程图

Fig. 3 Flow chart of power grid topology model generation based on CIM

2 风险评估基本单元——设备关联集

电网拓扑模型中,“支路”表征了线路或变压器绕组,但电网中的设备类型不止于此,因此需要扩展“支路”的概念,使拓扑模型中纳入更多的设备。本文借鉴文献[8-9],以拓扑支路为核心,引入设备关联集的概念。设备关联集是指电网中功能相互关联的设备所构成的集合。一般地,在经过故障后的切换操作之后,发生整体停运的设备从属于一个关联集。通过分析可知,两个拓扑节点之间的设备集合可组成关联集,一般包含线路或绕组、断路器、隔离开关、接地开关、避雷器和高抗等。

对于简单的线路而言,设备关联集如图4所示。向线路两端搜索端子互相连通的元件,可依次搜索到隔离开关、断路器和连接于母线的隔离开关等(接地开关因不影响线路停运暂不考虑)。对于复杂线路,会搜索到联络断路器、直流平波电抗器等设备。在设备关联集中,若某一设备检修或故障会导致整个关联集停运,则称为关键设备,其故障率直接影响关联集整体停运概率。其余具有并联互补关系的设备,称为互补设备。将电网分解成不同的设备关联集的具体流程如图5所示。

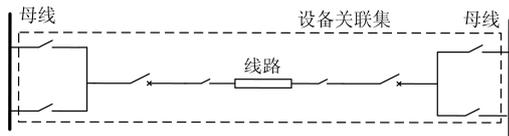


图4 设备关联集示意图

Fig. 4 Schematic diagram of equipment association set

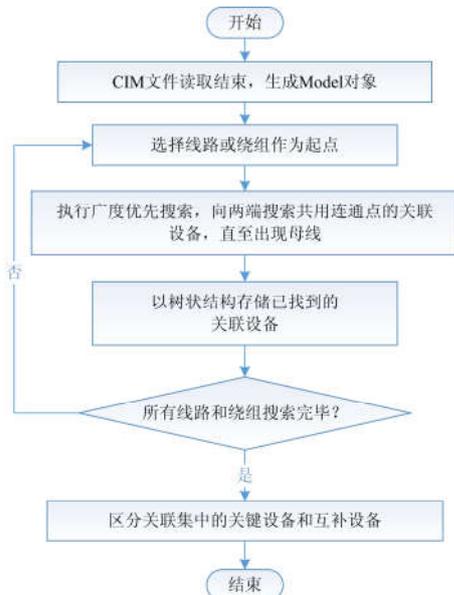


图5 关联集分解流程图

Fig. 5 Flow chart of association sets decomposition

关联集和电网拓扑中的支路为一一对应关系,是只含有一个线路或绕组的元件集合。虽然电网元件数量众多,但线路和绕组数量相对较少,因此以关联集为基本单元可以提高风险评估的效率。

3 风险评估技术

3.1 技术架构

基于前两节所述的拓扑建模和关联集分解,可形成如图6所示的设备风险评估技术架构,该技术架构可实现从数据采集到风险分析再到应用决策的完整过程。

基础层通过采集和分析数据层的信息,获得设备状态评价结果和以拓扑建模为核心、以关联集为基本单元的设备-电网关联模型。核心层通过建立设备停运模型,获得设备实时故障概率,并筛选出停运概率较高的关联集,进行预想故障集下的电网运行风险评估。应用层根据风险评估结果,决定需要检修的设备及其检修先后顺序,从而指导状态检修决策。

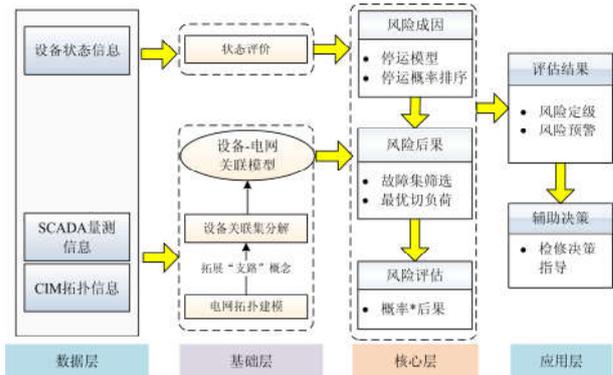


图6 设备风险评估技术架构

Fig. 6 Architecture of equipment risk assessment technique

3.2 关联集停运概率

故障停运模型^[14]是电网风险评估的首要环节。本文采用健康指数模型^[15],建立设备状态与故障率之间的关系,从而预测设备故障停运的概率。健康指数(Health Index, HI)是根据设备在线监测信息、巡检记录和定期试验结果等数据制定的反映设备健康状态的量化指标,能表征设备状态评价结果。

考虑设备老化作用及检修的影响,在研究周期内, t 时刻的设备健康指数满足式(1)。

$$\begin{cases} HI(t) = HI_0 \cdot e^{B(t+\Delta t)}, & t < t_m \\ HI(t) = \beta HI_0 \cdot e^{B(t+\Delta t - T_m)}, & t > t_m + T_m \end{cases} \quad (1)$$

式中: B 表示老化系数; β 表示检修影响下的健康修复因子; HI_0 为上一次状态评价结果; Δt 为距离

上一次状态评价的时间； t_m 为检修开始时刻； T_m 为检修持续时间。

根据国网《输变电设备风险评估导则》，健康指数 HI 和设备平均故障率 λ 的关系可表示为

$$\lambda = k \cdot e^{-c \cdot HI} \quad (2)$$

式中： k 为比例系数； c 为曲率系数。均为采用统计数据拟合的正常数。

根据设备实时故障率，可按式(3)推算出设备在研究周期内故障停运的概率。

$$f(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (3)$$

关联集中，对于共用两个连通点的互补设备，将停运概率最大者作为这两个连通点之间的停运概率，且将该设备归为关键设备。关联集中的关键设备为逻辑串联关系，因此关联集处于工作状态的概率表示为集合内 n 个关键设备工作概率的乘积，关联集的停运概率如式(4)所示。

$$F(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - f_i(t)) \quad (4)$$

在获得所有关联集的停运概率之后，为提高风险评估的效率，筛选出停运概率较高的关联集，优先评估其停运引起的电网 $N-1$ 运行风险。

3.3 故障集筛选

风险评估的基本思路是选择事故场景，分析计算各场景下的风险指标，并累计得出综合风险指标。对于复杂系统，选择事故场景的方法包括故障筛选法和蒙特卡罗模拟法。后者采样规模较大，收敛时间较长，为减少风险评估时间，采用故障筛选法。

本文采用文献[16]提出的概率有序树故障筛选法，通过更少的搜索次数和比较次数得到系统预想故障集，且算法复杂度与系统规模无关，适用于大型系统的风险评估。

3.4 电网运行风险评估

本文以期望缺供电量(EENS)作为电网 $N-1$ 故障引起的系统损失的量度^[17]。例如，评价关联集 A 停运引起的电网运行风险，先将关联集 A 移出拓扑，在此 $N-1$ 基础上，通过 3.3 节所述故障筛选方法，选择合适数目的事故场景($N-1-1$ 或 $N-1-2$ 事故)，基于事故场景计算关联集 A 停运引起的期望减供负荷，由此衡量其电网运行风险，如式(5)所示。

$$R_{isk} = \sum_{s \in S} \left(\Pr(s) \cdot \sum_d^{ND} \Delta P_{d,s}^{shed} \right) \quad (5)$$

式中： S 为经过筛选的故障集； $\Pr(s)$ 为场景 s 发生的概率； $\Delta P_{d,s}^{shed}$ 为场景 s 引起的负荷节点 d 失负荷量。

系统在每个场景下的失负荷量由基于直流潮流

的最优切负荷模型计算得到。其具体目标函数及约束如式(6)一式(11)所示。

$$\min \sum_d^{ND} \Delta P_d^{shed} \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j|o(j)=k} F_j - \sum_{j|d(j)=k} F_j = \quad (7)$$

$$\sum_{i \in k} P_i - \sum_{d \in k} (P_d^D - \Delta P_d^{shed}), \forall k$$

$$F_j = B_j (\theta_j^F - \theta_j^T), \forall j \quad (8)$$

$$|F_j| \leq F_j^{\max}, \forall j \quad (9)$$

$$0 \leq \Delta P_d^{shed} \leq P_d^D, \forall d \quad (10)$$

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}, \forall i \quad (11)$$

式(7)一式(11)分别为节点有功平衡约束、直流潮流方程、潮流安全约束、切负荷量约束、发电机出力约束。 $\sum_{j|o(j)=k} F_j$ 为节点 k 输出功率， $\sum_{j|d(j)=k} F_j$ 为

节点 k 注入功率， $i \in k$ 和 $d \in k$ 分别表示与节点 k 关联的机组和负荷； F_j 为线路 j 的潮流； B_j 为线路 j 的电纳； θ_j^F 和 θ_j^T 分别为线路 j 的首末节点相角；

P_i 为机组 i 的出力； P_d^D 为节点 d 上的负荷总量； P_i^{\min} 和 P_i^{\max} 分别为机组 i 最小及最大出力值。

3.5 辅助决策

获取风险评估结果之后，对风险发生概率、风险严重程度分别进行定级。以关联集故障概率数量级达到 1×10^{-6} 为阈值，将风险发生概率 1×10^{-4} 以上设为一级，将 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$ 设为二级，将 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$ 设为三级。风险严重程度按减供负荷量占负荷总量的比例来衡量，减供负荷 10% 以上定为一，5%~10% 定为二级，2%~5% 定为三级。风险综合定级的具体原则^[18]如表 1 所示。

表 1 风险定级方案

Table 1 Risk rating scheme

风险严重程度等级	风险综合等级		
	风险发生概率为一级	风险发生概率为二级	风险发生概率为三级
一级	一级	一级	二级
二级	二级	二级	二级
三级	二级	三级	三级

经过风险定级之后，一方面将停电风险成因、后果及影响范围等信息推送给调度员，通过 SVG 染色闪烁的方式进行风险预警，呈现于可视化界面上；另一方面形成检修决策指导意见，优先考虑风险等级较高的设备关联集，尽早对其检修能将电网运行风险降至最低。

4 应用实例

本文所提出的电网设备风险评估技术已在山东省电力公司输变电设备状态评估平台得到初步应用。基于该技术的应用采用 Java 和 Matlab 编写后台算法, 基于 JavaScript 搭建 B/S 架构前台, 基于 CIM 与 EMS 进行数据交互, 基于 Oracle 数据库存储和更新风险评估结果。

经过 CIM 文件解析和 SCADA 数据的读取, 生成山东电网在某一时刻运行方式下的等值模型, 包含 3 160 个节点及 3 676 条支路。此外, 针对拓扑中所有线路和变压器绕组进行了关联集搜索, 将各个设备与其对应的关联集(拓扑支路)进行匹配, 并计算关联集的综合停运概率。部分设备与关联集对应实例如表 2 所示。

表 2 设备-关联集对应实例

Table 2 Examples of equipment corresponding to association sets

设备名称	设备类型	所属关联集
明集站/220 kV.211-3 刀闸	隔离开关	明西线
西王站/220 kV.212-3 刀闸	隔离开关	明西线
明集站/220 kV.明西线 211 开关	断路器	明西线
明西线	线路	明西线
西王站/220 kV.明西线 212 开关	断路器	明西线
君山站/220 kV.202-3 刀闸	隔离开关	君山站/220 kV.#2 主变-高
君山站/220 kV.#2 主变-高	绕组	君山站/220 kV.#2 主变-高
君山站/220 kV.#2 主变 202 开关	断路器	君山站/220 kV.#2 主变-高

经过关联集停运概率计算及排序、动态预想故障场景生成、关联集 $N-1$ 风险评估和风险定级等, 得出如表 3 所示风险等级较高的关联集 $N-1$ 运行风险。对于每条风险, 其风险信息还包含减供负荷的具体节点等细节。例如, 外网.清沧线发生故障停运后, 武邑站、宗州站、沧西站的期望减供负荷分别为 131.15 MW、166.91 MW、78.55 MW; 照峪线发生故障停运后, 五莲站、西峪站的期望减供负荷分别为 46.09 MW、124.43 MW。

上述运行结果是针对某一电网运行断面的风险评估。实际应用中, SCADA 量测数据、设备状态评价数据等, 会按照要求的时间间隔或人工触发方式, 发布数据文件或传输数据流, 平台会自动定时扫描服务器文件目录或检测数据流, 从而获取实时数据。因此, 本文所提技术可动态、实时地掌握电网运行方式和设备状态, 提供多个时间尺度的风险评估信息, 使运检人员掌握全过程、多维度的设备风险。

此外, 结合地理信息系统 GIS 的地理接线信息, 可通过 SVG 染色闪烁的方式进行风险预警, 使调度运行管理模式实现由“事后分析型”向“事前预防型”的转变。制定检修计划的人员可根据不同要求, 从故障概率等级、后果等级、风险等级三个维度选择优先检修的设备。

表 3 风险评估结果

Table 3 Risk assessment result

关联集名称	故障概率等级	$N-1$ 期望缺供电量/MW	后果等级	风险等级
外网.沧邑线	二级	858.23	一级	一级
外网.宗邑线	二级	386.99	一级	一级
邹枣线	三级	616.06	一级	二级
鲁密线	三级	403.70	一级	二级
外网.清沧线	三级	376.61	一级	二级
楼三线	三级	304.05	一级	二级
沈城 I 线	三级	291.55	一级	二级
十岩线	二级	225.71	二级	二级
琅董 II 线	三级	208.42	二级	二级
崂空线	二级	192.63	三级	三级
照峪线	三级	170.52	三级	三级
宜午线	三级	158.05	三级	三级

5 结语

本文针对 RBM 辅助决策在工程实践中的不足, 依据状态检修的需求, 设计一种基于拓扑建模和关联集分解的电网设备 $N-1$ 运行风险评估技术。目前, 该技术在山东省电力公司已得到初步应用, 实践表明该技术具有以下优点:

1) 风险评估的数据源大部分可从 EMS 获取, 如 CIM 文件、SCADA 量测信息, 因此能充分利用 EMS-API, 动态、全面地掌握电网资源信息和运行方式信息, 提供实时的设备运行风险。

2) 将电力系统分解为关联集的有机组成, 统筹了设备之间、设备与电网间的功能关联性, 同时在不降低风险评估效率的前提下, 增加了所考虑设备的类型, 对检修计划更具有指导意义。

3) 评估的过程利用了快速有效的故障筛选算法, 提高了风险评估精度。所提供的风险信息较为详尽, 包含了风险成因、发生概率等级、各站点减供负荷以及综合风险等级, 使运检人员及时把握风险态势, 指导其做出合理有效的检修和运行决策。

参考文献

- [1] 岳贤龙, 王涛, 顾雪平, 等. 基于自组织临界理论的电网脆弱线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 18-26.
YUE Xianlong, WANG Tao, GU Xueping, et al. Vulnerable line identification of power grid based on self-organizing

- critical theory[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 18-26.
- [2] 刘小丽, 毛弋, 梁杉, 等. 基于综合介数的电网脆弱线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 116-121. LIU Xiaoli, MAO Yi, LIANG Shan, et al. Identification of vulnerable lines in power grid based on comprehensive betweenness index[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 116-121.
- [3] 赵明欣, 鲁宗相, 吴林林, 等. 基于风险评估的输变电设备维修技术[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(19): 30-35. ZHAO Mingxin, LU Zongxiang, WU Linlin, et al. Risk assessment based maintenance technology for electric transmission equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19): 30-35.
- [4] 刘明军, 邵周策, 上官帖, 等. 输电线路山火故障风险评估模型及评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 82-89. LIU Mingjun, SHAO Zhouce, SHANGGUAN Tie, et al. Study on models and methods of risk assessment of transmission line fault caused by fire[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 82-89.
- [5] YONG Jiang, MCCALLEY J D, VOORHIS T V. Risk-based resource optimization for transmission system maintenance[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1191-1200.
- [6] 李明, 韩学山, 杨明, 等. 电网状态检修概念与理论基础研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 43-52. LI Ming, HAN Xueshan, YANG Ming, et al. Basic concept and study theory of condition-based maintenance for power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 43-52.
- [7] CAMCI F. System maintenance scheduling with prognostics information using genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2009, 58(3): 539-552.
- [8] 徐波, 韩学山, 刘长银, 等. 基于关联集分解的系统状态检修决策模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2): 46-52, 86. XU Bo, HAN Xueshan, LIU Changyin, et al. Condition-based maintenance decision-making model for power system based on association sets decomposition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 46-52, 86.
- [9] 陈璨, 吴文传, 张伯明, 等. 基于元件组的复杂配电网可靠性评估[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 81-86. CHEN Can, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Reliability evaluation for large-scale distribution network based on component groups[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 81-86.
- [10] 汪华. 基于公共信息模型的电网建模[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 186-188. WANG Hua. Power network model based on CIM[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 186-188.
- [11] 高海洋, 张焰, 张旭明. 基于 IEC61970 公共信息模型的地区电网操作票系统研究[J]. 华东电力, 2006, 34(12): 41-44. GAO Haiyang, ZHANG Yan, ZHANG Xuming. Regional grid operation order generation systems based on IEC61970 common information model[J]. East China Electric Power, 2006, 34(12): 41-44.
- [12] 潘凯岩, 寇强, 郑涛, 等. 基于公共信息模型的 EMS/DMS/DTS 一体化设计[J]. 电网技术, 2004, 28(18): 62-65. PAN Kaiyan, KOU Qiang, ZHENG Tao, et al. Integrated design of EMS/DMS/DTS based on CIM[J]. Power System Technology, 2004, 28(18): 62-65.
- [13] IEC 61970-301: energy management system application program interface (EMS-API) - part 301: common information model (CIM) base[S].
- [14] SUN Qiming, SHI Libao, NI Yixin, et al. An enhanced cascading failure model integrating data mining technique[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 19-28. DOI: 10.1186/s41601-017-0035-3.
- [15] 唐燕, 刘艳. 考虑电网总风险和检修收益的设备状态检修计划优化[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 33-39. TANG Yan, LIU Yan. Optimization for maintenance schedule based on equipment condition considering the overall risk of grid operation and the maintenance revenue[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 33-39.
- [16] 焦昊, 文云峰, 郭创新, 等. 基于概率有序树的预想故障集贪心筛选算法及其在可靠性评估中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2068-2076. JIAO Hao, WEN Yunfeng, GUO Chuangxin, et al. A greedy algorithm for contingency screening based on probability ordered tree and its application in reliability assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2068-2076.
- [17] OTHMAN M M, KASIM S R, SALIM N A, et al. Risk based uncertainty (RibUt) assessment of a power system using bootstrap technique[C] // Power Engineering and Optimization Conference, June 6-7, 2012, Melaka, Malaysia: 460-464.
- [18] 王一枫, 汤伟, 刘路登, 等. 电网运行风险评估与定级体系的构建及应用[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 141-148. WANG Yifeng, TANG Wei, LIU Ludeng, et al. Construction and application of power grid operation risk assessment system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 141-148.

收稿日期: 2017-07-01; 修回日期: 2017-08-31

作者简介:

牛进苍(1967—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统设备状态评价; E-mail: niujincang@sd.sgcc.com.cn

许奕斌(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统可靠性与风险评估。E-mail: 435856474@qq.com

(编辑 魏小丽)