

基于风险评估的断路器检修决策研究

鲁宗相, 吴林林

(电力系统国家重点实验室清华大学电机系, 北京 100084)

摘要: 在系统风险评估与主接线可靠性评估相结合的基础上, 将风险理论应用于断路器检修中。分别从潮流越限、电压越限、电压失稳及连锁故障四个方面对系统风险进行量化, 得到元件量化的风险指标。通过最小路集/割集分析, 建立断路器与线路、变压器的关联关系, 将断路器故障造成的系统后果由其关联的设备系统严重度的增加来表示。在风险决策中引入了维修成本和维修收益的概念, 使得决策更加科学量化。通过算例系统证明了所提算法的合理性。

关键词: 断路器; 风险评估; 最小路集/割集; 基于风险的维修

Risk assessment based maintenance technology for breaker

LU Zong-xiang, WU Lin-lin

(State Key Lab of Power Systems, Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The risk theory is applied to the maintenance decision of high voltage breakers, based on the compositive application of system risk assessment and bus systems arrangement reliability evaluation. The system risk index is quantified from four aspects: overload, out limited voltage, voltage instability, and cascading overload. Using the minimal cut set/ minimal path set analysis method, this paper establishes the correlation of the breakers and their related lines or transformers. So system consequence of breakers outage can be presented by the increase of severity of their related equipments. The maintenance cost and maintenance benefit concepts are introduced in the risk decision-making. Finally, the proposed method is validated by a sample system.

Key words: breaker; risk assessment; minimal path set/ cut set; risk based maintenance

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)15-0047-06

0 引言

基于风险的维修 (Risk Based Maintenance, RBM) 是当前维修决策技术的研究热点, 被认为是未来智能电网框架中高级资产管理 (Advanced Asset Management, AAM) 的核心功能之一。断路器作为电力系统控制与保护中最重要的设备之一, 其动作的正确性和可靠性对控制故障影响范围、提高电力系统运行可靠性有非常重要的作用。因此, 对断路器的风险维修研究是一个至关重要的问题。

和传统维修决策和管理体系相比, RBM 是一种基于风险的系统化维修管理方法, 强调了可靠性与经济性的综合协调, 风险指标兼顾设备状态及其故障后果影响, 达到经济性和安全性的平衡。同时, 在设备维修决策中充分考虑系统运行状态的影响, 从而使得设备维修管理和系统运行工作紧密结合, 有效改善了传统维修管理模式电网运行与设备维修工作各自为战, 难以达到“系统”与“设备”的协调和优化的现状。目前 RBM 的方法主要应用于石化企业^[1-3], 在电力行业的研究刚刚起步。现阶段

的研究对象多集中于变压器、线路等设备, 对断路器故障造成的系统风险研究较少。而且风险分析或侧重于电气设备自身, 对电网的影响考虑较少^[4-5]; 或只考虑运行风险, 没有系统地将风险与维修决策相结合^[6-8]。文献[9-11]利用严重度指标来评估系统风险, 利用自定义的严重度函数分别计算线路过负荷、低电压、电压失稳以及连锁故障的风险指标。文献[12]在此基础上进行了修正扩充, 提出了基于风险评估的输变电设备维修的整体系统框架。

本文在文献[12]的基础上, 将风险评估引入断路器维修研究中, 首次对断路器故障的系统风险做了详细的量化分析, 将传统的主接线可靠性评估方法与风险评估结合起来, 建立了考虑系统风险的断路器风险评估的算法模型, 并在维修决策中对消缺成本和维修收益进行了量化分析。最后的算例分析验证了本文所提出算法的合理性和有效性。

1 系统风险评估

根据文献[12]建立的风险模型, 设备故障造成的风险包括自身风险、人身环境风险、社会风险和

系统风险四大类,其中系统风险分析是难点和重点。

系统风险表征了由于设备故障而造成的系统安全程度降低的期望。虽然《安全稳定导则》中规定电网应满足 $N-1$ 准则,但是设备故障退出必然会造成系统安全裕度的降低,使系统在更接近稳定边界的工况下运行。

本文从实用性角度出发,对文献[12]中提出的严重度模型进行了以下修正:

- 1) 当潮流和电压超过其紧急限值时,相应保护装置动作,将越限元件切除,严重度应当为定值;
- 2) 电压失稳时对应系统崩溃,严重度应当与此时系统所带的负荷成正比;
- 3) 连锁故障严重度应当只包括连锁故障中停运设备在停运当时的潮流越限严重度。

修正后的计算模型详细描述如下。

1.1 潮流越限严重度

定义线路(变压器)负载比 R_L 为实际输送功率与功率限额之比。设当 $R_L = 1$ 时对应严重度为1。充分考虑系统运行裕度,当 $R_L < 0.8$ 时严重度设为0,同时考虑继电保护动作值要求,得到潮流越限的严重度模型如公式(1)及图1所示。

$$S_{load} = \begin{cases} 0 & R_L < 0.8 \\ 5(R_L - 0.8) & 0.8 \leq R_L < 1.3 \\ 2.5 & R_L \geq 1.3 \end{cases} \quad (1)$$

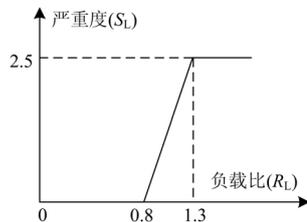


图1 潮流越限严重度函数
Fig.1 Severity function for overload

1.2 电压越限严重度

定义线路(变压器)电压比 R_V 为设备实际电压与额定电压之比。按照我国对电压标准的规定,同时考虑继电保护装置动作要求,得到电压越限严重度计算公式如式(2)所示。

$$S_{voltage} = \begin{cases} 1.5 & R_V < 0.85 \\ 10(1 - R_V) & 0.85 \leq R_V < 0.95 \\ 0 & 0.95 \leq R_V < 1.05 \\ 10(R_V - 1) & 1.05 \leq R_V < 1.15 \\ 1.5 & R_V > 1.15 \end{cases} \quad (2)$$

电压越限严重度如图2所示。

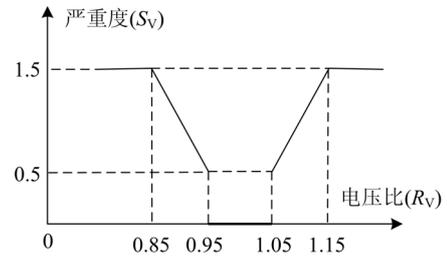


图2 电压越限严重度函数

Fig.2 Severity function for voltage out-of-limit

1.3 电压失稳严重度

本文仍采用广泛接受的负荷裕度指标来表征电压稳定的程度。裕度指标能为运行人员提供当前运行点到电压崩溃点距离的直观量度,并且该距离与裕度大小呈线性关系,具体定义如式(3)所示。

$$R_M = \frac{L_{ability} - L_{forecasted}}{L_{forecasted}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: R_M 为负荷裕度; $L_{ability}$ 为系统能够承受的最大负荷,由连续潮流计算得到; $L_{forecasted}$ 为系统预测负荷。

定义电压失稳发生概率如式(4),显然该概率值与裕度指标 R_M 呈线性关系。

$$P_{collapse} = \begin{cases} 1 & R_M \leq 0 \\ 1 - 10R_M & 0 < R_M \leq 10\% \\ 0 & R_M > 10\% \end{cases} \quad (4)$$

假定电压崩溃将导致系统失去所有负荷,则可以得到电压失稳的严重度为:

$$S_{collapse} = P_{collapse} k_{sev} L_{total} \quad (5)$$

式(5)中: k_{sev} 为负荷严重度折算系数, L_{total} 为系统总负荷。

1.4 连锁故障严重度

造成连锁故障的原因有很多,本文仅考虑由于设备故障造成潮流转移导致的其他静态元件过载的情况。

与文献[12]不同,本文将系统连锁故障严重度定义为切除的元件对应的严重度的加和,对于潮流不收敛或故障级数超过最大值的情况,严重度与系统负荷成正比。

1.5 风险计算

基于以上讨论,系统总的严重度为式(6)所示。

$$S_{system} = S_{load} + S_{voltage} + S_{collapse} + S_{cascading} \quad (6)$$

实际运行的设备发生故障时系统的严重度应当经历如图 3 过程。

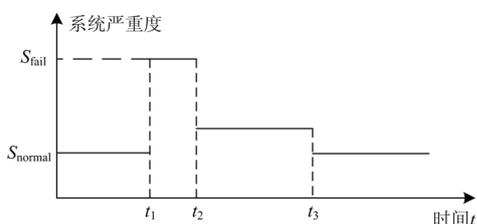


图 3 系统严重度变化曲线

Fig.3 Changing curve of system severity

假设 t_1 时刻目标设备故障, 系统严重度急剧增加, 调度人员会采取相应措施, 使得系统严重度在 t_2 时刻大大降低, 但较之初始状态仍略有增加。在 t_3 时刻设备修复, 系统严重度恢复到初始水平。

可见系统的安全损失应当是严重度对时间的积分, 严重度与系统的运行方式直接相关, 由于调度人员采取措施随实际系统工况不同而变化, 本文做以下假设: 当设备故障没有造成负荷丢失时, 整个维修周期内调度人员不做任何操作, 严重度的增加维持不变, 对应时间为设备维修时间 $T_{maintenance}$; 如果造成负荷丢失, 则调度人员可以在有限时间内将系统的严重度降低到原有水平, 该有限时间称之为恢复供电时间 $T_{restoration}$ 。

基于以上论述, 则系统风险为:

$$R_{system} = p_f T (k_{risk} (S_{fail} - S_{normal}) + P_{price} L_{Loss}) \quad (7)$$

式中: R_{system} 为系统风险; p_f 为设备故障概率; T 为风险持续时间; 当有负荷丢失时为 $T_{restoration}$; 没有负荷丢失时为 $T_{maintenance}$; k_{risk} 为严重度经济折算系数; S_{fail} 为故障后严重度; S_{normal} 为故障前严重度; P_{price} 为当地电价; L_{Loss} 为负荷丢失量。

2 断路器风险评估

2.1 断路器的可靠性模型

如图 4 所示, 一个正常闭合的断路器可能有 7 个状态^[13]:

- N 正常状态;
- M 计划检修状态;
- m 强迫检修状态;
- f 误动状态;
- i 接地或绝缘故障状态;
- st 拒动状态;
- r 故障后恢复状态。

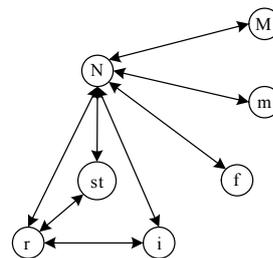


图 4 断路器 7 状态空间图

Fig.4 Diagram of breakers' seven-state space

从故障后果来看, 可以将 st 状态和 i 状态合并为 S 状态, m、f 和 r 状态合并为 R 状态。S 状态将保护区内所有断路器跳闸, 这是一种扩大型故障; 而 R 状态只有故障断路器自己跳闸。考虑继电保护拒动的情况, 继电保护拒动时的后果相当于在故障断路器的保护区内的断路器也处于 S 状态, 从而导致下一级断路器跳闸, 称这种状态为 F 状态。

由于本文研究的是状态检修, 因此计划检修状态暂不考虑。综上所述, 可以得到断路器的 4 状态模型如图 5 所示。

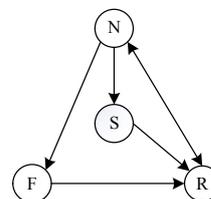


图 5 断路器 4 状态空间图

Fig.5 Diagram of breakers' four-state space

断路器不同的故障模式经历的过程如图 6 所示。

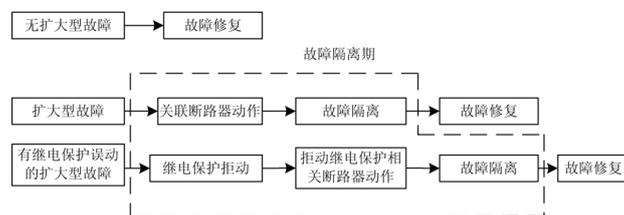


图 6 断路器故障过程

Fig.6 Failure process of breaker

可以看到, 无论断路器处于哪种故障模式, 最终都是要进入到故障恢复期, 一般而言故障隔离期时间较短, 在 1 h 内可以完成故障的隔离。一般在故障隔离期其他断路器再次故障的可能性很低, 可以忽略不计。而在故障恢复期, 设备已经处于维修

状态，即使再有其他设备故障对目标设备维修与否也没有影响。因此在本文研究中仅考虑了由于目标设备发生不同类型故障造成的系统风险的增加，暂时未考虑更高阶的故障模式。

2.2 最小路集/割集分析法

断路器故障的最终结果是使其关联的线路、变压器或负荷运行状态发生改变，因此断路器故障引起的系统严重度由其关联设备的系统严重度表示。这种关联关系可以通过最小路集/割集的方法进行分析，本文采用邻接点矩阵方法来进行最小路集/割集的分析^[14]。

2.3 断路器系统风险

首先对目标断路器的故障模式进行枚举，按照故障后果的不同分为无扩大型故障、扩大型故障和有继电保护拒动的扩大型故障三类，分别获得需要动作的断路器集合，通过最小路集/割集方法获得剩余路集，对电网进行网络重构，将由于目标断路器故障而断开的线路、变压器从网络中移除，最后利用前文介绍的方法对此时的系统风险进行评估。断路器风险计算的流程如图 7 所示。

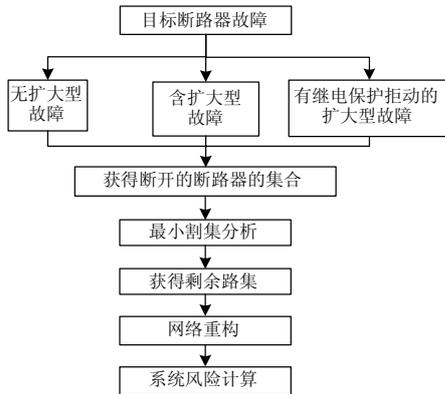


图 7 断路器风险评估的基本流程

Fig.7 Basic flow chart of risk assessment for breaker

下面对于不同的故障模式计算其风险。

无扩大型故障 R:

$$R_{Ri} = P_{Ri} S_{Ri} \Pi P_{N-i} T_R \quad (8)$$

扩大型故障 S:

$$R_{Si} = P_{Si} S_{Si} p^n \Pi P_{N-i} T_{Si} \quad (9)$$

包括继电保护拒动的扩大型故障 F:

$$R_{Fi} = P_{Fi} S_{Fi} (1-p) p^{n-1} \Pi P_{N-i} T_{Fi} \quad (10)$$

以上几个公式符号的含义类似。以式(8)为例，式中： R_{Ri} 为断路器*i*处于R状态时的风险； P_{Ri} 为

断路器*i*处于R状态的概率； S_{Ri} 为断路器*i*处于R状态的系统严重度； ΠP_{N-i} 为除断路器*i*外断路器的处于正常状态的概率； T_R 为处于R状态的时间；其他各式中有类似的含义。 n 为断路器*i*关联的断路器数， p 为继电保护正常动作的概率。

式(9)、式(10)中 T_{Si} 和 T_{Fi} 为故障隔离时间，一般有 $T_{Si} = T_0 + nT_L$ ， $T_{Fi} = T_{Fi}$ 。式中 T_0 为故障判定时间，一般取0.5h， n 为隔离故障需操作的隔离开关组数， T_L 为断开一组隔离开关所需时间，一般取0.1h。

3 风险决策

为了从经济角度对设备维修进行评估，本文对设备消缺成本、维修净收益进行了量化分析。

断路器消缺成本包括两部分：1) 断路器消缺费用，这部分直接经济投入包括设备维修的人力投入和备品备件的成本；2) 断路器进行消缺时有可能造成断路器退出运行，从而增加系统严重度。第二部分应当属于维修带来的风险，也应该归入设备维修成本。

假设消缺时间为 T_{repair} ，一般为一到几个小时。断路器消缺时如果不需要退出运行，则消缺带来的系统风险增加为0；如果消缺需要断路器退出运行，相当于目标断路器以概率1发生无扩大型故障，对应风险增加值为 $R'_{Ri} = Sev_{Ri} \Pi P_{N-i} T_{repair}$ 。

综上所述，消缺成本应该为：

$$C = C_{repair} + C_{system} + C_{society} \quad (11)$$

$$\text{其中：} \quad C_{system} = k_{risk} R'_{Ri} + L_{loss} P_{price} T_{repair} \quad (12)$$

$$C_{society} = L_{loss} P_{GDP} T_{repair} \quad (13)$$

式中： C 为设备总的消缺成本； C_{repair} 为设备消缺费用； C_{system} 为设备消缺造成的系统安全损失费用； $C_{society}$ 为设备消缺造成的社会安全损失费用。 k_{risk} 为经济性指标折算系数，其单位为“万元/(严重度·小时)”； P_{price} 为该地区电价； L_{loss} 为由于消缺造成的停电量，一般情况下应当为0； T_{repair} 为设备的消缺时间，由设备类型与消缺等级决定； P_{GDP} 为该地区产电比。

设备修复系数定义如式(14)所示。

$$\beta = \frac{P_{after}}{P_{before}} \quad (14)$$

式中： β 为设备修复系数； P_{after} 、 P_{before} 为设备维修前后的故障概率。

再结合上述维修成本的分析, 本文可以得到设备维修净收益的定义如式 (15) 所示。

$$I_{\text{Income}} = R_{\text{before}} - R_{\text{after}} - C = (1 - \beta)R_{\text{before}} - C \quad (15)$$

式中: I_{Income} 为维修的净收益; R_{before} 为设备维修前的风险; R_{after} 为设备维修后的风险; C 为维修成本; β 需要根据设备自身的老化程度和维修的预期效果所决定。

维修净收益 I_{Income} 与维修成本 C 之比即为维修净收益率。

RBM 方法的另一重要优点在于便于实现维修的多目标决策, 由于决策者的维修预期目标不同和自身条件的差异, 使得决策者对风险的偏好不尽相同, 最终的决策结果应当是在综合考虑安全、成本和效能三方面因素基础上做出的多目标决策。而风险指标很容易做到这一点。用户可以根据需要对各个风险指标赋予不同的权重, 最终获得综合的风险指标。

4 算例分析

4.1 算例基本信息

为验证以上算法, 本文采用文献[15]中的算例系统进行测试分析, 具体参数参见原文献, 其接线如图 8 所示。

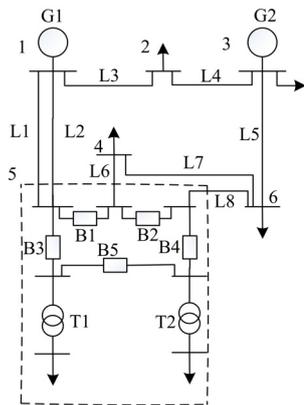


图 8 算例系统

Fig.8 Example of power system

变电站 5 内断路器相关的维修信息设定如表 1 所示, 考虑断路器故障概率的不确定性, 其故障概率用区间数表示。

4.2 设备风险评估

应用 VC++6.0 实现以上算法, 对上述算例进行风险评估结果如表 2 所示。

表 1 电力系统初始条件

Tab.1 Initial conditions of the power system

| | 无扩大故障概率 | 扩大故障概率 | 事后维修费用 /万元 | 消缺费用 /万元 |
|----|---------------|---------------|---------------|-------------|
| B1 | [0.011,0.015] | [0.010,0.013] | 10 | 0.105 |
| B2 | [0.015,0.020] | [0.012,0.015] | 9 | 0.11 |
| B3 | [0.002,0.005] | [0.002,0.005] | 1.5 | 0.025 |
| B4 | [0.005,0.008] | [0.004,0.006] | 4 | 0.055 |
| B5 | [0.010,0.015] | [0.013,0.017] | 10 | 0.12 |

表 2 断路器风险评估结果

Tab.2 Risk assessment results for breakers

| | 自身风险/ 万元 | 系统风险/ 万元 | 设备风险/ 万元 | 系统风险所占 比例/% |
|----|---------------|---------------|---------------|----------------|
| B1 | [0.100,0.130] | [0.072,0.093] | [0.172,0.223] | 41.79 |
| B2 | [0.108,0.135] | [0.004,0.004] | [0.112,0.139] | 3.19 |
| B3 | [0.003,0.008] | [0.015,0.037] | [0.018,0.045] | 83.21 |
| B4 | [0.016,0.024] | [0.006,0.009] | [0.022,0.033] | 27.94 |
| B5 | [0.130,0.170] | [0.041,0.053] | [0.171,0.223] | 23.86 |

通过对比各个断路器的风险指标可以发现, 对于不同的设备系统风险差别较大, 风险值可以很好地反映不同设备在系统中的重要程度。

变电站 5 的主接线为环形结构, 任意断路器发生无扩大故障都不会造成线路或变压器退出运行, 而当发生扩大故障时会带来严重的后果。

1) B1 发生扩大故障时会造成 L1、L2 无法供电, 使得变电站所带负荷全部通过 L5 提供, 会造成 L5 过载, 造成严重的系统后果。

2) B2 发生扩大故障时使得电网解环运行, 变电站负荷可以通过 L1、L2 提供, 不会带来很严重的系统后果, 其系统风险值较小。

3) 断路器 B3、B4 故障概率很小, 因而其对应的风险值很小。

4) B5 发生扩大故障时使得变电站 5 所带负荷全丢, 因此系统风险值比较大。

具体评估结果如图 9 所示。

4.3 维修决策

假设在有限时间内仅能对 5 台变压器中的 2 台进行维修, 分别按照设备状态和设备风险为指标决策如表 3。

表 3 维修决策结果

Tab.3 Maintenance decision-making results

| 决策量 | 排序结果 | 维修净收益/万元 | 维修净收益率/% |
|------|-------|---------------|---------------|
| 设备状态 | B5、B2 | [0.052,0.133] | [22.74,57.71] |
| 设备风险 | B1、B5 | [0.118,0.222] | [52.23,98.49] |

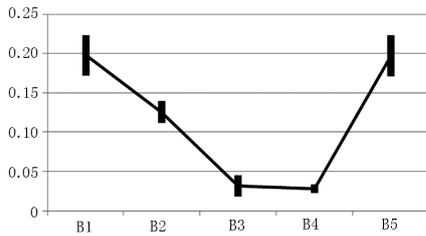


图9 断路器风险评估结果

Fig.9 Risk assessment results for breakers

以设备状态为决策标准时需要首先对 B5 进行维修,其次是断路器 B2。以风险为决策指标时则不同,断路器 B1 虽然状态稍好,但是故障会造成严重系统后果的进行维修,因此需要维持较高的可靠性水平,应当优先对其进行维修,其次是断路器 B5。

采用设备风险作为决策指标的维修净收益和净收益率要远大于以状态作为维修决策指标时的结果,证明风险值很好地考虑了设备在系统中的地位,将设备状态评估和后果分析有机地结合起来,对于重要程度的设备维持更高等级的可靠性水平,有效降低了维修成本,提高了维修收益。

5 结论

本文提出了应用于断路器的基于风险维修的方法和体系,评估结果反映了断路器在系统中的重要程度,对于不同位置的断路器,考虑其在系统中地位的不同,需要保持相应水平的可靠性。较之传统的计划检修和状态检修,基于风险的维修可以大大降低维修的盲目性,综合衡量设备状态及其在系统中的地位,对系统中重要节点优先进行维修,以最小的成本满足系统可靠性水平的要求。

维修决策过程中定量分析了消缺成本和维修收益,更易于维修人员进行决策。算例表明本文提出的断路器维修算法合理有效,其风险指标可以很好地为维修人员提供决策辅助。

参考文献

- [1] Dey P M. A risk-based model for inspection and maintenance of cross-country petroleum pipeline[J]. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2001, 40(4): 24-31.
- [2] Backlund F, Hannu J. Can we make maintenance decisions on risk analysis results[J]. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2002, 8(1): 77 - 91.
- [3] Khan Faisal I, Haddara Mahmoud M. Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries,

2003, 16(6): 561-573.

- [4] 孙玺, 李耀君, 刘振宇. 火电厂风险维修方法及实施过程[J]. 电力设备, 2007, 8(4): 47-50.
SUN Xi, LI Yao-jun, LIU Zhen-yu. Risk-based inspection and maintenance technology in fossil-fired power plant and its implementation procedure[J]. Electrical Equipment, 2007, 8(4): 47-50.
- [5] 董玉亮, 马履翱, 顾煜炯. 电站设备短期维修风险决策模型研究[J]. 华北电力大学学报, 2007, 34(3): 45-49.
DONG Yu-liang, MA Lu-ao, GU Yu-jiong. Research on short-term maintenance risk decision model of power plant equipment[J]. Journal of North China Electric Power University, 2007, 34(3): 45-49.
- [6] 史慧杰, 葛斐, 丁明, 等. 输电网络运行风险的在线评估[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 43-48.
SHI Hui-jie, GE Fei, DING Ming, et al. Research on on-line assessment of network operation risk[J]. Power System Technology, 2005, 29(6): 43-48.
- [7] 陈为化, 江全元, 曹一家, 等. 电力系统电压崩溃的风险评估[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 6-11.
CHEN Wei-hua, JIANG Quan-yuan, CAO Yi-jia, et al. Risk assessment of voltage collapse in power system[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 6-11.
- [8] 李蓉蓉, 张晔, 江全元. 复杂电力系统连锁故障的风险评估[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 18-23.
LI Rong-rong, ZHANG Ye, JIANG Quan-yuan. Risk assessment for cascading failures of complex power system[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 18-23.
- [9] McCalley J D, Fouad A A, Vittal V, et al. A risk-based security index for determining operating limits in stability-limited electric power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(3): 1210-1219.
- [10] DAI You-jie, McCalley J D, Vittal V. Annual risk assessment for overload security[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(4): 616-623.
- [11] Ni M, McCalley J D, Vittal V, et al. Online risk-based security assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 258-265.
- [12] 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): 30-34.
ZHAO Ming-xin, LU Zong-xiang, WU Lin-lin, et al. Risk assessment based maintenance technology for electric transmission equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19): 30-34.
- [13] 鲁宗相, 郭永基. 水电站电气主接线可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(18): 16-19.

(下转第 86 页 continued on page 86)

(6): 1-4.

[4] 陈永进, 任震, 黄雯莹. 考虑天气变化的可靠性评估模型与分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(21): 17-21. CHEN Yong-jin, REN Zhen, HUANG Wen-ying. Model and analysis of power system reliability evaluation considering weather change[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (21): 17-21.

[5] 刘洋, 周家启. 计及气候因素的大电力系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2003, 23 (9) : 60-62. LIU Yang, ZHOU Jia-qi. Incorporating weather effect in bulk power system reliability evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23 (9) : 60-62.

[6] Billinton R, WU Chen-jian. Predictive reliability assessment of distribution systems including extreme adverse weather[C]. //CCECE. 2001: 719-724.

[7] Billinton R, Singh G. Application of adverse and extreme adverse weather : modeling in transmission and distribution system reliability[J]. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 2006: 115-120.

[8] 孙荣富, 程林, 孙元章. 基于恶劣气候条件的停运率建模及电网充裕度评估[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (13): 7-12. SUN Rong-fu, CHENG Lin, SUN Yuan-zhang. An outage rate and system adequacy assessment based on adverse weather conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (13): 7-12.

[9] Bowles J.B. Commentary—caution: constant failure-rate models may be hazardous to your design[J]. IEEE Trans on Reliability, 2002, 51 (3): 375-377.

[10] Broström E, Ahlberg J, Söder L. Modeling of ice storms and their impact applied to a part of the Swedish transmission network[C]. //Proceedings of 2007 IEEE Power Tech. Lausanne(Switzerland): 2007:1593-1598.

[11] 刘和云, 周迪, 付俊萍, 等. 线雨淞覆冰预测简单模型的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (4): 44-47. LIU He-yun, ZHOU Di, FU Jun-ping, et al. A simple model for predicting glaze loads on wires[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (4): 44-47.

[12] 陈平. 地形对山地丘陵风场影响的数值研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007. CHEN Ping. Numerical study of terrain influence on the airflow over hilly land[D]. Hangzhou : Zhejiang University, 2007.

[13] Broström E, Söder L. Modeling of ice storms for power transmission reliability calculations[C]. //Proceedings of the 15th Power Systems Computation Conference. Liege: 2005: 22-26.

[14] 李文沅. 电力系统风险评估模型、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006. LI Wen-yuan. Risk assessment of power systems[M]. Beijing: Science Press, 2006.

[15] 丁明, 戴永旭, 洪梅, 等. 影响输电网可靠性的气候条件模拟[J]. 电力系统自动化, 1997, 21 (1) : 18-20. DING Ming, DAI Yong-xu, HONG Mei, et al. Simulation to the weather condition affecting the reliability of transmission network[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21 (1) : 18-20.

[16] Billinton R, Kumar S, Chowdhury N.A. A reliability test system for education purpose: basic data[J]. IEEE Trans, 1989, 4 (3): 1238-1244.

[17] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. GUO Yong-ji. Power system reliability analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

收稿日期: 2009-09-08; 修回日期: 2009-11-19

作者简介:

韩卫恒 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统安全与可靠性分析; E-mail: hwh_scu1986@163.com

刘俊勇 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力市场、电力系统稳定性分析、分布式发电等研究工作。

(上接第 52 页 continued from page 52)

LU Zong-xiang, GUO Yong-ji. Reliability evaluation of hydroelectric power station bus-systems arrangement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(18): 16-19.

[14] 王锡凡. 发电厂主接线可靠性研究[J]. 西安交通大学学报, 1990, 24(2): 31-47. WANG Xi-fan. Research on the reliability of bus schemes of power stations[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1990, 24(2): 31-47.

[15] LI Wen-yuan. Risk assessment of power systems : models, methods, and applicaitons[J]. Wiley-IEEE Press, 2005: 199.

收稿日期: 2010-02-24

作者简介:

鲁宗相 (1974-), 男, 副教授, 研究方向为电力系统可靠性、风力发电、新能源发电及微电网等; E-mail: luzongxiang98@tsinghua.edu.cn

吴林林 (1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统可靠性。