

DOI: 10.7667/PSPC161712

一种基于检修风险收益的输变电设备检修优先级排序方法

肖辅盛¹, 高适¹, 邓超志¹, 何迪², 郭创新²

(1. 贵阳供电局, 贵州 贵阳 550002; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 在检修资源有限的条件下, 如何选取待检修设备集合是制定设备检修计划、实现检修效果最大化的基础。基于输变电设备风险评估导则, 提出了一种基于检修风险收益的输变电设备检修优先级排序方法, 介绍了设备风险评估的流程、适用于设备风险评估的故障概率模型、设备故障对设备自身、人身、环境、系统、社会等多层次影响的建模方式及检修优先级决策量的选取方式。算例分析以 RBTS 系统为例, 定量展现了系统中各设备的故障概率、故障后果、检修优先级决策量的计算过程及该方法在不同应用条件下的差异化应用。相比传统检修设备选取方法, 该方法拥有更有效的故障概率模型、更全面的后果严重度评判体系, 应用场合也更为广泛。

关键词: 检修优先级; 输变电设备; 风险评估; 故障概率; 后果严重度

Maintenance prioritization method of transmission and transformation equipment based on maintenance risk return

XIAO Fusheng¹, GAO Shi¹, DENG Chaozhi¹, HE Di², GUO Chuangxin²

(1. Guiyang Electric Power Supply Bureau, Guiyang 550002, China;

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

Abstract: Under conditions of limited maintenance resources, how to select equipment is the basis to make maintenance plan and maximize the effect of maintenance. Based on transmission and transformation equipment risk assessment guide rule, this paper proposes a maintenance prioritization method of transmission and transformation equipment based on maintenance risk return. The process of risk assessment for equipment, a failure probability model which is suitable for risk assessment, a model for the multilevel effects of different failures to equipment itself, human, environment, system, society and the selection method of maintenance prioritization decision value are introduced. Taking RBTS system as an example, the case study quantitatively shows equipment's failure probability, failure consequences and the calculation process of maintenance prioritization decision value. Different applications of the method under different application conditions are also demonstrated. Compared to the traditional methods of selecting maintenance equipment, this method has a more effective failure probability model, a more comprehensive evaluation system of consequence severity and a wider range of applications.

Key words: maintenance prioritization; transmission and transformation equipment; risk assessment; failure probability; consequence severity

0 引言

作为典型的资产密集型企业, 电力企业每年在输变电设备的运检、维修中支出了大笔费用。相比于盲目性的定期计划检修, 状态检修(Condition Based Maintenance, CBM)能根据设备自身状况以及电网运行状态做出检修判断, 更为经济高效^[1-2]。

随着智能电网建设的不断深入, 电力电子技术、通信技术、网络技术、大数据技术与电力系统的结

合更为紧密, 各项精确的状态监测技术^[3-5]、先进的故障预测与诊断技术^[6-8]、完善的状态评估导则^[9-10]等状态检修相关技术不断发展进步, 为状态检修体系的完善提供了更广阔的空间。

国内外学者针对输变电设备状态检修进行了大量研究, 取得了基于全寿命周期管理的状态检修策略^[11]、以可靠性为中心的检修策略^[12]、基于 D-S 证据理论的输变电设备多目标状态检修^[13]等丰富的研究成果, 并以此为基础提出了下一代 CBM, 即基

于风险的维修(Risk Based Maintenance, RBM)^[1,14], 通过建立设备状态与可预测故障概率的关系^[15-17], 分析设备故障后果及电网运行风险、检修风险^[1,18], 实现以综合风险最小^[18]或检修收益最大^[2]的优化检修计划。浙江省电力公司也依据设备状态检修管理要求, 制定了设备风险评估导则^[19], 为检修策略的经济性及安全性提供科学依据。目前 RBM 多是以检修过程中的风险约束及不同设备检修方式的效益区别为考量实现设备的优化检修, 而较少考虑需检修设备的选取问题。传统的设备风险检修决策往往以设备故障概率或者风险指标的大小作为待检修设备集合的选取方式^[2,18], 虽然简单实用, 但是实际上部分设备由于受自身材料老化限制或者天气环境影响, 即使进行检修也无法大幅降低设备的失效概率和设备风险。因此采用上述方法并不能选择出真正需要检修、能实现检修效果最大化的设备。而且目前设备风险评估的指标过于单一, 没有考虑设备故障后果间的耦合关系, 一定程度上影响了待检修设备选取的准确性。

基于输变电设备风险评估导则^[19], 本文提出了一种基于检修风险收益的输变电设备检修优先级排序方法, 以检修效用作为待检修设备集合的选取决策量, 介绍了适用的设备风险评估流程、故障概率模型建模方式、后果严重度指标的融合方式及设备检修优先级的评判标准, 以解决在检修资源有限情况下设备检修优先级的排序问题, 进而为检修工作的安排提供理论和技术支持。

1 设备风险评估

设备风险评估包括信息采集、设备风险源辨识和风险评估三个环节, 如图 1 所示。

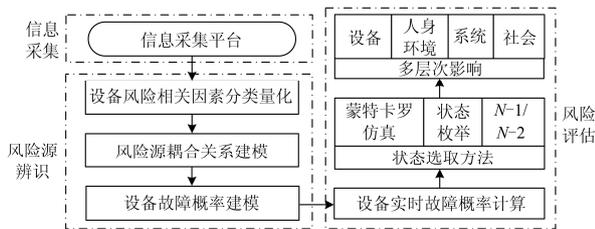


图 1 设备风险评估流程

Fig. 1 Process of risk assessment for equipment

信息采集环节收集并分析设备风险源辨识环节与设备风险评估环节所需要的各类环境、系统和设备信息。设备风险源辨识环节利用信息采集环节采集的信息, 对设备面临的各类不确定因素和安全隐患进行辨识和分类量化, 建立设备停运模型。设备风险评估环节根据设备停运情况及各运行设备的故

障概率对电网进行拓扑分析、潮流计算, 并采用蒙特卡罗仿真等方法模拟电网运行场景, 评估某设备故障后电网的综合后果严重度。因此在设备风险评估中最重要的两个子环节为输变电设备实时故障概率建模及设备故障后果严重度建模。

1.1 输变电设备故障概率模型

在输变电设备风险评估导则^[19]中, 设备故障概率模型采用指数函数表示, 其表达式为

$$p = f(d) = A \exp(Bd) + C \quad (1)$$

式中: d 为设备缺陷指数; A 、 B 、 C 为待估计系数。该模型相对简单, 虽然能在一定程度上体现输变电设备个体的差异性和设备故障的发展趋势, 但对运行数据的利用率较低, 无法响应天气环境状况、设备老化失效对设备故障可能性的影响, 无法体现不同运行环境中检修对设备故障概率的差别性提升, 应用于设备风险评估较为片面。文献[17]提出了一种可以响应老化失效状况、设备自身健康状态以及天气、环境状况影响的输变电设备故障概率模型, 其简化模型表达式为

$$p = (\beta/\eta) (T_{eq}/\eta)^{\beta-1} \cdot \exp(\gamma_1 Z_1 + \gamma_2 Z_2 + \gamma_3) \quad (2)$$

式中: η 为比例参数; T_{eq} 为设备等效运行时间, 可按设备运行温度将运行时间划分成 n 个小区间 t_i , 每个小区间内温度 θ_{Hi} 恒定, 累加后获得; Z_1 为设备健康状态类别; Z_2 为天气环境分级, 可采用三态模型模拟^[20]: 正常天气环境($Z_2=1$)、恶劣天气环境($Z_2=2$)、灾变天气环境($Z_2=3$); β 、 γ_1 、 γ_2 、 γ_3 为通过历史样本进行极大似然估计拟合获得的参数。

该模型应用于油浸式变压器时, Z_1 可依据油气信息分级标准^[21]分为正常($Z_1=1$)、注意($Z_1=2$)、异常($Z_1=3$)、严重($Z_1=4$)四级, 式(2)中比例参数 η 和设备等效运行时间 T_{eq} 分别为

$$\eta = C \exp\left(\frac{B}{\theta_H + 273}\right) \quad (3)$$

$$T_{eq} = \sum_{i=1}^n t_i \exp\left(\frac{B}{\theta_H + 273} - \frac{B}{\theta_{Hi} + 273}\right) \quad (4)$$

式中: B 、 C 为变压器参数^[22]; θ_H 为恒定基准温度。

式(2)应用于输电线路时, Z_1 可依据输电线路状态评估导则^[9]分为正常($Z_1=1$)、注意($Z_1=2$)、异常($Z_1=3$)、严重($Z_1=4$)四级, 比例参数 η 和设备等效运行时间 T_{eq} 分别为

$$\eta = Q \exp(P\theta_H) \quad (5)$$

$$T_{eq} = \sum_{i=1}^n t_i \exp[P(\theta_H - \theta_{Hi})] \quad (6)$$

式中: P 、 Q 为线路参数^[17]; θ_H 为恒定基准温度。

1.2 设备故障后果严重度模型

输变电设备后果严重度评估是采用蒙特卡罗仿真等状态选取方法建立不同电网运行场景，评估不同场景中设备故障后所导致的一系列对于设备、人身环境、系统和社会等多层次的不同影响。从影响层级划分，设备故障后果严重度可分为：设备损失严重度、人身环境损失严重度、系统损失严重度、社会损失严重度四个层级。

1) 设备损失严重度

设备损失严重度由设备故障后维修所需要的人力、物力维修费用或换新费用 L_M 决定。

2) 人身环境损失严重度

人身环境损失为设备故障造成的人身伤亡以及环境污染治理费用 L_P 。

3) 系统损失严重度

不同于《输变电设备风险评估导则》^[19]中将系统损失严重度分解为潮流越限严重度、电压越限严重度、电压失稳严重度和连锁故障严重度四部分，本方法根据电网运行风险评估的相关方法^[23]，结合文献^[24]对电力事故和 risk 的规定，将系统损失严重度 L_G 分解为以下 5 项：

(1) 减供负荷型系统损失严重度 L_{G1} 。根据应用场景，可按减供负荷总量的大小或减供负荷量占负荷总量的比例来衡量。

(2) 重载或过载型系统损失严重度 L_{G2} 。包括了设备(变压器、线路等)和输电断面的重载和过载，一般可以实际负载值与额定值的比例来划分严重度等级。

(3) 电压偏移型系统损失严重度 L_{G3} 。包括低电压严重度以及过电压严重度两种。

(4) 电网解列型系统损失严重度 L_{G4} 。电网中部分关键设备的故障停运有可能会造成系统局部解列，可根据电网拓扑判断是否存在解列以及解列后局部电网的电压等级来确定严重度等级。

(5) 厂站或重要用户全停型系统损失严重度 L_{G5} 。电网运行中存在一些关键厂站和重要用户，有可能因设备故障造成某些厂站和重要用户全停，引发较大的电网事故。对于厂站全停型系统损失严重度按厂站电压等级确定严重度等级。对于重要用户全停型系统损失严重度按重要用户等级确定风险等级。重要用户等级由地方人民政府根据相关管理方法^[25]确定。

由于系统损失严重度指标无法用确切数值量化，因此本方法将系统损失严重度分为一级、二级、三级和无后果损失等四级，其中一级为最严重级。具体后果严重度定级方案如表 1 所示。

表 1 后果严重度定级方案

指标	一级	二级	三级
L_{G1}	10%以上	5%以上	2%以上
L_{G2}	120%以上	100%以上	90%以上
L_{G3}	10%以上	5%以上	2%以上
L_{G4}	110 kV 以上	110 kV	110 kV 以下
L_{G5}	110 kV 以上厂站/ 特级或一级 重要用户	110 kV 厂站/ 二级重要用户	110 kV 以下厂 站/临时重要 用户

注：取系统中存在的最高严重度等级作为系统严重度等级，若均不属于一、二、三级严重度则系统损失严重度为无损失级

4) 社会损失严重度

社会损失严重度由两部分组成，一部分为负荷减供导致的 GDP 损失，另一部分为断电、减供、电网事故导致的声誉损失。经济型社会损失严重度函数表达式为

$$L_{S1} = P_{gdp} \times L_{G1} \quad (7)$$

式中， P_{gdp} 为综合产电比。

声誉型社会损失严重度与系统损失严重度等级及民众关注度有关，其中民众关注度可分为一般、关注和十分关注三类。一般情况下民众的关注度均为关注，当系统所处地区正在举行诸如 G20、世博会等大型会议、活动或者赛事时，民众关注度应上升为十分关注等级；而当系统所处地区处于人烟稀少的非发达地区时，民众关注度应下降为一般等级。

5) 综合设备故障后果严重度

根据严重度指标的表征方式，可将众指标分为后果严重度经济指标和后果严重度非经济指标两类，不同指标间的关系及分类如图 2 所示。

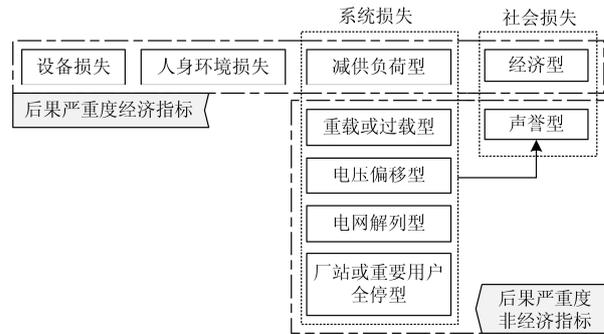


图 2 后果严重度指标关系图

Fig. 2 Relation schema of consequence severity factors

后果严重度经济指标 C_1 由设备损失严重度 L_M 、人身环境损失严重度 L_P 和经济型社会损失严重度 L_{S1} 构成，其表达式为

$$C_1 = L_M + L_P + L_{S1} \quad (8)$$

后果严重度非经济指标 C_2 应考虑系统损失严

重度定级和声望型社会损失严重度两方面因素, 结合式(7), 可按图 3 所示的非经济指标后果严重度等级矩阵确定, 其中 0 级为无损失级。

非常关注	0	II	I	I
关注	0	III	II	I
一般	0	III	II	II
	无后果损失	三级	二级	一级

图 3 非经济指标后果严重度等级矩阵

Fig. 3 Consequence severity rating matrix of

non-economic factors

结合式(8)可知, 后果严重度指标 C 为

$$C = C_1 + k(C_2) \quad (9)$$

式中, k 为经济性折算函数, 可由运检人员根据实际应用情况选取。函数 k 决定了在分析设备故障后果严重度时运检人员对经济型指标与非经济型指标的差异化关注程度。

当采用状态选取方法获得 N 个电网运行场景中的综合设备故障后果严重度 C 后, 可将其归一获得最终的后果严重度指标 $C^\#$ 。

$$C^\# = \sum_N C / N \quad (10)$$

2 基于检修风险收益的设备检修排序

输变电设备是否需要维修是由设备当前的状态好坏以及故障后果决定的。传统的维修设备选取决策往往由设备故障概率或者设备风险的大小决定。实际上有些设备由于受自身缺陷限制或者天气环境影响, 即使进行检修也无法大幅降低设备的失效概率和设备风险。鉴于此, 选择检修效用, 即检修后设备风险的降低量作为设备检修优先级排序的决策量具有较好的应用前景。

设备检修优先级排序的决策量 R 为

$$R = \Delta RISK = p_0 C_0 - p' C' \quad (11)$$

式中: $\Delta RISK$ 为检修后设备风险的降低量; p_0 、 p' 、 C_0 、 C' 为检修前后设备的故障概率和归一化后果严重度指标 $C^\#$ 。以 R 为决策量指标将设备进行排序, 结合检修的资源约束, 可以获得在指定状态下最需要进行维修的设备集合。

3 算例分析

本文以图 4 所示 RBTS 系统^[26]为例, 验证提出的基于检修风险收益的输变电设备检修优先级排序

方法的有效性。为了提高算例针对性, 全面展现设备检修优先级排序的推导过程, 将线路 5、线路 8 替换为油浸式变压器。改进后的 RBTS 系统是一个具有 11 台发电机、7 条线路、2 台变压器的六母线综合系统, 能够详尽反映实际的可靠性问题。系统电压等级为 230 kV、138 kV, 最高负荷为 185 MW, 总发电能力为 240 MW。该系统最重要特点为发电能力充足而传输能力不足, 因此可假设当有发电机组故障时, 备用机组可投入运行以保证系统稳定运行。同时当系统运行方式变动时, 可通过调节发电机组的发电量使系统保持在一个较好的运行状态。

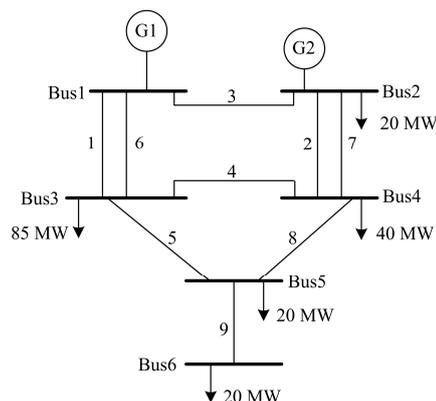


图 4 RBTS 测试系统

Fig. 4 RBTS reliability test system

系统中线路均采用导线 LGJ-400/50, 根据某市电力局线路运行数据, 结合 RBTS 默认数据得线路材料参数如表 2 所示, 变压器 5、变压器 8 的电阻 R 为 0.0023Ω , 电感 X 为 0.0839Ω , 变压器参数如表 3 所示; 参考文献[17, 19], 设备故障概率模型参数如表 4 所示, 经济型参数如表 5 所示。其余系统参数详见文献[26]。

以上述条件为前提考虑以下场景: 由于维修资源的限制, 在未来的一个检修周期内, 检修公司只能对其中三个设备进行检修, 试对系统中的 7 条线路及 2 台变压器进行检修优先级排序并确定需要进行检修的设备。根据 1.1 节可分析线路故障概率情况, 如表 6 所示。

表 2 线路材料参数

Table 2 Material parameters of lines

η	β	γ_1	γ_2	γ_3
1948	4.07	1.34	1.12	-4.15

表 3 变压器材料参数

Table 3 Material parameters of transformers

η	β	γ_1	γ_2	γ_3
7500	5.62	1.26	0.89	4.01

表 4 设备故障概率模型参数

Table 4 Failure probability model parameters of equipment

设备	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T_{eq}/d	600	450	500	600	1500	500	550	1500	700
Z_1	3	2	2	1	2	2	3	2	2
Z_2	1	3	1	2	2	3	1	1	1
长度/km	75	250	200	50	0	75	250	0	50

表 5 设备经济型参数

Table 5 Economy parameters of equipment

设备	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$L_M/\text{万元}$	1.6	1.4	1.5	1.2	6.8	0.9	1.1	5.4	1.8
$L_P/\text{万元}$	3.2	4.8	6.4	21	14	7.2	4.3	3.7	2.3

表 6 设备日故障概率

Table 6 Failure probability of equipment in a day

日故障概率	1	2	3	4	5
检修前	0.011 3	0.031 1	0.004 5	0.001 6	0.001 8
检修后	0.000 8	0.008 1	0.001 2	0.001 6	0.000 5
降低量	0.010 5	0.023 0	0.003 3	0	0.001 3

日故障概率	6	7	8	9	—
检修前	0.015 9	0.029 0	0.000 7	0.003 2	—
检修后	0.004 2	0.002 0	0.000 2	0.000 8	—
降低量	0.011 7	0.027 0	0.000 5	0.002 4	—

由表 6 可得，线路 2、线路 7、线路 6 是故障概率最高的三个设备。原因不难分析，因为这三个设备均为线路，不仅跨度大，而且自身的健康状态以及所处的天气环境状态均很差。若采用传统的以设备故障概率为排序决策量的检修设备筛选方法^[15]，该三条线路是最需要进行检修的设备。

而采用以检修风险收益为决策量的输变电设备检修优先级排序方法时，不应只考虑设备的故障概率或者故障概率的降低量，还需要考虑设备故障后的众多运行场景的安全性及稳定性。若令民众关注度为关注，综合产电比 P_{gdp} 为 10 元/kWh^[19]，经济性折算函数 k 为

$$k(C_2) = 5^{3-C_2} \quad (12)$$

则采用蒙特卡罗抽样不同电网运行场景，仿真得到的不同设备的故障后果严重度指标(万元)如表 7 所示。

表 7 设备故障后果严重度

Table 7 Failure consequence severity of equipment

抽样次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2000	12.4	8.8	9.5	24.2	24.2	14.9	7.9	11.6	52.1
2200	12.1	8.8	9.8	23.6	24.5	15.2	8.1	11.4	51.8
2400	12.1	8.7	9.9	23.3	23.8	15.1	7.8	11.5	52.3

由表 7 可见，抽样 2400 次时已满足故障后果严重度模拟的精度要求。在本文系统运行设定下，若单以故障导致的后果严重度来评判设备的重要程度时，线路 9 是最重要的设备，一旦该线路故障，将导致母线 6 所带负荷全部切除，电网局部解列。线路 4、变压器 5 是仅次于线路 9 的重要设备，而线路 7 是相对最不重要的设备。

因此，结合表 6 和表 7 可计算得各设备检修优先级决策量 R ，如图 5 所示。

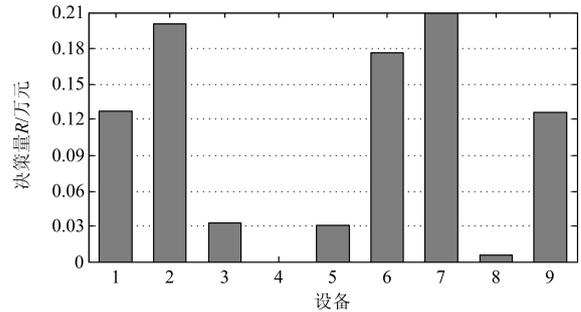
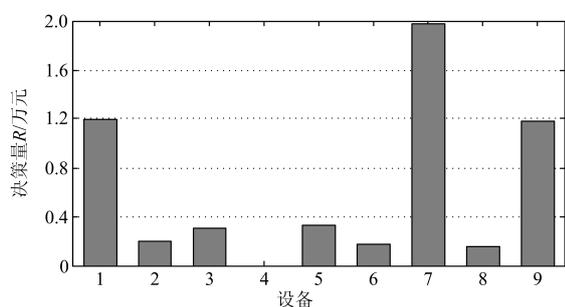


图 5 各设备检修优先级决策量 R

Fig. 5 Maintenance prioritization decision value R of equipment

由图 5 可知，线路 7、线路 2、线路 6 是筛选出的最需要检修的设备。相比于以设备故障概率为决策量的检修优先级排序方法，线路 2 的检修优先级有所下降，其原因是该线路虽然故障概率最大，但是故障可能主要是由天气、环境因素引起，通过检修提升设备的健康水平对降低设备风险的意义有限，结合设备故障后果严重度后可知其综合检修风险收益次于线路 7。虽然线路 9 十分重要，但由于设备故障可能性相较其他设备较低，其检修风险收益并不高。此外，变压器 5、变压器 8 的检修优先级均靠后，其原因一是设备本身状态较好，故障可能性低；二是两台变压器互为替补，有效降低了其中一台变压器退出运行对系统可靠性的不利影响。因此，采用基于检修风险收益的设备检修优先级排序可以较为精确地选择出真正需要检修的设备。

此外，采用基于检修风险收益的设备检修优先级排序方法可以根据特定的电网运行条件进行相关设备的预先检修，以提高设备的抗灾、应对重大事件的能力。如针对台风这一特殊的运行场景，若假设台风时各设备天气环境参数均变为 3，此时不同设备的故障概率及不同运行场景下的系统运行状况都会发生相应变化，为了提高系统在台风环境中的运行稳定性，可采用本方法筛选出检修风险收益最大的设备集合进行迎台预检修。该应用条件下的设备检修优先级决策量 R 如图 6 所示。

图6 迎台预检修中各设备检修优先级决策量 R Fig. 6 Maintenance prioritization decision value R of equipment in the preventive maintenance for typhoon

由图6可知,线路7、线路1、线路9是筛选出的最需要进行检修的设备集合,与图5中普通状态下的检修设备集合已不再相同。在台风到来前对该三条线路进行检修,可极大提升台风过境时该系统的运行稳定性。

4 结论

通过算例分析可知,基于检修风险收益的输变电设备检修优先级排序方法具有以下优点:

1) 从输变电设备故障概率以及故障后果入手,将设备检修优先级的决策量落实到设备检修风险收益上,较为客观有效。

2) 故障概率模型能综合响应老化失效、健康状况和天气环境变化对设备故障可能性的影响,较为全面考虑了影响设备故障概率的各类风险因素。

3) 采用蒙特卡罗法模拟电网运行场景,从设备、人身环境、系统、社会等多层次分析设备经济性与非经济性的损失严重程度,提高了设备故障后果严重程度评判结果的说服力和严谨度。

4) 能根据不同应用条件下设备及系统参数差异化筛选出需要进行检修的设备集合,具有较好的应用前景。

由于蒙特卡罗抽样仿真法的计算效率受限于系统潮流的计算效率,因此下一步的工作重点是研究高效率的重采样方法以提高本方法在大系统分析时的运行速度,以满足系统的在线运算要求。

参考文献

[1] 黄江倩, 赵舫, 程伟华, 等. 基于风险管理方法的配网检修计划优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 94-100.
HUANG Jiangqian, ZHAO Fang, CHENG Weihua, et al. Optimization of distribution network maintenance plan based on risk management method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 94-100.

[2] 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.

[3] ZHAO Jinqian, ZHANG Yujie, ZHANG Pan, et al. Development of a WAMS based test platform for power system real time transient stability detection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 11pp.
DOI 10.1186/s41601-016-0013-1

[4] ASCEBRENNER D, KRANZ H G, RUTGER W R, et al. Online PD measurements and diagnosis on power transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(2): 216-222.

[5] 谢善益, 杨强, 王彬, 等. 开放式输变电设备状态监测信息平台设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 125-130.
XIE Shanyi, YANG Qiang, WANG Bin, et al. Design and implementation of open information platform for transmission and transformation equipment condition monitoring[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 125-130.

[6] 毕建权, 鹿鸣明, 郭创新, 等. 一种基于多分类概率输出的变压器故障诊断方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 88-93, 100.
BI Jianquan, LU Mingming, GUO Chuangxin, et al. A transformer fault diagnosing method based on multi-classified probability output[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 88-93, 100.

[7] 石鑫, 朱永利, 萨初日拉, 等. 基于深度信念网络的电力变压器故障分类建模[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 71-76.
SHI Xin, ZHU Yongli, SA Churila, et al. Power transformer fault classifying model based on deep belief network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 71-76.

[8] 施恂山, 马宏忠, 张琳, 等. PSO 改进 RBPNN 在变压器故障诊断中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 39-44.
SHI Xunshan, MA Hongzhong, ZHANG Lin, et al. Application of RBPNN improved by PSO in fault diagnosis of transformers[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 39-44.

[9] 国家电网公司企业标准. 架空输电线路状态评价导则:

- Q/GDW 1173—2014[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [10] 国家电网公司企业标准. 油浸式变压器(电抗器)状态评价导则: Q/GDW 11-106—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [11] 王佳明, 刘文颖, 魏帆, 等. 基于寿命周期成本管理的输变电设备状态检修策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 77-80.
WANG Jiaming, LIU Wenyong, WEI Fan, et al. Study on policies of condition based maintenance of transmission and distribution equipment combined with life cycle cost management[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 77-80.
- [12] 黄嘉健, 王昌照, 郑文杰, 等. 基于状态监测的配电网可靠性检修选择模型[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 164-168.
HUANG Jiajian, WANG Changzhao, ZHENG Wenjie, et al. Reliability-centered maintenance selection for distribution network based on condition monitoring[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 164-168.
- [13] 敖蕾蕾, 王慧芳, 张弛, 等. 基于 D-S 证据理论的输变电设备状态检修多目标群决策[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1627-1633.
AO Leilei, WANG Huifang, ZHANG Chi, et al. Multi-objective and group decision-making research based on D-S evidence theory in condition-based maintenance for transmission and transformation equipment[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1627-1633.
- [14] JIANG Y, MCCALLEY J D, VANVOORHIS T. Risk-based resource optimization for transmission system maintenance[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1191-1200.
- [15] 汲国强, 吴文传, 张伯明, 等. 一种适用于状态检修的电力设备时变停运模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 139-146.
JI Guoqiang, WU Wenchuan, ZHANG Bomeng, et al. A time-varying component outage model for power system condition-based maintenance[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 139-146.
- [16] 熊小伏, 王建, 袁峻, 等. 时空环境相依的电网故障模型及在电网可靠性评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 28-35.
XIONG Xiaofu, WANG Jian, YUAN Jun, et al. Temporal and spatial environments dependent power grid failure method and its application in power grid reliability assessment[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 28-35.
- [17] HE D, ZHANG Y, GUO C X, et al. Failure probability model of transmission and transformation equipment for risk assessment[C] // IEEE Power & Energy Society General Meeting, Boston, USA, 2016.
- [18] 潘乐真, 鲁国起, 张焰, 等. 基于风险综合评判的设备状态检修决策优化[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(11): 28-32, 66.
PAN Yuezhen, LU Guoqi, ZHANG Yan, et al. Decision-making optimization of equipment condition-based maintenance according to risk comprehensive evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(11): 28-32, 66.
- [19] 国家电网公司企业标准. 输变电设备风险评估导则: Q/GDW 1903—2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [20] Terms for reporting and analyzing outages of electrical transmission and distribution facilities and interruption to customer service: IEEE Standard 346—1973[S].
- [21] IEEE guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers: IEEE Standard C57.104—2008[S]. IEEE Power & Energy Society, 2009.
- [22] IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers: IEEE Standard C57.91—1995[S].
- [23] 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 and rating system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 141-148.
- [24] 中华人民共和国国务院令 第 599 号. 电力安全事故应急处置和调查处理条例[M]. 北京: 中国法制出版社, 2011.
- [25] 电监安全(2008)43 号. 关于加强重要电力用户供电电源及自备应急电源配置监督管理的意见[S].
- [26] 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.

收稿日期: 2016-10-15; 修回日期: 2017-01-29

作者简介:

肖辅盛(1982—), 男, 本科, 主要从事电网运行管理及分析工作; E-mail: treason@163.com

高适(1986—), 男, 本科, 主要从事地区电网电力调度管理工作; E-mail: 344961830@qq.com

邓超志(1988—), 男, 硕士, 主要从事地区电网电力调度管理工作。E-mail: georgedcz@163.com

(编辑 张爱琴)