

计及风险损失的配电设备检修方式选择

霍明雷, 刘艳, 杨林

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071000)

摘要: 针对目前在设备检修方式选择方面未将设备健康指数、检修成本和设备故障损失综合考虑的问题, 提出了一种结合设备状态评价结果, 计及检修成本和检修后设备风险损失的检修方式选择决策模型。定义设备风险损失为设备故障损失和设备故障概率的乘积, 设备故障损失由设备资产损失和电网运行损失两部分组成, 并给出了各部分的具体计算公式。分析了检修成本的组成和计算方法以及不同检修方式对设备故障率的影响。最后以检修成本和检修后设备风险损失之和最小为目标, 量化的方法对配网设备检修方式进行选择, 并结合算例给出了某状态下两台变压器检修方式的选择过程, 结果表明了所提模型的有效性。

关键词: 配电设备; 检修方式; 风险损失; 故障率; 检修成本

Maintenance mode selection of power distribution equipment considering the loss of risk

HUO Ming-lei, LIU Yan, YANG Lin

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China)

Abstract: As the fact that current equipment maintenance mode selection does not include device health index, maintenance costs and loss of equipment failure, an optimized model considering the above elements for distribution network equipment maintenance mode selection is proposed. The new model defines the loss of risk as the product of the loss and the probability due to equipment failure where the equipment failure loss is consist of equipment asset loss and power loss. The specified calculation formula of each part is given. The composition of maintenance costs, calculation methods and the effects that different maintenance modes have on the equipment failure rates are analyzed. Aiming at the minimum sum of maintenance costs and the risk of loss after repair, a quantified method is employed in selecting the maintenance mode. An example is shown to elaborate the selection procedure of two transformers maintenance modes in certain condition and well proves the effectiveness of the model.

Key words: power distribution equipment; maintenance mode; loss of risk; failure rate; maintenance cost

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)19-0100-07

0 引言

随着用电需求的持续增长, 配电网结构日益复杂, 设备数量也随之骤增。配网设备作为配电系统的重要组成部分, 对配电网的安全可靠运行起着至关重要的作用。而科学合理地对设备进行检修是保证设备正常运行和提高电网供电可靠性的有效措施。当前, 传统的事后检修、定期检修体制已不能适应配网发展和用户对高可靠供电的要求, 状态检修作为一种经济、高效的检修方式, 正逐步被采用和实施^[1]。状态检修(Condition Based Maintenance, CBM)以设备当前的实际工作状况为依据, 以安全、可靠性、环境、成本为基础, 通过设备状态评价、风险评估、检修决策, 达到设备运行安全可靠, 检

修成本合理的一种检修策略。随着设备监测技术、故障诊断技术、寿命管理与预测技术和管理决策技术的发展和完善, 地方电力公司结合本地具体情况, 依据国家电网公司相关标准和导则, 状态检修工作正有序开展^[2-6]。

状态检修从一提出就吸引了众多的专家和学者, 但国内外在电网设备状态检修方面的研究主要集中在设备的状态评估^[7-8]、基于设备健康状态的可靠性研究^[9-11]和设备的检修决策优化^[12-13]等方面, 应用状态评价结果进行检修方式选择方面的研究相对较少。设备运行过程中可能会有多个部件的多个健康指标出现不同程度的恶化, 随着技术水平的提高, 检修人员既可以选择整体维修, 更换或者修复全部不合格零件, 全面消除检修前存在的缺陷, 恢

复设备的额定功能和精度;也可选择局部维修,更换或者修复主要失效部件,解决主要问题,恢复设备的正常功能。然而不同检修方式的检修费用是不同的,对设备性能的改善程度也有显著差别。通过检修使设备安全经济地完成规定功能,需要大量的资金投入,受检修成本的限制,管理者需要将有限的资金最有效地用于降低设备造成的风险,以提高设备和电网运行的经济性、安全性^[4]。目前,有关电力设备检修方式选择方面的研究已取得了一定的成果,但也存在一定的不足。文献[15]考虑了不同检修方案的风险因素,综合可靠性和经济性,应用马尔可夫决策方法对设备检修方案进行了优化,然而该方法中定义的状态转移概率是根据实际电力设备的状态转移统计得出的,与设备当前的健康指数联系不够紧密,缺乏针对性。文献[16]充分考虑了设备的当前状态,提出了效用指标和不同维修方式的成本组成,以单位成本提高的效用最多为目标进行维修方式选择,但其效用指标仅考虑了对设备性能的改善,未计及设备故障损失多少的影响。迄今为止,在状态检修的体制下还没有一种依据设备当前健康状态评价结果,统筹检修费用与因检修不到位造成故障的风险及后果的量化选择方法供检修决策人员参考。

基于已有研究成果,本文综合考虑了不同检修方式对设备和电网的影响,以设备资产损失和电网运行损失之和来表征设备当前的故障损失。然后结合设备状态评价结果,考虑不同检修方式的检修成本和对设备故障概率的影响,综合设备资产损失、电网运行损失及设备发生故障的概率三者的作用,以检修成本和检修后设备风险损失之和最小为目标,结合算例用量化的方法对配网设备进行了检修方式的选择。

1 设备风险损失分析

1.1 设备健康指数评估

电网设备状态评价是状态检修管理机制的基础,对设备做出继续运行、加强监控、停役检修、检修方式选择等决策,首先必须准确可靠地评估设备当前的健康状况^[7]。对设备进行状态评价不仅要依据设备当前的状态监测数据,还要综合考虑设备的先天数据(家族史)、传统实验数据、检修、缺陷等。依据国家电网公司《配网设备状态评价导则 Q/GDW 645-2011》,状态评价采用扣分制,分为部件评价和整体评价。某部件的状态评价得分可由式(1)得出。

$$\begin{cases} M_p = m_p \cdot K_F \cdot K_T \\ m_p = 100 - \text{相应部件状态量中的最大扣分值} \\ K_T = \frac{100 - \text{设备运行年数} \cdot \alpha}{100} \end{cases} \quad (1)$$

式中: p 代表设备中的某一部件,取值 $1 \sim n$ (n 为设备的部件数); M_p 为部件 p 的最后得分; m_p 为部件 p 的基础得分; K_F 为家族缺陷系数,有家族缺陷的部件取 0.95 ,无家族缺陷的部件取 1 ; K_T 为寿命系数; α 为役龄折算因子,取值 $0 \sim 1$ 。

设备的整体评价由综合考虑各部件评价得出,若一个及以上部件得分在正常状态以下(≤ 85 分),则该设备的最后得分为各部件中状态评价得分最低的部件得分。否则,设备的整体健康指数得分公式为

$$HI = \sum_{p=1}^n K_p \times M_p \quad (2)$$

式中: HI 为设备的健康指数,取值范围为 $0 \sim 100$,值越高表明设备越健康; K_p 为各部件的权重系数,

$$\sum_{p=1}^n K_p = 1。$$

1.2 故障概率求解

设备发生故障与否虽然是随机的,但是故障的发生多会经过一段时间的劣化,这可体现在设备健康指数的降低。因此,设备故障率与设备的健康指数有着密切关系。一般认为,设备的健康指数与故障率之间存在如下公式^[18]。

$$\lambda = K \cdot e^{-C \cdot HI} \quad (3)$$

式中: λ 为设备故障率; K 和 C 分别为比例系数和曲率系数,可由统计数据用反演法求出。

若已知设备在某一时间段($t_1 \sim t_2$)各时刻的故障率大小,我们便可根据故障率与可靠性之间的关系求出设备在该时间段的可靠度 $R(t)$ 为

$$R(t) = e^{-\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt} \quad (4)$$

式(4)所示为某段时间内设备不发生故障的概率,而现实中我们往往更关心在某一时刻设备不发生故障的概率。因此,本文假设在较短时间 ΔT 内设备的故障率不变,即为一常数,得出在某时刻 t 设备的可靠度公式 $R(t)$ 和故障概率公式 $F(t)$ 如式(5)所示。

$$\begin{cases} R(t) = e^{-\lambda(t) \Delta T} \\ F(t) = 1 - R(t) \end{cases} \quad (5)$$

1.3 设备故障损失

本文将设备故障损失分为两个部分：设备资产损失和电网运行损失。

1.3.1 设备资产损失

本文将设备运行过程中在某时刻随机故障后通过维修或替换恢复设备规定功能所投入的费用称为设备资产损失。设备出现劣化后未能及时安排维修而导致的故障停运，往往会对设备的部分部件造成致命损坏，所以此时维修所投入的费用要比预防性维修大得多。某时刻 t 的设备资产损失可通过式(6)量化求得。

$$L_{\text{equ}} = L_{\text{rep}} + \sum_{i \in m} M_i \quad (6)$$

式中： L_{equ} 为设备资产损失； L_{rep} 为设备故障后检修的费用，包括人工费、机械费、材料费等； m 为故障后由于部件损坏较严重无法再修复或修复费用过高，需要按同类型部件重置的部件集合； M_i 为部件 i 按同类型部件重置的费用。

1.3.2 电网运行损失

配电网作为与用户直接相关的供电终端，设备随机发生故障不仅会对设备本身带来损失，还往往会导致通过该设备供电的部分用户供电中断，致使电网直接失去负荷。同时设备发生故障后通过系统运行方式的变化，可能会导致该设备供电的另一部分用户虽未停电，但随着电网供电可靠性、安全裕度的降低，电网具有随机失去该部分负荷的风险。另外供电中断还可能造成人身伤亡、设备损坏、生产停滞、生活紊乱等现象，直接或间接地造成经济损失。综上所述，本文将电网运行损失定义为：若设备在某时刻随机发生故障，由此带来的电网潜在损失总量。它包括直接失负荷损失、随机失负荷损失和对用户造成的经济损失三部分。具体量化表达式为

$$\begin{cases} L_{\text{grid}} = L_{\text{dir}} + L_{\text{rand}} + L_{\text{eco}} \\ L_{\text{dir}} = \sum_{i \in M} D_i \int_t^{t+T} p_i(t) dt \cdot C_0 \\ L_{\text{rand}} = P_k \sum_{i \in N} D_i \int_t^{t+T} p_i(t) dt \cdot C_k \\ L_{\text{eco}} = \sum_{i \in M} (T \cdot C_i) \end{cases} \quad (7)$$

式中： L_{grid} 为设备故障造成的电网运行损失； L_{dir} 为设备故障造成的直接失负荷损失； L_{rand} 为设备故障造成的随机失负荷损失； L_{eco} 为设备故障对用户造

成的经济损失； M 为供电中断用户集合； N 为系统运行方式改变导致虽未停电，但供电安全性降低的用户集合； P_k 为设备故障后所影响的 N 个用户停电概率； D_i 为用户 i 处负荷的重要度系数，一、二、三级负荷分别取值3、2、1； T 为故障持续时间； $p_i(t)$ 为用户 i 的负荷曲线； C_0 为单位电价； C_k 为随机失负荷单位电量损失； C_i 为用户 i 缺电单位时间经济损失。

1.4 设备风险损失

设备风险损失以量化的风险值为指标，不仅要考虑设备故障导致的总损失，还要考虑其发生的可能性，也就是设备发生故障的概率^[12]。因此，设备在时刻 t 的风险损失可用式(8)量化表达式表示。

$$R(t) = F(t) \cdot (L_{\text{equ}} + L_{\text{grid}}) \quad (8)$$

式中： $R(t)$ 为 t 时刻设备的风险损失； L_{equ} 和 L_{grid} 可分别由式(6)和式(7)得出。

2 不同检修方式对故障率的影响

2.1 检修分类及成本组成

随着检修技术的提高，检修人员针对某一劣化设备可采取的检修方式已有不同选择。本文依据国家电网《配网设备状态检修导则 Q/GDW 644-2011》和具体工程实际，将检修方式分为大修和小修。

大修：指整体性检修，更换或者修复全部不合格的零件，达到全面消除检修前存在的缺陷，恢复设备的额定功能和精度。

小修：指局部性检修，对设备部分功能部件进行局部的分解、检查、修理、更换。解决主要问题，恢复设备的正常功能。

不同的检修方式，对设备状况的修复程度具有显著差异，需要的检修成本也不同。由于检修成本的多少对检修方式的选择有着直接影响，所以准确的计算检修成本显得十分重要。本文通过统计检修涉及到的各方面因素，定义检修成本 L 由检修工程费 L_1 、配件购置费 L_2 和其他费用 L_3 三部分构成。计算公式为

$$L = L_1 + L_2 + L_3 \quad (9)$$

其中： L_1 主要考虑人工费、消耗性材料费、施工机械使用费； L_2 包括配件价格和将配件运至施工现场的运杂费； L_3 由施工赔偿费、项目管理费等检修辅助费用组成。

2.2 检修后故障率求解

不同检修方式不仅对部件的修复程度不同，而且处理的部件数量也不相同。因此，不同检修方式

实施后将导致设备健康指数不同, 从而致使设备故障率有所差异。以下对两种检修方式对应的故障率分别求解。

采用大修方式的设备, 由于其对部件进行了全面的修复或更换, 其性能基本可恢复到投运时的状态。综合考虑其服役年龄的影响, 大修后设备的健康指数可由式(10)得出。

$$HI_{af,B} = HI_0 \cdot K_T \quad (10)$$

式中: $HI_{af,B}$ 为设备大修后的健康指数; HI_0 为设备投运时的健康指数。

采用小修方式的设备, 只对主要失效部件进行了修复或者更换。对某一检修部件而言, 本文采用役龄回退因子^[9]来描述检修对部件性能的改善情况, 检修后部件的故障率求解公式为

$$\begin{cases} t_{eq} = t_{ac}(1 - \theta) \\ \lambda_{af} = \lambda(t_{eq}) \end{cases} \quad (11)$$

式中: t_{ac} 为某检修部件当前的实际服役年龄, 本文采用威布尔分布曲线对设备故障率曲线进行分段拟合, 然后采用前文中基于健康指数的故障率求解方法求得该部件当前健康指数对应的故障率, 再依此故障率在对应的故障率曲线上查得相应的运行年数即为 t_{ac} ; t_{eq} 为部件的等效役龄; θ 为役龄回退因子, 本文参照文献[9]取0.5; λ_{af} 为该部件检修后的故障率, 可由等效役龄根据其对应的故障率曲线查得。

求得部件检修后的故障率 λ_{af} 后, 由式(3)经变换可反求出部件 p 检修后的状态得分 M_p 为

$$M_p = \frac{1}{C} \ln \frac{\lambda_{af}}{K} \quad (12)$$

得到各检修部件检修后的状态得分后, 依据上文已述的设备整体评价方法便可得出设备小修后的健康指数 $HI_{af,L}$ 。

将上述大修、小修两种检修方式对应的检后健康指数分别代入式(3)即可得出设备采用不同检修方式后的故障率大小。

3 计及风险损失的检修方式选择模型

检修的经济性与设备造成的风险是相互矛盾的两个方面。降低设备造成的风险, 则需要增加检修成本的投入, 若检修不足, 则会造成设备的风险损失升高。为使两者之间协调达到最大满意程度, 本文建立的检修方式选择目标函数为检修成本与检修后设备的风险损失之和最小, 即

$$E = \text{Min}(L_i + R_{af,i}) = \text{Min}[L_i + F_{af,i}(L_{equ} + L_{grid})] \quad (13)$$

式中: L_i 为 i 类检修方式的成本; $R_{af,i}$ 为设备实施 i 类检修方式后的风险损失; $F_{af,i}$ 为设备实施 i 类检修方式后的故障概率。

检修方式选择过程流程图如图1所示。

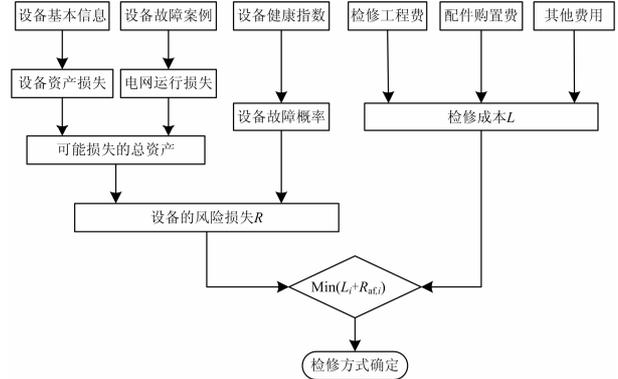


图1 检修方式选择流程图

Fig. 1 Flow chart of the maintenance mode selection

4 算例分析

以某实际配电系统中35 kV主变T1和10 kV配电变压器T2的检修方式选择为例, 系统结构和负荷数据如图2和表1所示, 变压器评估的部件划分和权重参见文献[19]。两台变压器分别于2006年、2003年投入运行, 假设投运时健康指数均为95, K 、 C 取值分别为8 640和0.143。

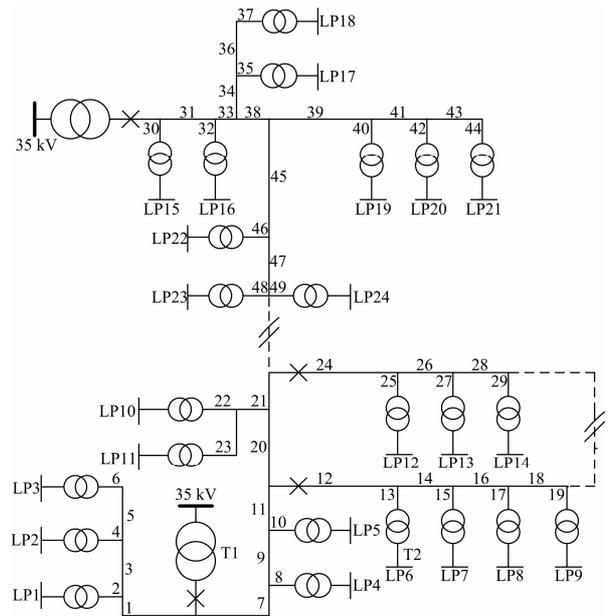


表 1 负荷数据
Table 1 Customer data

负荷点	用户类型	平均负荷/MW	峰值负荷/MW	负荷等级
1-3,6,20,21	居民用户	0.933	1.511 7	3
10,11,19,24	居民用户	0.415	0.672 7	3
12,13	工业用户	1.15	1.864 2	3
14	工业用户	1.00	1.621 3	2
4,5,7,15,16,22	政府&机关	0.766	1.241 7	3
8,9,17,18,23	商业用户	0.854	1.384 4	3

在某次评估中两者均由于绝缘油的严重劣化和污染，导致介质损耗因数 $\tan \delta$ 升高异常，绝缘强度减小，对应的状态量扣分为30分，缺陷发生前设备的健康指数为86，缺陷发生后为70。参照本设备或同类设备以往累积故障记录，该类故障模式造成的设备风险损失估算如表2，其中 C_0 、 C_k 取值分

别为0.5元和1元，每一负荷点当做一用户处理。针对上述状况，通过分析可采取如下两种方式进行检修。

大修：将严重劣化和污染的绝缘油更换成新油，并对设备的其他劣化部件进行修复，消除检修前存在的全部缺陷。

小修：仅对绝缘油进行净化吸附处理，降低介质损耗因数，能基本解决现存的问题，使设备恢复到正常指标。

按国家相关标准和导则，检修人工费采用检修工程基准工日单价，普工为34元/工日，技工53元/工日；运杂费为配件购置费的0.3倍。其他相关参数参照历史统计数据得出。得出两台设备不同检修方式的检修成本信息如表3。

根据表2和表3通过计算可得出两台设备检修方式的选择结果如表4。

表 2 两台设备的故障损失计算结果
Table 2 Results of each equipment failure loss

设备号	检修费 $L_{rep}/$ 万元	部件重 置费/ 万元	设备资产 损失 $L_{equi}/$ 万元	持续时 间 $T/$ 天	停电用 户 M	影响用 户 N	影响用 户停电 概率 P_k	直接失负 荷 $L_{dir}/$ 万元	随机失负 荷 $L_{rand}/$ 万元	经济损 失 $L_{eco}/$ 万元	总损失 /万元
T1	2	80	82	10	1-9	10-14	0.1	92.8	12.3	20	207.1
T2	0.6	3	3.6	4	6	0	—	4.5	0	2.5	10.6

表 3 两种检修方式的成本计算结果
Table 3 Results of each maintenance mode cost

设备号	检修 方式	检修所需 时间/天	人工费 /万元	消耗性材 料费/万元	机械使用 费/万元	配件费/ 万元	运杂费/ 万元	其他费用/ 万元	总成本/ 万元
T1	大修	8	0.5	2	2.2	3	0.9	0.8	9.4
	小修	4	0.3	1.8	1	1	0.3	0.4	4.8
T2	大修	6	0.3	0.6	0.5	0.8	0.24	0.06	2.5
	小修	3	0.1	0.4	0.3	0.2	0.06	0.03	1.1

表 4 设备检修方式选择结果
Table 4 Results of equipment maintenance mode selection

设备号	检修 方式	检后状 态指数	检后故 障概率	目标函 数值	选择 结果
T1	大修	92	0.016	12.7	大修
	小修	82	0.070	19.3	
T2	大修	91	0.019	2.7	小修
	小修	82	0.070	1.8	

由表3可见，设备T1的大修成本9.4万元明显高于小修成本4.8万元，但它修理彻底，解决问题的能力高于仅对绝缘油进行净化吸附的小修方式，随之产生的是较低的设备故障率。由于此设备的故障损失与检修成本相比很大，检修后设备故障概率的轻微变化就会对决策产生较大影响，此时设备的安全可靠运行显得尤为重要，检修成本已不是影响检修

方式选择的主要因素。综合考虑检修成本和检后设备风险损失后，大修方式的目标函数值12.7万小于小修方式的19.3万，此设备选择大修方式较为合理。对于设备T2而言，虽然大修方式维修彻底，能使设备性能得到全面修复，但它是以资金的投入作为代价的。由于此设备故障损失较小，一味地投入资金降低其风险意义不大，投入适量的资金将其风险限定在一个可接受的水平上更为可取。综合考虑以上因素后，该设备小修方式的目标函数值1.8万小于大修方式的2.7万，选择小修方式更为合适。

对比设备 T1 和设备 T2 可以发现：同一劣化状态的设备，由于其故障造成的损失不同，最终确定了不同的检修方式。这是因为当设备故障造成的损失较大时，为确保设备的可靠运行，保守的检修方式更有优势；反之，检修的经济性为影响检修决策

的主要因素。而按照以往惯例, 设备出现类似扣分状态时, 检修人员一般会采用相同的检修方式。通过本文所提模型的量化计算, 在降低风险的同时考虑了检修成本, 为检修人员在检修方式选择时提供了新的思路。

5 结论

本文以配网设备检修方式的选择为研究背景, 首先根据配电网的实际特征对配电设备故障造成的设备资产损失和电网运行损失进行了分析计算; 进而给出了针对劣化设备可采用的大修方式和小修方式的成本组成及对设备故障率的影响; 最后以检修成本和检后设备风险损失之和最小为目标, 导出了计及风险损失的配电设备检修方式选择模型。该模型不仅体现了不同检修方式的成本差异和对设备的改善程度, 还考虑了设备故障造成的损失大小, 使检修决策更加科学合理。通过对检修决策结果的定量比较可以给检修决策者科学的建议, 使其在有限的资金下采取最合理的检修方式。

参考文献

- [1] 许婧, 王晶, 高峰, 等. 电力设备状态检修技术研究综述[J]. 电网技术, 2000, 24(8): 48-52.
XU Jing, WANG Jing, GAO Feng, et al. A survey of condition based maintenance technology for electric power equipments[J]. Power System Technology, 2000, 24(8): 48-52.
- [2] 胡志坚, 李洪江, 文习山, 等. 基于差分 GPS 的输电线路舞动和风偏在线监测方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 120-124.
HU Zhi-jian, LI Hong-jiang, WEN Xi-shan, et al. Online monitoring of transmission conductor wave and wind gallop based on differential GPS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 120-124.
- [3] 任静, 黄家栋. 基于免疫 RBF 神经网络的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 6-10.
REN Jing, HUANG Jia-dong. Transformer fault diagnosis based on immune RBF neural network[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 6-10.
- [4] 郑蕊蕊, 赵继印, 赵婷婷, 等. 基于遗传支持向量机和灰色人工免疫算法的电力变压器故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 56-63.
ZHENG Rui-rui, ZHAO Ji-yin, ZHAO Ting-ting, et al. Power transformer fault diagnoses based on genetic support vector machine and gray artificial immune algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 56-63.
- [5] 费胜巍, 孙宇. 融合粗糙集与灰色理论的电力变压器故障预测[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 154-160.
FEI Sheng-wei, SUN Yu. Fault prediction of power transformer by combination of rough sets and grey theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 154-160.
- [6] 张金萍, 刘国贤, 袁泉, 等. 变电设备健康状态评估系统的设计与实现[J]. 现代电力, 2004, 21(4): 45-49.
ZHANG Jin-ping, LIU Guo-xian, YUAN Quan, et al. Design and realization of evaluation of health condition system for transformation equipment[J]. Modern Electric Power, 2004, 21(4): 45-49.
- [7] 廖瑞金, 王谦, 骆思佳, 等. 基于模糊综合评价的电力变压器运行状态评估模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 70-75.
LIAO Rui-jin, WANG Qian, LUO Si-jia, et al. Condition assessment model for power transformer in service based on fuzzy synthetic evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 70-75.
- [8] 郭磊, 郭创新, 曹一家, 等. 考虑断路器在线状态的电网风险评估方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 20-24.
GUO Lei, GUO Chuang-xin, CAO Yi-jia, et al. Power transmission risk assessment considering breaker online status[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 20-24.
- [9] 潘乐真, 张焰, 愈国勤, 等. 状态检修决策中的电气设备故障率推算[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(2): 91-94.
PAN Le-zhen, ZHANG Yan, YU Guo-qin, et al. Prediction of electrical equipment failure rate for condition-based maintenance decision-making[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 91-94.
- [10] 王一, 何奔腾, 王慧芳. 基于全寿命状态的设备可靠性研究[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 207-211.
WANG Yi, HE Ben-teng, WANG Hui-fang. Research on equipment reliability based on life cycle states[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 207-211.
- [11] 王慧芳, 杨荷娟, 何奔腾, 等. 输变电设备状态故障率模型改进分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 27-31.

- WANG Hui-fang, YANG He-juan, HE Ben-teng, et al. Improvement of state failure rate model for power transmission and transforming equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 27-31.
- [12] 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.
- PAN Le-zhen, LU Guo-qi, 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.
- [13] 胡兵, 夏涛, 薛志鹏, 等. 一种计及检修风险的配电网检修优化方法[J]. 华东电力, 2013, 41(4): 802-807.
- HU Bing, XIA Tao, XUE Zhi-peng, et al. Maintenance optimization for power distribution network considering maintenance risks[J]. East China Electric Power, 2013, 41(4): 802-807.
- [14] 尹斌, 陈健飞, 盛华. 基于风险的油田油气集输管线维护决策优化方法[J]. 化工设备与管道, 2012, 49(2): 55-58.
- YIN Bin, CHEN Jian-fei, SHENG Hua. Risk based optimum method used in maintenance decision for oil and gas pipeline in oil field[J]. Process Equipment & Piping, 2012, 49(2): 55-58.
- [15] 郭基伟, 柳纲, 唐国庆, 等. 电力设备检修策略的马尔科夫决策[J]. 电力系统自动化学报, 2004, 16(4): 6-10.
- GUO Ji-wei, LIU Gang, TANG Guo-qing, et al. Markov decision process on electrical equipments maintenance optimization[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2004, 16(4): 6-10.
- [16] 王一, 王慧芳, 张亮, 等. 基于效用和成本的状态检修维修方式选择研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 39-45.
- WANG Yi, WANG Hui-fang, ZHANG Liang, et al. Research on maintenance type selection with CBD technology based on effectiveness and cost analysis[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 39-45.
- [17] 王一. 输变电设备状态检修决策研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- WANG Yi. Study on the condition based maintenance decision-making for transmission and transformation equipments[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [18] HUGHES D, DENNIS G, WALKER J, et al. Condition based risk management (CBRM)-enabling asset condition information to be central to corporate decision making[C] // Proceedings of the 1st World Congress on Engineering Asset Management. Gold Coast, Australia: WCEAM, 2006: 1212-1217.
- [19] Q/GWD 645-2011 配网设备状态评价导则[S].

收稿日期: 2014-01-05; 修回日期: 2014-03-04

作者简介:

霍明雷(1989—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为配电系统可靠性与状态检修决策优化; E-mail: ncepu_hml@163.com

刘艳(1973—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统安全防御与恢复技术, 智能技术在电力系统中的应用, 状态检修等。