

基于比例强度模型的变压器不完全检修策略

赵洪山, 李宇昊

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要:将不完全检修这一实际问题考虑到变压器状态检修策略中,提出了基于比例强度模型的变压器状态检修策略。首先,建立变压器比例强度模型,给出比例强度模型中不完全检修参数的详细计算模型,并对计算过程中的时间参数和检修参数进行敏感性分析,确定其合理的取值范围,明确不完全检修活动的检修效果;然后,确定变压器状态检修策略,利用最小成本法确定比例强度模型的状态检修阈值曲线,并增设阈值下限值作为状态检修策略的限制性指标;最后,利用实际变压器故障统计数据和状态监测数据进行算例分析,从检修成本、检修次数和检修时间三方面分别分析改进后的比例强度模型在不完全检修情况下的有效性,为变压器的状态检修决策提供可靠的理论依据。

关键词:变压器;状态检修;不完全检修;比例强度模型

中图分类号:TM 411

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202102009

0 引言

变压器是电力系统的关键部件,其检修活动关乎变压器及其关联电网整体运行的可靠性^[1-2]。检修的定义为“在设备的生命周期内,所有旨在将其保留或恢复到可执行所需功能状态的技术、行政和管理措施的组合”^[3]。当设备因老化或故障使其使用效率降低时,需要采取特定的措施才能正常运行。然而,最初的检修在各大企业中未受到重视,其主要原因为设备检修相关数据的获取及分析难度较大^[4]。而随着IT技术的不断发展,数据的获取和分析难度愈渐降低,而且可以利用各种数学工具对检修的相关方面(例如检修成本和设备可用度)进行优化。

在不断发展的数据处理技术的推动下,检修策略更加主动化。最早的故障检修(CM)仅对设备已发生的故障做出反应,无法做到有效预防。文献[5]总结了检修在工业环境中的演变^[5],被动的CM方法发展为更具“主动性”的预防性检修(PM)方法,能够减少设备发生故障的次数、延长设备的使用寿命。文献[6]将设备检修模式分为完美检修(修复如新)、不完全检修、最小检修(修复如旧)、检修不当(设备状态更差)、破坏性检修(致使设备直接故障)。明确的检修模式分类有利于实施相对应的维修策略。除了设备更换外,将被检修的设备恢复到最初始状态是很难实现的,一般都为不完全检修^[7]。文献[8]研究了检修不当和破坏性检修。文献[9]总结并讨论了用于不完全检修的各种方法。

随着设备配置的在线状态传感器越来越多,基于状态的检修模式的优点越来越突出^[10],文献[11]也指出状态检修减少了不必要的检修措施,并消除

了与预防性检修措施有关的风险。比例风险模型PHM(Proportional Hazard Model)作为较典型的状态检修模型,综合考虑了设备的运行时间以及状态监测数据对其故障率函数的影响,适用于分析与多个协变量因素有关的设备劣化过程。文献[12]利用PHM建立了风电机组的状态检修模型,文献[13]利用PHM建立了油浸式变压器的状态检修模型。但PHM存在局限性,无法考虑多次维修对变压器性能的影响^[14]。为此,文献[15]对PHM进行进一步扩展,得到比例强度模型PIM(Proportional Intensity Model),其关注设备全寿命过程中反复多次的失效及修理过程,能更好地反映设备性能的劣化演变,适用于重复失效可修设备的状态检修建模研究^[15]。PIM考虑了每次检修活动对设备健康状态的影响,更加符合实际情况,但其具体影响程度还需要考虑不完全检修,且现有文献中没有计及PIM相关参数的详细计算方法,无法将其直接用于实际的检修工作中^[11]。

相较于500 kV以下电压等级的变压器,500 kV变压器的检修成本较高,对状态检修的实用性有更高的要求。为此,本文提出了基于PIM的变压器不完全检修策略。首先,建立变压器的PIM以反映实时状态变化;然后,研究变压器PIM参数的估计方法;最后,利用实际变压器的故障统计数据和状态监测数据验证考虑不完全检修比例强度维修策略的有效性。

1 变压器的PIM

1.1 PIM

PIM能在计算故障率的同时考虑设备寿命、检修活动和状态信息,从而对设备状态进行更加全面的评估。对于变压器的故障诊断,综合考虑运行时

间、检修活动与性能参数之间的相互关系,能更好地反映变压器的性能变化。

文献[16]综述了PIM参数的多种估计方法,主要对基本强度函数服从Weibull分布的PIM进行参数估计。研究表明,油浸式变压器的故障时间满足Weibull分布^[17],其强度函数为:

$$v(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \varepsilon_n T_n}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{\gamma_i Z_i(t)} \quad (1)$$

其中, $\gamma_i Z_i(t)$ 为变压器的第 i 个协变量状态监测信息,系数 γ_i 为与之对应的协变量, $Z_i(t)$ 为对变压器设备强度的影响程度; $v(t)$ 为给定运行时间 t 时在已知 $Z_i(t)$ 的情况下设备的强度值; β 为Weibull分布的形状参数; η 为Weibull分布的尺度参数; ε_n 为改善因子,反映检修效应,当 $\varepsilon_n = 0$ 时,表示此次检修为最小检修,当 $\varepsilon_n = 1$ 时,表示此次检修为完美检修; T_n 为检修时间; $t - \varepsilon_n T_n$ 为设备的虚拟役龄。

此外,PIM一方面以强度函数反映设备状态的自然衰退,另一方面以设备各协变量的实时状态监测数据与该模型阈值曲线的相互关系反映设备相应协变量所对应的设备异常变化情况。PIM中考虑的协变量越多,对变压器的故障监测越全面。

1.2 PIM的参数估计

考虑不完全检修的PIM的强度函数是一个分段函数,以检修时间为间隔。在第1个寿命周期内, $T_n = 0$,此时对式(2)进行参数估计。

$$v(t) = \frac{\beta}{\eta} (t/\eta)^{\beta-1} e^{\gamma_i Z_i(t)} \quad (2)$$

PIM考虑不完全检修,通过改善因子 ε_n 描述检修程度(计算方法见第2节), ε_n 的大小决定了变压器在第 $n+1$ 个寿命周期初始状态的设备役龄回退程度。用 $t - \varepsilon_n T_n$ 替换式(2)中的 t 可计算得到PIM在第 $n+1$ 个寿命周期的强度函数,故只需考虑第1个寿命周期的强度函数的参数估计。而PIM与PHM在第1个寿命周期内的强度函数一致,且油浸式变压器的故障数据满足Weibull分布(即样本总体分布类型已知),所以参数估计方法可参考PHM所使用的极大似然估计法^[18]。利用变压器的历史故障数据以及相应协变量状态监测数据对PIM的参数进行极大似然估计,将式(2)的对数函数分别对 β 、 η 、 γ_i 求偏导数,令并偏导数为0,可以得到 $n+2$ 维的非线性方程组,代入协变量状态监测数据 $Z_i(t)$ 及寿命数据 t ,利用Newton-Raphson迭代法求解即可得参数 β 、 η 、 γ_i 的估计值,从而可得到PIM的具体表达式。

2 PIM中改善因子的计算

2.1 改善因子 ε_n 的计算方法

改善因子 ε_n 越大,表明检修效果越好,变压器

的役龄回退越多; ε_n 越小,表明检修效果越差。通过改进文献[19]中改善因子的计算方法,以完善基于状态的变压器不完全检修模型。考虑到改善因子 ε_n 随时间变化,且受检修成本、检修次数、检修时间(实际役龄)影响,其计算公式为:

$$\varepsilon_n = (u C_{wx} / C_{zh})^{wn} \quad (3)$$

其中, C_{wx} 为变压器的检修成本, C_{zh} 为变压器的置换成本,且有 $0 < C_{wx} < C_{zh}$; u 为成本调节系数,表明成本变化对 ε_n 的影响; v 为时间系数,表明变压器役龄对 ε_n 的影响; n 为检修次数; w 为检修系数。

改善因子 ε_n 的取值主要受检修成本、检修次数、检修时间(实际役龄)这3个因素影响,且改善因子的取值是动态的,变压器经检修后,其强度函数因不完全检修措施所致的变化如图1所示(变压器分别在运行时间 t_1 、 t_2 处进行了不完全检修活动; v_0 为变压器检修阈值)。

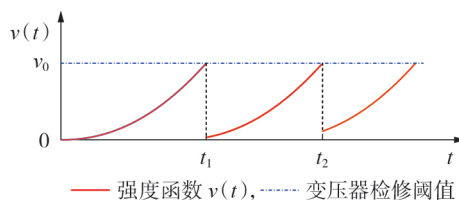


图1 不完全检修状态下的强度函数 ($0 < \varepsilon_n < 1$)

Fig.1 Intensity function under imperfect maintenance state ($0 < \varepsilon_n < 1$)

2.2 敏感性分析

为了提高计算结果的准确性,需确定改善因子 ε_n 计算公式中各参数的合理取值范围,本节对改善因子 ε_n 进行敏感性分析。

(1) 时间系数 v 。

令 v 在 $[0.001, 0.01]$ 范围内平均选取20个数据,经仿真得到变压器役龄对改善因子的影响曲线,见附录中图A1。由图可知,随着变压器役龄增加,改善因子逐渐减小,但改善因子曲线的斜率在不断增加; v 的大小影响 ε_n 的初始值,随着 v 增大,改善因子的初始值不断降低。考虑变压器的实际检修方式,本文选取 $v \in [0.001, 0.01]$,该范围能较均匀地体现检修对时间的敏感性,不致使改善因子因时间的增长而变化得过快或过慢。

(2) 检修系数 w 。

令 w 在 $[0.2, 0.8]$ 范围内平均选取20个数据,经仿真得到检修次数对改善因子的影响曲线,见附录中图A2。由图可知,随着检修次数的增加, ε_n 逐渐减小,但曲线斜率在不断增加,约第6次检修后曲线变化趋于平缓(如图中20条虚线所示,各曲线“急降区”与“平缓区”的分隔点主要分布在第6次检修附近);随着 w 的增大, ε_n 的初始值不变,可知初始值与检修系数 w 无关。考虑变压器的实际检修情况,应

尽量降低检修次数对改善因子的影响,所以本文选取 $w \in [0.3, 0.6]$ 。

3 基于PIM的变压器不完全检修策略

PIM通过强度函数 $v(t)$ 的变化反映了变压器运行状态受不同役龄、状态协变量、检修成本、检修次数的影响,即强度函数 $v(t)$ 的值可以定量反映变压器的运行状态。当 $v(t)$ 的值高于某个预先设定的阈值 v_0 (如式(4)所示)时,就对变压器实施状态检修。

$$v(t) > v_0 \quad (4)$$

即:

$$\frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \varepsilon_n T_n}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{\gamma_i Z_i(t)} > v_0 \quad (5)$$

为了便于直接对变压器实际所测的状态协变量进行观察比较,并进行状态评估,将式(4)变换处理^[18]为:

$$\phi(t) > \phi_0(t) \quad (6)$$

$$\begin{cases} \phi(t) = \gamma_i Z_i(t) \\ \phi_0(t) = \ln \frac{\eta^\beta v_0}{\beta} - (\beta - 1) \ln(t - \varepsilon_n T_n) \end{cases} \quad (7)$$

其中, $\phi(t)$ 由状态协变量的实时监测数据计算得到; $\phi_0(t)$ 为 $v(t) = v_0$ 时变压器状态检修阈值曲线。

另外假设 ϕ_L 为状态检修阈值曲线的下限值,当变压器状态检修阈值曲线 $\phi_0(t) < \phi_L$ 时,若变压器不进行检修继续运行, $\phi_0(t)$ 将继续下降,安全裕度过低。此时,变压器同样需要进行检修。

综上所述,出现以下2种情况时需对变压器进行检修:① $\phi(t) > \phi_0(t)$, ② $\phi_0(t) < \phi_L$ 。状态检修阈值曲线如图2所示,分别在运行时间 t_1 、 t_2 处进行了上述2种情况下的检修活动,运行时间 t_1 处未标注变压器状态监测数据计算所得 $\phi(t)$ 。此外, $\phi_0(t)$ 是以检修时间为间断点的分段函数, ε_n 与 T_n 的取值决定了变压器各段检修阈值曲线 $\phi_0(t)$ 的初始值。

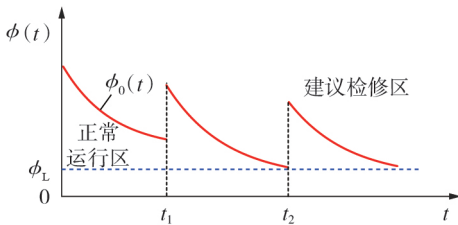


图2 状态检修阈值曲线

Fig.2 Threshold curve of state maintenance

求取上述状态检修阈值曲线 $\phi_0(t)$ 及其下限值 ϕ_L 的关键在于确定检修阈值 v_0 , 本文采用经典的最小检修成本法^[20], 以变压器单位时间检修成本最小为目标求取最优检修阈值 v_0 , 将其代入式(7)可得变压器的状态检修阈值曲线 $\phi_0(t)$, 检修时间 $t_{\min}$ 在阈

值曲线 $\phi_0(t)$ 上对应的值即为阈值曲线下限值 ϕ_L 。

4 算例验证

变压器故障主要存在电气性能、热性能和机械性能退化故障。油中溶解气体分析(DGA)技术具有很好的过热故障预检测能力;放电故障更适合使用局部放电检测技术进行检测;机械性故障虽然会最终发展成电气故障,但现有振动检测技术可以更早期地对机械性故障做出预防。为了使PIM对变压器的状态监测更全面,选取变压器的DGA数据、油纸绝缘局部放电量峰值、箱体表面振动峭度数据3种状态监测量作为协变量。本节基于某变压器厂生产的SFP-720000/500型油浸式变压器的故障数据和状态监测数据进行仿真分析。

4.1 参数估计

附录中表A1和表A2分别给出了10台同型号变压器(1—10)的历史故障数据和变压器4的DGA数据、油纸绝缘局部放电量峰值数据以及箱体表面振动峭度数据3种状态协变量的监测数据(数据有部分缺失,后续算例采用120—206月的完整状态数据进行参数计算与分析),利用极大似然估计法及Newton-Raphson迭代法得到变压器比例强度函数中的参数 β 、 η 、 γ_i , 结果如附录中表A3所示。

因此,该类油浸式变压器的PIM为:

$$v(t) = \frac{2.0766}{159.5944} \left(\frac{t - \varepsilon_n T_n}{159.5944} \right)^{1.0766} \times e^{0.0424 Z_q(t) + 0.0049 Z_d(t) + 0.7209 Z_z(t)} \quad (8)$$

$$Z_q(t) = z_1(t) + 1.1533 z_2(t) + 10.9505 z_3(t) + 0.0142 z_4(t) \quad (9)$$

其中, $Z_q(t)$ 为DGA数据; $z_1(t)$ — $z_4(t)$ 分别为4种气体数据; $Z_d(t)$ 为局放放电量峰值数据; $Z_z(t)$ 为箱体表面振动峭度数据。

参考文献[20]中的最小成本法,得到最小检修成本对应的变压器运行时间 $t_{\min} = 120$ 月,将其代入式(2)求解得到对应的变压器检测阈值为 $v_0 = 0.19$ 。将上述参数及所得检测阈值代入式(7)求得第1个寿命周期内变压器PIM状态检修阈值曲线 $\phi_0(t)$ 及下限值 $\phi_L = 2.9834$, 如图3所示。当位于曲线 $\phi_0(t)$ 下方时,变压器处于正常运行状态;当位于曲线 $\phi_0(t)$ 上方时,建议立即对变压器进行检修。此外,当 $\phi_0(t) < \phi_L$ 时,也建议对变压器进行检修。

4.2 不完全检修模型

由式(1)可知,变压器的恢复程度取决于 $t - \varepsilon_n T_n$ 的取值,其主要受检修成本、检修次数和检修时间影响。为了便于分析,本节仅以图2中在运行时间 t_2 处进行情况②下的检修活动为例,对不完全检修进行分析。方法同样适用于检修情况①。

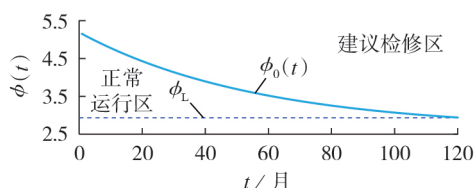


图3 首次预防性状态检修前检修阈值曲线及下限值

Fig.3 First pre-preventive state maintenance threshold curve and its lower limiting value

4.2.1 不同的检修成本

假设理想情况下变压器在 $t=120$ 月处进行2种检修的成本比分别为 $C_{wx1}/C_{zh1}=0.6$ 、 $C_{wx2}/C_{zh2}=0.2$,其余参数相同。设定成本调节系数 $u=1$,参照2.2节的敏感性分析,设时间系数 $v=0.01$,检修系数 $w=0.5$,检修次数 $n=1$ 。计算相应的改善因子 ε_n 代入式(7)得阈值曲线如图4所示,结果见表1。其中, $\Delta\phi$ 为变压器阈值曲线初始值与新寿命周期阈值曲线峰值的差值; ΔT 为新寿命周期的自然寿命(即无故障发生情况下,运行至 $\phi(t)<\phi_L$ 时的寿命)。

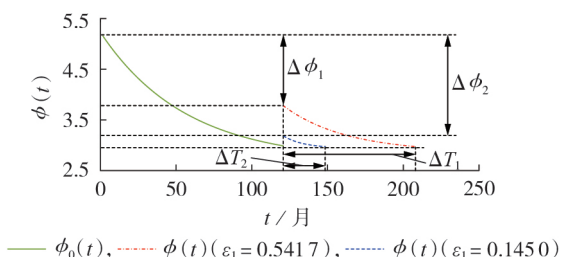


图4 不同检修成本对阈值的影响

Fig.4 Impact of different maintenance costs on threshold

表1 不同检修成本的影响

Table 1 Impact of different maintenance costs

检修活动	检修成本比	u	v	w	n / 次	ε_n	$\Delta\phi$	ΔT / 月
1	0.6	1	0.01	0.5	1	0.5417	1.2712	70
2	0.2	1	0.01	0.5	1	0.1450	1.9656	21

由表1可知,不同检修成本的改善因子分别为 $\varepsilon_1=0.5417$ 、 $\varepsilon_2=0.1450$,相比于上一个寿命周期的阈值曲线峰值,新寿命周期阈值曲线峰值分别降低了1.2712(24.44%)、1.9656(37.74%),自然寿命分别为70、21月,前者相比于后者,检修后阈值曲线峰值提升了13.32%。

4.2.2 不同的检修次数

假设理想情况下变压器在 $t=120$ 月处进行检修,2种检修活动的历史检修次数分别为1、2次,设检修成本比均为0.6,其余参数与4.2.1节相同,此时的阈值曲线和相关结果分别见附录中图A3和表A4。由表A4可知,不同检修次数的改善因子分别为 $\varepsilon_1=0.5417$ 、 $\varepsilon_3=0.4230$,相比于上一个寿命周期的阈值曲线峰值,新寿命周期阈值曲线峰值分别降

低了1.2712(24.44%)、1.5139(29.06%),自然寿命分别为70、53月,前者相比于后者,检修后阈值曲线峰值提升了4.62%。

4.2.3 不同的检修时间

假设理想情况下变压器在 $t=100$ 月、 $t=120$ 月处分别进行检修,检修成本和检修次数均相同,其余参数与4.2.1节相同,此时的阈值曲线和相关结果分别见附录中图A4和表A5。由表A5可知,不同检修时间的改善因子分别为 $\varepsilon_1=0.5417$ 、 $\varepsilon_4=0.6000$,相比于上一个寿命周期的阈值曲线峰值,新寿命周期阈值曲线峰值分别降低了1.2712(24.44%)、0.9834(18.88%),自然寿命分别为70、85月,后者相比前者,检修后阈值曲线峰值提升了5.56%。另外,相比于在 $t=120$ 月时检修,在 $t=100$ 月时检修的状态阈值下降更快,检修频率略高,证明了利用最小成本法求取最优检修阈值的正确性。

4.3 状态检修决策

实际运行中可根据变压器的状态变化(即PIM)决定是否采取检修动作,且下一次检修也是根据PIM的计算结果确定的。将变压器各状态监测数据代入式(7)进行加权计算并在图中描点,如图5所示。当散点 $\phi(t)$ 位于状态检修阈值曲线 $\phi_0(t)$ 的下方时,变压器正常运行;当散点 $\phi(t)$ 位于状态检修阈值曲线 $\phi_0(t)$ 的上方时,变压器需要立即进行检修。此外,当状态检修阈值曲线低于阈值下限 ϕ_L 时也需要进行检修。

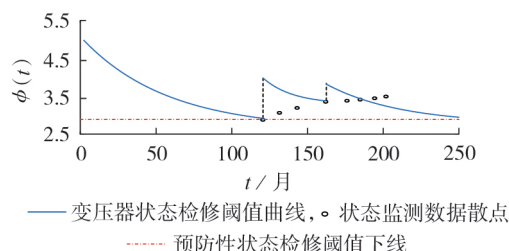


图5 检修决策图

Fig.5 Maintenance decision map

图5所示变压器发生了 $\phi_0(t)<\phi_L$ 和 $\phi(t)>\phi_0(t)$ 这2种需进行检修的情况,因缺失实际检修活动的相关数据,此处假设2次检修活动的改善因子均为 $\varepsilon_n=0.5417$ 。而在 $t=195$ 月与 $t=206$ 月处,所描点已处于检修阈值曲线上方,建议立即检修。

与现有状态检修策略相比,本文所提基于PIM的变压器不完全检修策略,利用PIM综合考虑了运行时间、检修活动与在线监测状态参数间的相互关系,能更好地实时反映油浸式变压器的性能变化。另外,相比于现有的采用专家经验取值的PIM检修策略,本文所提用于PIM参数 ε_n 的计算方法更客观,所制定的检修策略更合理。

5 结论

针对变压器的检修问题,本文提出了基于PIM的不完全检修策略;利用某变压器的历史故障数据和状态监测数据,从检修成本、检修次数和检修时间三方面分析不完全检修策略对变压器状态恢复的具体效果;计算得到以检修活动时间为间断点的分段状态检修阈值曲线,基于此制定状态检修决策。所得主要结论如下:

(1)给出改善因子 ε_n 的计算模型并考虑其受检修成本、检修次数、检修时间的影响,是不完全检修与状态检修相结合的关键;

(2)对 ε_n 计算模型中的参数进行敏感性分析,确定其合理的取值范围,能更合理地表征不完全检修活动对变压器状态恢复程度的效果;

(3)变压器经不完全检修后,应用PIM可得新寿命周期阶段的状态检修阈值曲线,为考虑不完全检修的变压器状态检修决策提供可靠的理论依据。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 李如琦,唐林权,凌武能,等. 基于云理论和前景理论的变压器状态维修风险决策[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):104-108.
LI Ruqi, TANG Linquan, LING Wuneng, et al. Risk decision-making based on cloud theory and prospect theory for conditional maintenance of power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 104-108.
- [2] 王辉,郝丽丽,黄梅,等. 基于历史故障信息的配电网设备故障概率建模[J]. 电力自动化设备,2020,40(3):76-84.
WANG Hui, HAO Lili, HUANG Mei, et al. Failure probability model of distribution network equipment based on historical fault information[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 76-84.
- [3] DE CARLO F, ARLEO M A. Imperfect maintenance models, from theory to practice[J]. System Reliability, 2017(18): 335-354.
- [4] SHERWIN D. A review of overall models for maintenance management[J]. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2000, 6(3): 138-164.
- [5] FURLANETTO L, MASTRIFORTI C. Outsourcing e global service: nuova frontiera della manutenzione[M]. Milano, Italy: Franco-Angeli, 2000: 202-206.
- [6] WANG H, PHAM H. Reliability and optimal maintenance[M]. Berlin, Germany: Springer Group, 2006: 140-142.
- [7] VAN HORENBEEK A, PINTELON L, MUCHIRI P. Maintenance optimization models and criteria[J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2010, 1(3): 189-200.
- [8] CHAN P K W, DOWNS T. Two criteria for preventive maintenance[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1978, 27(4): 272-273.
- [9] KURT M, KHAROUFEH J P. Optimally maintaining a Markovian deteriorating system with limited imperfect repairs[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 205(2): 368-380.
- [10] 穆斌,刘艳. 考虑TSC提升的配电网区域机会维修模型[J]. 电力自动化设备,2018,38(3):50-55,62.
- MU Bin, LIU Yan. Regional opportunistic maintenance model for distribution network considering improvement of total supply capability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 50-55, 62.
- [11] 栗然,王飞飞,李增辉. 基于风险评估的配电网检修决策优化[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):1-8.
LI Ran, WANG Feifei, LI Zenghui. Maintenance decision making optimization based on risk assessment for distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 1-8.
- [12] 赵洪山,张健平,程亮亮,等. 考虑不完全维修的风电机组状态-机会维修策略[J]. 中国电机工程学报,2016,36(3):701-708.
ZHAO Hongshan, ZHANG Jianping, CHENG Liangliang, et al. A condition based opportunistic maintenance strategy for wind turbine under imperfect maintenance[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 701-708.
- [13] 岳国良,梁敏,王永强,等. 基于PHM的油浸式变压器维修决策研究[J]. 电测与仪表,2014,51(7):23-28.
YUE Guoliang, LIANG Min, WANG Yongqiang, et al. Research of oil-immersed transformer maintenance decision based on proportional hazards model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(7): 23-28.
- [14] YUAN Fuqing, UDAY K. Proportional intensity model considering imperfect repair for repairable systems[J]. International Journal of Performability Engineering, 2013, 9(2): 163-174.
- [15] 张继权. 基于比例强度模型的风电机组优化检修策略研究[D]. 保定:华北电力大学,2010.
ZHANG Jiquan. Optimized maintenance decision of wind turbine-generator system based on proportional intensity model[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2010.
- [16] KUMAR D, KLEFSJÖ B. Proportional hazards model: a review[J]. Reliability Engineering & System Safety, 1994, 44(2): 177-188.
- [17] 刘惟信. 机械可靠性设计[M]. 北京:清华大学出版社,1996: 74-75.
- [18] 王文焕,杨国生,周泽昕,等. 基于随机截尾数据及极大似然估计的继电保护可靠性分布[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(12):125-131.
WANG Wenhuan, YANG Guosheng, ZHOU Zexin, et al. Reliability distribution of relay protection based on random truncation data and maximum likelihood estimation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 125-131.
- [19] 卓明良,潘尔顺,廖雯竹,等. 基于可靠度限制的周期性预防维护模型研究[J]. 工业工程与管理,2009,14(1):62-65.
ZHUO Mingliang, PAN Ershun, LIAO Wenzhu, et al. Study on periodic preventive maintenance model based on limitation of reliability[J]. Industrial Engineering and Management, 2009, 14(1): 62-65.
- [20] ELSAYED E A, CHAN C K. Estimation of thin-oxide reliability using proportional hazards models[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1990, 39(3): 329-335.

作者简介:



赵洪山

赵洪山(1965—),男,河北保定人,教授,博士,主要研究方向为电力设备故障诊断与优化检修(E-mail: zhaohshcn@ncepu.edu.cn);

李宇昊(1997—),男,山西长治人,硕士研究生,主要研究方向为电力设备状态检修策略优化(E-mail: liyuhaohd@163.com)。

(编辑 陆丹)

(下转第191页 continued on page 191)

Intelligent diagnosis and auxiliary decision of power system secondary equipment based on functional defect text

DAI Yuxin¹, ZHANG Jun¹, JI Zhixiang², LIU Mingzhong³, GAO Tianlu¹,
ZHENG Yongkang³, YAO Liangzhong¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

3. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract: A text information extraction model based on BiLSTM-CRF (Bi-directional Long Short-Term Memory and Conditional Random Field) model is established by using the functional defect text of power system secondary equipment. On this basis, in order to further apply the knowledge value contained in the data to the production and management process of power system, the knowledge graph for functional defects of power system secondary equipment is constructed, which can integrate the semantic information contained in various types of data into the relationship constraints among various types of entity. And an intelligent diagnosis and auxiliary decision platform for functional defects of secondary equipment based on BiLSTM-CRF model and knowledge graph is established. The platform can quickly diagnose the defective parts and causes of the equipment according to the type and phenomenon of defective equipment, and then recommend reasonable solutions. The numerical example analysis results show that, compared with the traditional named entity recognition algorithm, BiLSTM-Softmax model and Seq2Seq-Attention model, the evaluation indexes of accurate rate, recall rate and F_1 value for BiLSTM-CRF model are greatly improved, and the established platform can well mine and apply the knowledge and value of power text data, providing a useful reference for processing the functional defects of power system secondary equipment.

Key words: electric power systems; secondary equipment; information extraction; knowledge application; knowledge graph; BiLSTM-CRF; intelligent diagnosis; auxiliary decision

(上接第183页 continued from page 183)

Imperfect maintenance strategy of transformer based on proportional strength model

ZHAO Hongshan, LI Yuhao

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Taking the practical problem of incomplete maintenance into the consideration of transformers' state maintenance strategy, a state maintenance strategy based on proportional strength model is proposed. Firstly, the proportional strength model of transformer is established, and the detailed calculation model of incomplete maintenance parameters is given. The sensitivity analysis of time parameters and maintenance parameters in the calculation process is carried out to determine the reasonable value range and clarify the maintenance effect of incomplete maintenance activities. Then, the state maintenance strategy of transformer is determined. The minimum cost method is used to determine the state maintenance threshold curve of the proportional strength model, and the lower threshold value is added as a restrictive indicator for the state maintenance strategy. Finally, the actual fault statistics and state monitoring data of transformer are used for example analysis. The effectiveness of the improved proportional strength model in the case of incomplete maintenance is analyzed respectively from three aspects of maintenance cost, maintenance frequency and maintenance time, which provides a reliable theoretical basis for transformer's state maintenance decision.

Key words: electric transformers; state maintenance; imperfect maintenance; proportional strength model

附录

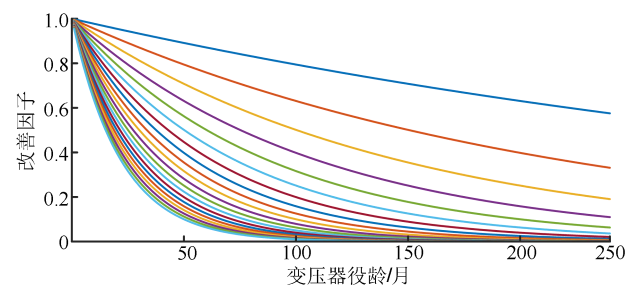


图 A1 变压器役龄对改善因子的影响

Fig.A1 Impact of transformer service age on improvement factor

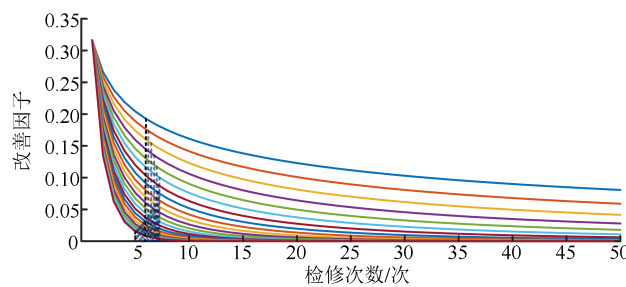


图 A2 检修次数对改善因子的影响

Fig.A2 Impact of maintenance time on improvement factor

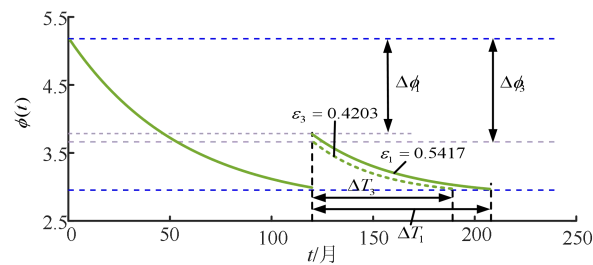


图 A3 不同检修次数对阈值的影响

Fig.A3 Impact of different maintenance times on threshold

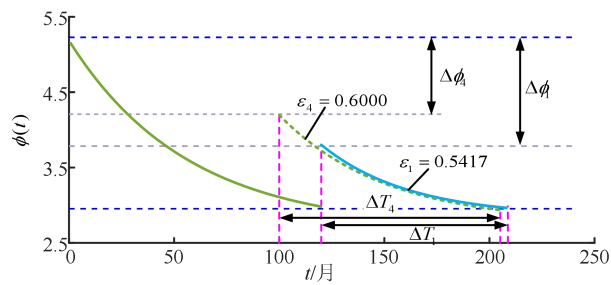


图 A4 不同检修时间对阈值的影响

Fig.A4 Impact of different maintenance times on threshold

表 A1 油浸式变压器的历史故障数据样本

Table A1 Historical fault data sample of oil immersed transformer

变压器	寿命/月	变压器	寿命/月
1	154	6	241
2	179	7	263
3	194	8	279
4	220	9	320
5	236	10	359

表 A2 变压器 4 状态数据的部分样本

Table A2 Partial sample of status data of Transformer 4

t /月	DGA 数据				放电量峰值/pC	振动峭度
	CO ₂ /CO	含水量/%	糖醛量/(mg·L ⁻¹)	聚合度		
26	2.2	0.0944	0.011	910.2	164	
61	3.1	0.209	0.043	810.8	176	
102	4.4	0.358	0.165	700.4	180	
120	5.7	0.546	0.251	623.5	189	1.8349
131	7.3	0.718	0.566	561.2	202	1.8591
142	7.9	1.029	0.981	506.3	230	2.0682
161	8.5	1.312	1.202	461.1	241	2.1878
176	9.4	1.748	1.478	370.3	268	2.4277
189	11.0	2.089	1.779	299.1	309	2.5286
195	12.1	2.480	2.017	240.2	320	3.0854
206	12.5	2.979	2.250	190.6	362	3.4858

表 A3 变压器 PIM 参数

Table A3 PIM parameters of transformer

参数	取值	参数	取值
β	2.0766	γ_3	0.4643
η	159.5944	γ_4	0.0006
γ_1	0.0424	γ_d	0.0049
γ_2	0.0489	γ_z	0.7209

表 A4 不同检修次数的影响

Table A4 Impact of different maintenance times

检修活动	C_{wx}/C_{zh}	u	v	w	n /次	ε	$\Delta\phi$	ΔT /月
1	0.6	1	0.01	0.5	1	0.5417	1.2712	70
3	0.6	1	0.01	0.5	2	0.4203	1.5139	53

表 A5 不同检修时间的影响

Table A5 Impact of different maintenance times

检修活动	C_{wx}/C_{zh}	u	v	w	n /次	ε	$\Delta\phi$	ΔT /月
1	0.6	1	0.01	0.5	1	0.5417	1.2712	70
4	0.6	1	0.01	0.5	1	0.6000	0.9834	85