

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.05.017

考虑多因素的变压器过负荷性能评价模型^{*}

夏伊乔¹, 郭创新^{1*}, 陈玉峰², 杨 祎², 刘 辉²

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国网山东省电力公司 电力科学研究院, 山东 济南 250002)

摘要:针对电网建设成本与高用电量需求的矛盾,以及变压器过负荷运行仅从热点温度建模、顶层油温模型考虑的现状,对影响过负荷性能的因素进行了研究,提出一种基于改进热点温度、设备故障率以及经济盈亏等多因素的变压器过负荷性能评价模型。基于修正热点温度约束及故障率约束生成满足安全性需求的过负荷运行预案;提出了概率损失概念,结合变压器经济盈亏性指标进行经济性评估;分析了变压器服役时间、计划运行时间等因素对短期过负荷运行的影响,得出了变压器过负荷性能综合评价及经济最优方案。研究表明,修正后的热点温度模型能更精确地表征变压器实际热点温度,多因素驱动的过负荷性能评价模型在短期停电检修场景下能给出运行综合工程决策,该决策对实际工况响应迅速,兼顾安全与经济性。

关键词:变压器;过负荷运行;HFE-TLC模型;修正热点温度;概率损失

中图分类号:TM621.5;TP24

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)05-0509-06

Evaluation model of transformer overload capacity considering multi-factors

XIA Yi-qiao¹, GUO Chuang-xin¹, CHEN Yu-feng², YANG Yi², LIU Hui²

(1. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Electric Power Research Institute, Shandong Power Supply Company of State Grid, Jinan 250002, China)

Abstract: Aiming at the problem of suspending power grid construction and solving the demand of high power consumption, and the problem of only considering the hot spot temperature or top oil temperature, a new model based on hot spot temperature-failure load probability-economy-transformer load capacity (HFE-TLC) was proposed. Based on the modified hot spot temperature model and the transformer failure probability model, the constraints of hot spot temperature and fault probability were determined. Fulfilled the above constraints, and combined the economic losses and economic benefits, the conception of probability loss was proposed to study the influence of the economy on the overload operation. The results indicate that the modified hot spot temperature model could more accurately characterize the actual hot spot temperature. By analyzing the influence of transformer service time and planned running time on short term overload operation, the model provides comprehensive suggestions for decision-making and proposes the theoretical support for the power grid risk assessment, which is driven by the quantitative analysis of multi-factors in the outage maintenance scene.

Key words: transformer; overload operation; HFE-TLC model; modified hot spot temperature; probability loss

0 引言

目前,已有大量针对输电线路过负荷性能的研究^[1]。但油浸式变压器由于其受环境因素影响不大,以及考虑的附件装置更为繁复,现有成果较少。已有的国内外研究主要仅从热点温度建模和顶层油温建模等几

方面进行^[2-3]。热点温度建模常用的有热传导模型和热电类比模型。文献[4]介绍了热传导模型。文献[5]基于电流分流算法,可对过载变电回路的负载性能评估。文献[6]介绍了热电类比模型,由于两者方程的实验解可通用,将传热量类比为电流、温度类比为电压、热电导热电容类比为电路中的电导电容,进而得出变压器热分

收稿日期:2016-12-11

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863计划”)资助项目(2015AA050204);国家电网科技项目(520626150032)

作者简介:夏伊乔(1992-),女,浙江杭州人,硕士研究生,主要从事变压器故障率建模及可载性评估的研究。E-mail: 391869267@qq.com

通信联系人:郭创新,男,教授,博士生导师。E-mail: guochuangxin@zju.edu.cn

布等效电路模型,最终求得绕组热点温度。

针对仅从热点温度或顶层油温建模不能全面准确地评价过负荷性能的问题,本研究提出一种考虑多因素的变压器过负荷性能评价模型。

1 HFE-TLC 建模流程

根据变压器构造机理与应用实际,HFE-TLC 模型认为影响变压器过负荷运行性能的因素主要有热点温度限制、设备故障率限制以及经济盈亏性指标。

具体 HFE-TLC 模型的架构流程如图 1 所示。

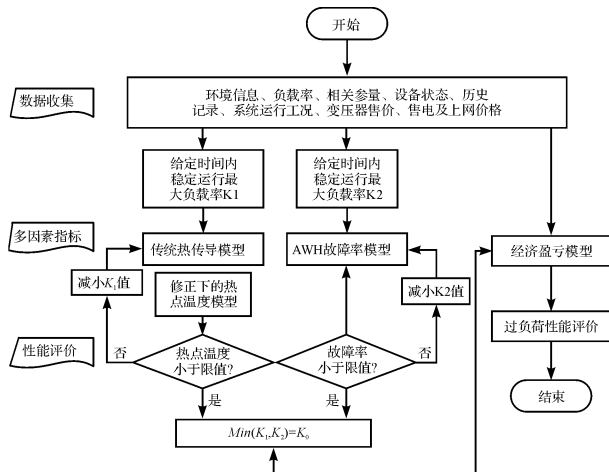


图 1 HFE-TLC 模型架构流程

HFE-TLC 模型在传统热传导模型的基础上,加入修正因子,使得改进的热点温度模型可量化多因素下的变压器热点温度。HFE-TLC 模型通过故障率建模确定故障率限制。对于热点温度和故障率约束,需要设定一个上限。而热点温度与负载率通过修正的热点温度模型联系,故障率与负载率由设备故障率模型关联,因此两个指标均可用负载率的值来等价量化表征。

过负荷运行经济盈亏指标由过负荷运行一段时间内的经济收入及损失叠加来定量判断。HFE-TLC 模型还提出在过负荷运行时全部设备临时偶发中断运行,进而造成社会经济损失的概率损失概念。过负荷运行的收入主要来自高负载率下收取的额外电费,以及防止重要用户停电而产生的机会收入。HFE-TLC 模型采用利润最大和盈亏平衡两项指标来对过负荷性能进行评价。

2 绕组热点温度指标

通常,为保证设备运行温度低于热点温度极限,需要对设备热点温度进行实时跟踪。

2.1 传统热传导模型

传统热传导模型的计算框图如图 2 所示。

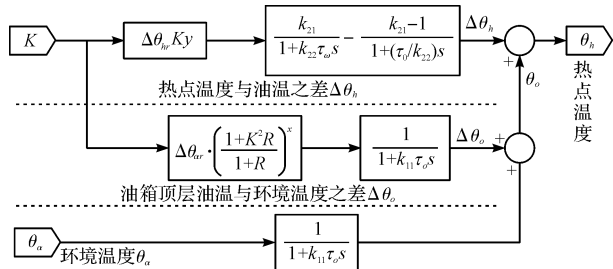


图 2 传统热传导模型计算框图

通过输入环境温度、负载率、相关参数等信息,得绕组热点温度 θ_h 公式如下:

$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_o + \Delta\theta_h \quad (1)$$

其中, $\Delta\theta_o$ 和 $\Delta\theta_h$ 可表示为:

$$\Delta\theta_o = \left(\frac{1 + K^2 R}{1 + R} \right)^x \cdot \Delta\theta_{or} - k_{11} \tau_o \cdot \frac{d\theta_o}{dt} \quad (2)$$

$$\Delta\theta_h = k_{21} \cdot K^\gamma \cdot \Delta\theta_{hr} - k_{22} \cdot \tau_w \cdot \frac{d\Delta\theta_{h1}}{dt} - (k_{21} - 1) \cdot K^\gamma \cdot \Delta\theta_{hr} + \left(\frac{\tau_o}{k_{22}} \right) \cdot \frac{d\Delta\theta_{h2}}{dt} \quad (3)$$

具体的参数说明见文献[7]。

2.2 改进的热点温度模型

变压器实际运行中,其绕组热点温度 θ_h 不仅取决于公式(1 ~ 3)中的温度 θ_a 、负载率 K 和各种参量大小,且与变压器的环境信息、故障预测和历史统计结果等要素相关,已有的传统热传导模型无法完整量化多因素下的变压器热点温度。

本研究结合《IEC60076-7-2005》导则、《IEEE C57.104》导则^[8]、《GB/T 7252-2001 变压器油中溶解气体分析和判断》导则^[9],以及某电力公司输变电设备状态评估系统接入的包括 EMS 和 PMS 在内的多源异构数据,整理多因素下变压器热点温度的样本,对比传统热传导模型计算的热点温度与《GB/T 1094.7-2008》导则差异^[10],HFE-TLC 模型提出变压器热点温度综合修正因子 m (modifying factor) 概念,对绕组热点温度进行修正,热点温度修正框架如图 3 所示。

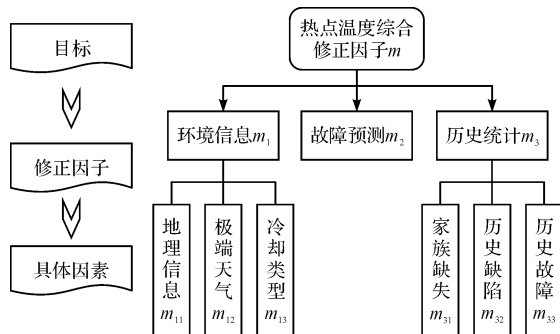


图 3 热点温度修正框架

改进后的热点温度 $\theta_H(t)$ 表示为:

$$\theta_H(t) = m \cdot \theta_n(t) \tag{4}$$

变压器的热点温度综合修正因子 m 的计算公式为:

$$m = m_1 \times m_2 \times m_3, m_1 = \prod_{n=1}^3 m_{1n}, m_3 = \prod_{n=1}^3 m_{3n} \tag{5}$$

下面就具体因素进行预评估:

(1) 地理信息。室内或室外变电站会作用于其运行温度^[11-12],进而使其热点温度发生变化,变压器的地理信息主要考虑了变电站的类型。室内变电站附带了散热排风装置,比常年暴露在外部的室外变电站更少地受环境温度影响,根据《IEC60076》导则,给出区分二者差异的地理信息修正如表1所示。

表1 地理信息修正表

地理信息	室内	室外	默认
m_{11}	1	1.01	1

(2) 极端天气。绕组热点温度与环境温度相关,后者的升高直接导致前者迅速升高,当处于极端天气(过冷或过热)时,环境温度会比常温时更大程度地影响绕组热点温度。为区分差异,根据《IEC60076》导则给出极端环境温度影响修正,如表2所示。

表2 极端天气修正表

极端天气/℃	< 0	0 - 35	> 35	默认
m_{12}	0.8	1	1.02	1

(3) 冷却类型。变压器油的散热情况取决于变压器容量及冷却类型,散热程度影响绕组热点温度的高低,根据《GB/T 7252-2001 变压器油中溶解气体分析和判断》导则规范,修正后冷却类型参数如表3所示。

表3 冷却类型修正表

冷却类型	OFAF	ONAN	ONAF	默认
m_{13}	1	1.02	1.02	1

注:OFAF—强迫油循环,ONAN—油浸自冷,ONAF—油浸风冷方式

(4) 故障预测。变压器常见故障由放电和过热引起,其中过热故障包括低温、中温、高温过热;放电故障含局部、低能以及电弧放电。发热故障对热点温度的影响一般大于放电故障,依据《GB/T 7252-2001 变压器油中溶解气体分析和判断》导则规定,进行了不同故障预测的修正,如表4所示。

表4 故障预测修正表

故障预测	无故障	过热	局部放电	低能放电	电弧放电
m_2	1	1.5	1.2	1.4	2.0

(5) 家族缺失。为体现变压器生产厂商、型号差别导致的质量、分布运行性能差异,针对海量厂商信息,

确定不同的可靠性等级划分标准如下:

① 质量合规,未发生任何问题;② 质量较合规,有过几次缺失,对设备安全运行无影响;③ 质量不合规,有反复性缺失,影响安全运行。

根据等级确定相应的修正如表5所示。

表5 家族缺失修正表

家族缺失等级	1	2	3	默认
m_{31}	1	1.02	1.05	1

(6) 历史缺陷与故障:变压器的状态可划分为4个阶段^[13]:① 良好,无殊且不需检修;② 注意,短期运行可靠性无明显影响,长期运行前需适时维修;③ 严重,可运行,但短期运行可靠性下降,经维修也不一定能改善;④ 故障,退出运行后经过检修可恢复工作,但成本高昂建议更换。变压器历史缺陷记录越多,对变压器的影响越大,间接造成热点温度变化。

本研究根据《IEEE C57.104》导则,对于历史缺陷记录及历史故障次数,给出修正值如表6、表7所示。

表6 历史缺陷修正表

历史缺陷/次	0 - 1	2 - 4	> 4	默认
m_{32}	1	1.02	1.05	1

表7 历史故障修正表

历史故障/次	0	1 - 2	> 2	默认
m_{33}	1	1.05	1.1	1

3 故障率指标

变压器过负荷运行时内部会产生气泡,健康状况、性能及绝缘强度都会出现下降,进而影响设备安全稳定运行。确定变压器过负荷运行时的故障率指标限制,可保证过负荷运行的安全性。已有的故障率建模研究多采用基于老化的 Weibull 模型^[14-17],未考虑设备运行期间的健康状况。HFE-TLC 模型选用文献[18]设计的考虑健康程度和负载率的变压器故障率 AWH 模型,其表达式如下:

$$\lambda(t, \gamma_H | \beta, n) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} = \frac{\beta}{C \cdot e^{\frac{B}{\theta_H+273}} \cdot \frac{e^{n \cdot \gamma_H} - 1}{e^n - 1}} \cdot \left(\frac{t}{C \cdot e^{\frac{B}{\theta_H+273}} \cdot \frac{e^{n \cdot \gamma_H} - 1}{e^n - 1}} \right)^{\beta-1} \tag{6}$$

式中: B, C, θ_H — 计算期望寿命的参数,根据情况查表所得; β, n — 形状参数和指数关系表达式系数,通过非序贯 Monte Carlo 方法对历史数据抽样拟合得出; γ_H , t — 健康指数和时间,自变量。

4 经济盈亏指标

考虑变压器过负荷运行的经济盈亏性指标时,只能在保障系统安全稳定前提的负载率下进行短期过负荷运行。HFE-TLC 认为该负载率由热点温度模型及故障率模型综合判断给出。HFE-TLC 模型的过负荷运行经济盈亏性指标由过负荷运行一段时间内经济收入和经济损失叠加情况来定量判断。

4.1 经济损失

通常过负荷运行的经济损失仅考虑表征设备加速设备老化产生的寿命损失 C_l , 以及铜耗、铁耗等其他损耗而导致的阻抗损失 C_p 。

但过负荷运行时可能会由于其健康状况下降,产生变压器临时停运的偶然故障现象,造成社会经济的损失。HFE-TLC 模型提出基于过负荷运行产生偶发故障,导致系统临时停运的概率损失 C_a 概念。概率损失 C_a 由设备停运后的电费损失 C_e 及设备临停联合损失 C_f 组成,即:

$$C_a = C_e + C_f \quad (7)$$

其中电费损失 C_e 表达式如下:

$$C_e = \sum_{i=1}^n S_N \cdot K_i \cdot \cos\theta \cdot t_i \cdot (R_{out} - R_{in}) \quad (8)$$

式中: S_N — 变压器额定容量, K_i — 负载率, $\cos\theta$ — 功率因数, R_{out} — 标准售电价格, R_{in} — 标准上网价格。

特别说明,经 HFE-TLC 模型拟合文献[19] 内的设备临停联合损失数据,得出设备临停联合损失 C_f 表达式为:

$$C_f = f \cdot K \cdot S_N \cdot \cos\theta \quad (9)$$

$$f = e^{0.0083t} - 0.01246t - 1 \quad (10)$$

式中: f — 设备临停联合损失函数, 元 /kW; t — 时间, min。

据此,变压器的过负荷运行总损失 C_{all} 为:

$$C_{all} = \begin{cases} C_l + C_p, & \text{正常} \\ C_l + C_p + C_a & \text{发生概率损失时} \end{cases} \quad (11)$$

其中:

$$C_l + C_p = \sum_{i=1}^n \frac{L_i \cdot R_t}{L_0} + \sum_{i=1}^n t_i \cdot (P_0 + P_k \cdot K_i^2) \cdot R_{in} \quad (12)$$

式中: R_t — 变压器的价格; P_k, P_0 — 变压器的负载及空载损失。

4.2 经济收入

过负荷运行的收入主要源于高负载率下的额外电费 I_e , HFE-TLC 模型还提出避免部分重要设备停运断

供的机会收入 I_w 概念,其表达式根据文献[20] 拟合如下:

$$I_w = (K - 1) \times (-0.0015t^2 + 3.3432t + 849.8) \times S_N \cdot \cos\theta \quad (13)$$

式中, t 的单位为分钟。

变压器的过负荷运行总收入 I_{all} 为:

$$I_{all} = I_e + I_w = \sum_{i=1}^n S_N \times K_i \times \cos\theta \times t_i \times (R_{out} - R_{in}) + (K - 1) \times (-0.0015t^2 + 3.3432t + 849.8) \times S_N \times \cos\theta \quad (14)$$

式中: S_N — 额定容量, K — 负载率, $\cos\theta$ — 功率因数, R_{out} — 标准售电价格, R_{in} — 标准上网价格, t 的单位是分钟。

HFE-TLC 模型的经济盈亏指标 Z 表达式为:

$$Z = I_{all} - C_{all} = \begin{cases} I_e + I_w - C_l - C_p, & \text{正常} \\ I_e + I_w - C_l - C_p - C_a & \text{发生概率损失时} \end{cases} \quad (15)$$

5 实验及结果分析

5.1 改进的绕组热点温度实例

本研究以某省电力公司 500 kV 变压器某年 1 月到 12 月的气象和生产管理系统数据为样本,选取该设备 7 月某日 24 个时间段的气温。

基于时间序列分解方法拆离负荷值及气温,本研究利用改进的热点温度模型对设备热点温度进行预测。对比传统热传导模型计算所得的热点温度及《GB/T 1094.7-2008》导则给出的数据,其热点温度预测结果对比如图 4 所示。

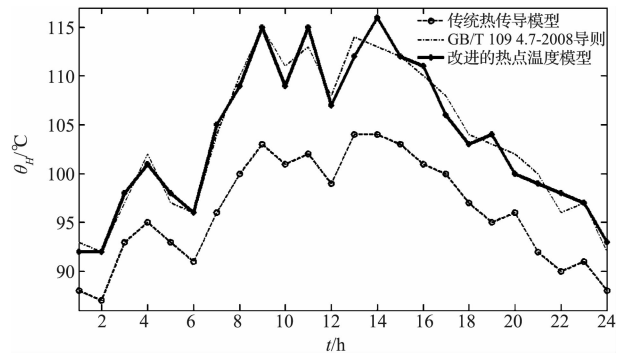


图 4 多模型热点温度对比

由计算结果可知,变压器所处的地理环境、极端天气(过热)、历史故障信息、历史缺陷信息等对于绕组热点温度的影响不能忽略,考虑了上述信息的改进热点温度模型预测的热点温度相较于传统模型,与

《GB/T 1094.7-2008》导则数据对比,24 个时间段的精度综合提升了 72.18%。以上分析说明 HFE-TLC 模型提出的改进绕组热点温度方法在工程应用中具有合理性及有效性。

5.2 变压器负载能力预评估

设置某一系统中若干变压器需要从某日 8:30 进行停电检修,经过负荷转供后仍会导致其中一台变压器过负荷运行的场景。通过热点温度限制以及故障率限制两方面进行负载能力预评估。

5.2.1 热点温度限制

依据此时设备负荷情况,确定 0.63 倍单位负载率为其初始值,以短期(几分钟到若干小时)过负荷运行限定的 140℃ 为温度极限值。HFE-TLC 模型根据改进的绕组热点温度模型,计算其在约定4 h内不间断过负荷运行的最大负载率,并在此基础上校验其热点温度极限值是否越限,结果如图 5 所示。

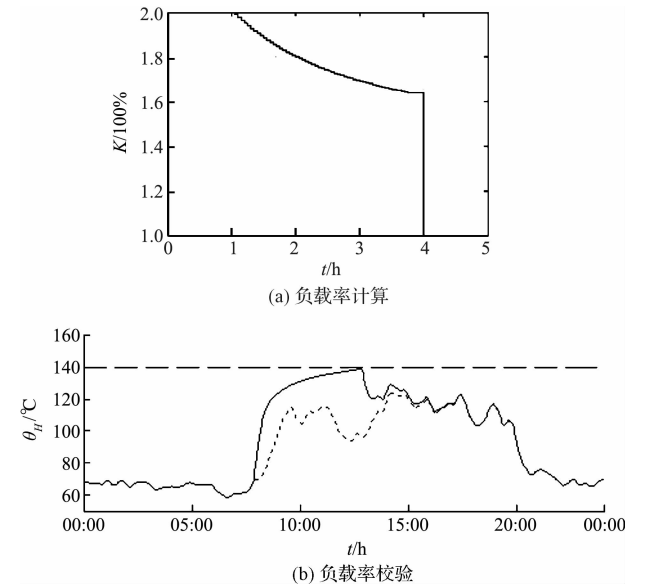


图5 热点温度限制下的负载率计算及校验

由图 5(a)可知,随着过负荷运行时间的增加,符合 140℃ 热点温度极限的变压器可承受负载率逐渐降低,满足 4 h 不间断过负荷运行的最大负载率为 1.62。由图 5(b)可知,将 1.62 倍负载率代入改进后的热点温度模型验证,确认其能满足 4 h 的运行时间且不超过热点温度极限。

5.2.2 故障率限制

根据文献[21],该变压器的理论寿命为 182 000 h,约 20.78 年;如今等价运行总时长达 10 年,其故障率极限为小于 0.024 3 次/台·年(即 2.77×10^{-6} 次/台·h)。经过 HFE-TLC 模型中采用的故障率模型分析,得出其在约定 4 h 内不间断过负荷运行的最大负

载率,并校验其故障率极限值。

由图 6(a)可得,随着过负荷运行时间的增加,确保 2.77×10^{-6} 次/台·h 故障率限制的变压器运行负载率逐渐降低,满足 4 h 不间断过负荷运行的最大负载率为 1.49。由图 6(b)可得,将 1.49 倍负载率代入 AWH 模型验证,确认其能满足 4 h 的运行时间且不超过故障率限制。故障率限制下的负载率计算及校验如图 6 所示。

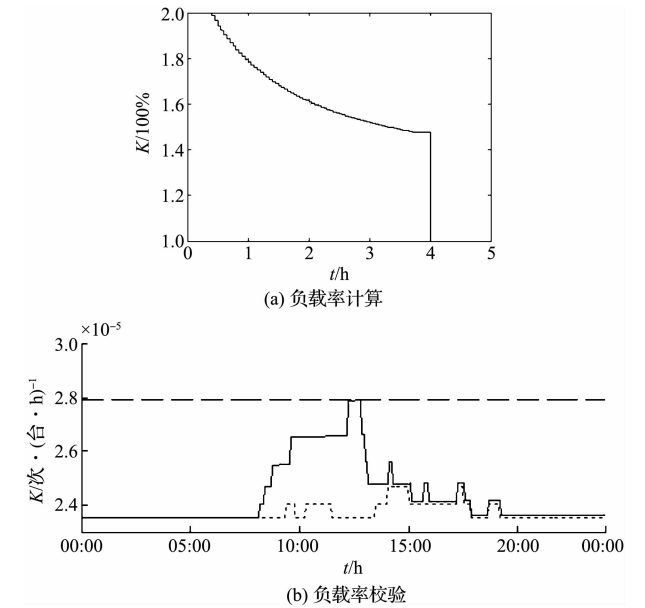


图6 故障率限制下的负载率计算及校验

5.3 变压器过负荷性能评价

为了验证 HFE-TLC 模型变压器过负荷性能评价的有效性,本研究设计了停电检修时,单台变压器的短期过负荷运行场景。基于负载能力预评估,直观展示了以动态运行时间及动态负载率为自变量的三维过负荷经济盈亏评价结果,如图 7 所示。

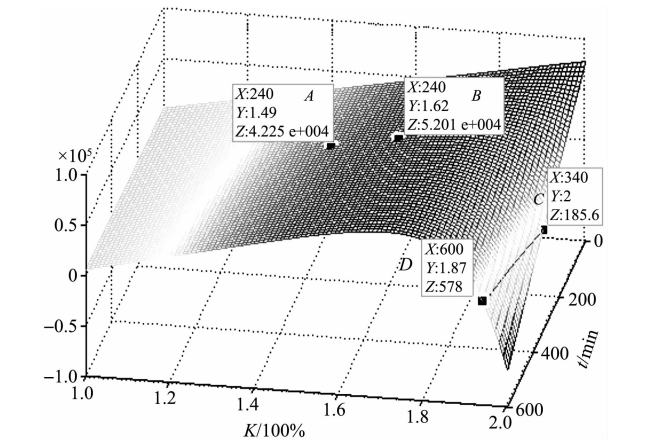


图7 过负荷运行经济盈亏评价

结果显示,A 点为满足故障率限制的利润最大 $Z_{\max}$ 点,运行时间 4 h,负载率为 1.49, $Z_{\max}$ 为 42 250

元。B 点是符合热点温度限制的 $Z_{\max}$ 点,运行时间为 4 h,负载率为 1.62, $Z_{\max}$ 为 52 010 元。为满足负载率同时处于故障率及热点温度限定范围内,建议该场景下工程应用的负载率小于 1.49。

根据三维曲面可知,在过负荷运行低于 4 h 时, HFE-TLC 模型过负荷运行皆能达到盈利。图中由 C (340,2,185.6) 与 D(600,1.87,578) 两点相接的曲线为设备过负荷运行的盈亏平衡临界线,但 C、D 两点的负载率分别达到了 2 和 1.87,远高于限定的负载率,将导致系统故障率偏大以及绕组热点温度偏高,在工程应用中不建议进行。

此外由图 7 可知,随着过负荷运行时间、负载率的继续增加,经济损失总成本 C_{all} 中的寿命损失 C_l 会急速增大,进而总成本 C_{all} 也骤增,使得过负荷运行的利润为负数,因此判定中长期的过负荷运行在经济性层面是无利的。

6 结束语

本研究提出考虑多因素的变压器过负荷性能评价模型 HFE-TLC。研究结果表明,改进的热点温度模型相较于传统热传导模型,在应用实例中评估精度得到有效的提升。考虑了基于概率损失的经济盈亏评价体系,相较于电网公司现行的短期急救负载预案,具有全面性与普适性。考虑多因素的过负荷性能评价模型在短期过停电检修的负荷场景下,能给出运行综合工程建议并制定经济性策略,该决策对实际工况响应灵活。

参考文献 (References):

- [1] 韩立章. 高压输电线路运行状态监测技术方法研究[D]. 北京:华北电力大学电气与电子工程学院,2008.
- [2] 陈伟根,苏小平,孙才新,等. 基于有限体积法的油浸式变压器绕组温度分布计算[J]. 电力自动化设备,2011,31(6):23-27.
- [3] 赵 斌,张霄元. 变压器顶层油温预测及其数学模型的参数辨识[J]. 高电压技术,2004,30(6):9-10.
- [4] IEC 60076-7. Power transformers-part 7: loading guide for oil-immersed power transformers [S]. New York: IEC, 2005.
- [5] 吴秋莉,邓雨荣,张 炜,等. 变电设备动态增容系统的设计与实现[J]. 电力建设,2015,36(5):66-71.
- [6] 滕 黎,陈伟根,孙才新. 油浸式电力变压器动态热路改进模型[J]. 电网技术,2012,36(4):236-241.
- [7] 张 翔. 油浸式变压器故障率建模及可载性研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2013.
- [8] IEEE C57 91-1995. IEEE guide for loading mineral-oil-immersed Transformers[S]. New York: IEEE Power & Energy Society,1995.
- [9] GB/T 7252-2001. 变压器油中溶解气体分析和判断导则[S]. 北京:中国标准出版社,2001.
- [10] GB/T 1094 7-2008. 油浸式电力变压器负载导则[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [11] 张懿议. 基于运行状态和寿命评估的电力变压器全寿命周期检修决策研究[D]. 重庆:重庆大学电气工程学院,2014.
- [12] 孟繁津. 基于健康状态的电力变压器可靠性和经济性寿命评估研究[D]. 重庆:重庆大学电气工程学院,2014.
- [13] 梁帅伟. 抗老化变压器油及其对绝缘纸热老化影响的研究[D]. 重庆:重庆大学电气工程学院,2009.
- [14] 李清泉,王 伟,王小龙. 利用 DGA-NN 诊断油浸式电力变压器故障[J]. 高电压技术,2007,33(8):48-51.
- [15] 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.
- [16] 郭创新,王 越,王 媚,等. 表征内部潜伏性故障的变压器时变停运模型研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(1):63-69.
- [17] 王有元,袁 园,李 剑,等. 变压器油纸绝缘可靠性的威布尔混合评估模型[J]. 高电压技术,2010,36(4):842-848.
- [18] 张 翔,宋子彤,杨致慧,等. 一种基于负载率和设备检测信息的油浸式变压器故障率模型[J]. 电网技术,2013,37(4):1159-1165.
- [19] 李 蕊,李 跃,苏 剑,等. 配电网重要电力用户停电损失及应急策略[J]. 电网技术,2011,35(10):170-176.
- [20] 李 蕊. 配电网可靠性与重要电力用户停电损失研究[D]. 北京:中国电力科学研究院,2010.
- [21] 张 行,何 迪,章 禹,等. 一种计及主变可载性约束的三阶段配电网供电能力实时评估方法[J]. 电网技术,2016,40(8):2430-2436.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

夏伊乔,郭创新,陈玉峰,等. 考虑多因素的变压器过负荷性能评价模型[J]. 机电工程,2017,34(5):509-514.

XIA Yi-qiao, GUO Chuang-xin, CHEN Yu-feng, et al. Evaluation model of transformer overload capacity considering multi-factors[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,34(5):509-514.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>