

表征内部潜伏性故障的变压器时变停运模型研究

郭创新¹, 王越¹, 王媚², 尹玉娟¹, 文云峰¹, 张金江³

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027; 2. 上海市电力公司, 上海市 闸北区 200072;
3. 浙江科技学院自动化与电气工程学院, 浙江省 杭州市 310023)

Time-varying Outage Model for Transformers Representing Internal Latent Fault

GUO Chuangxin¹, WANG Yue¹, WANG Mei², YIN Yujuan¹, WEN Yunfeng¹, ZHANG Jinjiang³

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China;
2. Shanghai Electric Power Company, Zhabei District, Shanghai 200072, China; 3. School of Automation and Electrical Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: Dissolved gases come into being in the insulating oil during the operation of power transformers. By experience, it is known that the health state of transformers can be deduced from the content of the dissolved gasses and the development of the internal latent fault in that state can be estimated by the generating rate of the gasses. Based on this knowledge, the time-varying outage model for risk assessment of transformers was built. The transformer state was firstly identified by the quantity of the dissolved gas. Thus the multi-state Markov model was set up considering the maintenances to get the basic failure rate. Meanwhile, the time-varying exponential outage model was established based on the gas generating rate which reflects the operating characteristics as well as the development of the latent fault. The model is validated by case studies and provides reference foundation for the device risk assessment.

KEY WORDS: power transformer latent fault; time-varying failure rate; time-varying outage model; risk assessment

摘要: 变压器在运行过程中, 绝缘油中会有溶解气体产生。由经验可知, 油中气体的含量可反映变压器健康状态, 而产气速率则反映了该状态下器身内部潜伏性故障的发展程度。据此原理, 建立适用于电力系统风险评估的变压器时变停运模型。模型首先根据气体含量进行变压器状态划分, 并考虑

实时修复的影响建立多状态马尔科夫模型, 得出故障率基值。同时, 基于产气速率建立时变停运指数模型, 既体现变压器实时运行特性, 又准确反映了变压器内部潜伏性故障的发展情况。通过算例分析对模型进行了验证, 该模型为系统风险评估提供了基础。

关键词: 变压器潜伏性故障; 时变故障率; 时变停运模型; 风险评估

0 引言

电力系统风险评估是给出电网在未来一段时间内的不确定性和安全性的量化指标, 其根源在于其行为的概率特征^[1-3]。在短期风险评估过程中, 运行条件、设备自身老化^[4]等都会导致变压器停运概率发生变化, 稳态停运模型无法适应运行风险评估中的元件建模需求^[5-6]。文献[7]提出了可反映设备实时运行状态的时变停运模型的概念。

变压器失效通常是因为绝缘油老化、过负荷、热力、油/纸受潮以及套管损坏等。文献[8]建立统计模型求解变压器时变停运概率, 忽略了内部潜伏性故障发展的物理过程; 文献[9]基于变压器的温升-老化模型求解时变故障率; 文献[10]根据变压器糠醛含量与聚合度(degree of polymerization, DP)值之间的关系, 建立变压器老化失效模型来求解停运率; 文献[11-13]采用目前常用的油气信息进行变压器时变停运分析。其中文献[7]以油中气体含量为特征量, 在忽略了修复影响的前提下建立了最简单运行条件下的暂态马尔科夫模型。文献[13]以油中产气速率为特征量, 通过产气速率的大小估计内部潜伏性故障的发展程度。在变压器运行中, 油中气体

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(SQ2010AA0522555001, SQ2010AA0500165004); 国家自然科学基金项目(51177143); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20090101110058)。

The National High Technology Research and Development of China 863 Program (SQ2010AA0522555001, SQ2010AA0500165004); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51177143); Project Supported by Special Scientific and Research Funds for Doctoral Speciality of Institution of Higher Learning (20090101110058).

含量及产气速率随内部潜伏性故障的发展而同步变化。由文献[14]可知,油中气体含量可反映变压器的健康状态,在每种状态时潜伏性故障的发展程度需进一步通过油中产气速率来确定,因此只采用油中气体的一种信息估计停运率较为片面。此外,变压器内部潜伏性故障的发展过程中通过油过滤等维修工作可改变故障的严重程度,因此忽略修复影响的建模方法不能反映变压器的实际运行模式。

基于上述分析,本文综合油气信息建立表征内部潜伏性故障的变压器时变停运模型。模型结合变压器实际运行方式考虑了修复性的影响,针对油中气体含量与产气速率分别建模,最后通过模型综合得出停运率。算例分析表明,模型可较好地反映变压器内部潜伏性故障的发展程度,可为风险评估提供参考。

1 变压器油气分析原理

1.1 变压器失效原理分析

变压器运行过程中受到器身老化、环境因素、人为误操作、保护误动作等多种因素的影响,时刻存在停运的风险。其中外因具有一定的随机性;内因随时间变化具有一定的累积效应,是导致变压器失效停运的重要因素。目前电网中使用的变压器大多为油浸变压器,变压器油承担着绝缘隔离和冷却中介的作用。大量资料表明:导致设备失效的主要原因是其绝缘性能的劣化,电气设备的多数故障是绝缘性故障,因此变压器寿命可近似为变压器绝缘寿命^[15]。在设备正常运行条件下,老化是渐进的、长期的过程。变压器运行过程中,不管是正常运行还是暂时过负荷情况下变压器都可能承受过热、机械故障、化学反应、放电、电磁等压力,从而导致变压器状态逐渐恶化^[16],表现为:1) 绝缘介质强度的下降(例如承受雷击和开断电流冲击的能力);2) 机械强度的下降;3) 电流回路散热能力的下降(例如承受过负荷能力);4) 过负荷、过励磁等特殊情况下电磁转换能力的下降。

在变压器投运早期,器身对各种暂态运行应力和本身承受能力之间预留较大裕度,随运行时间的增加,裕度逐渐减少,当绝缘的性能指标达到某些极限值时,标志着内部潜伏性故障发展的终结。绝缘性能随运行时间而老化的变化过程如图1所示。变压器潜伏性故障的发展程度可通过对变压器各种检测信息的大小及变化趋势进行综合分析得出,

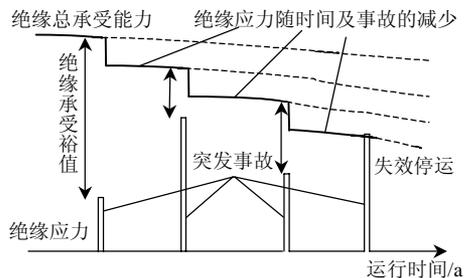


图1 变压器绝缘随时间的变化趋势

Fig. 1 Variation tendency of the transformer insulation with time

由其引起的变压器失效风险概率亦可得出。

1.2 变压器状态分类

油气分析对发现变压器内部潜伏性故障很有效。变压器绝缘油是由许多不同分子量的碳氢化合物分子组成的混合物,变压器运行过程中,一些异常现象如放电、过热等导致的绝缘劣化均会导致绝缘油裂解出气体碳氢化合物。此外,固体绝缘材料在异常条件(过热、受潮等)下亦会分解生成大量的一氧化碳(CO)和二氧化碳(CO₂)以及少量烃类气体^[17]。研究表明,不同的异常原因导致各气体的含量及产气速率不同。因此油中溶解气体的含量及产气速率可以作为判断潜伏性故障发展程度的有效依据。文献[14]根据油中各类气体含量及气体总量对变压器从健康状态到故障失效过程分为4个阶段:良好状态-注意状态-严重状态-故障状态,同时给出了变压器分别在不同发展阶段、不同的产气速率时应采取的措施,如表1所示。产气速率越高表明潜伏性故障发展程度越严重,不同状态时相同

表1 IEEE C57.104 中依据溶解气体分析信息的状态划分
Tab. 1 Condition classification by dissolved gas analysis in IEEE C57.104

状态	可燃性溶解气体总量/($\mu\text{L/L}$)		产气速率/ 采样周期/a		采取措施
	>4	630	(mL/s)	周期/a	
故障状态	>4	630	>30	1	退出运行
			10~30	2	
			<10	7	
严重状态	1921~4630	630	>30	7	密切关注, 仔细分析, 考虑停运
			10~30	7	
			<10	30	
注意状态	721~1920	630	>30	30	密切关注, 仔细分析, 考虑降负荷
			10~30	30	
			<10	120	
良好状态	≤ 720	630	>30	30	密切关注, 仔细分析, 考虑降负荷
			10~30	120	
			<10	365	

的产气速率对应的故障严重程度亦不同；因此应将产气速率与气体含量结合起来估计变压器潜伏性故障的发展程度。

2 时变停运模型的建立

2.1 多状态马尔科夫子模型

电力变压器内部潜伏性故障的发展是一个中长期的渐变过程，其故障失效率也随之逐渐增加，直到内部潜伏性故障爆发导致该元件停运。进行修复或替换失效部件后，重新投入运行，其故障失效率将比停运前有所下降，这种特性被称为潜伏性故障率的维修更新性^[18]。模型首先假设一旦发现变压器内部存在恶化过程，良性维修可使系统恢复到前一个状态或是原始健康状态，从而降低设备停运概率。不良维修可能使变压器状态进一步恶化，停运概率增加，基于此建立带修复的变压器多状态马尔科夫模型。变压器维修策略依据绝缘油检测状态进行实施：如果处于状态 1，属于健康状态，无需修复；如果处于状态 2 或 3，可能进行的修复为油过滤或油替换，修复后的变压器可能处于状态 1、2 或 3；状态之间的转换取决于当前状态以及修复过程。变压器等效失效模型如图 2 所示。

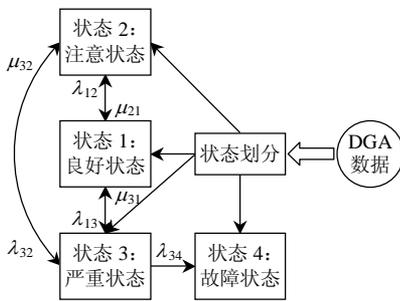


图 2 带维修过程的多状态马尔科夫模型

Fig. 2 Multi-state Markov model with maintenance

图中：DGA 表示溶解气体分析； $\lambda_{i,j}$ 为状态 i 到 j 的状态转移速率^[1]，其中 $\lambda_{i,i+1} = 1/y_i$ ， $i = 1, 2, 3$ ， y_i 为状态 i 的持续时间(单位为 a)；模型中的 λ_{13} 为考虑了修复操作不当导致变压器恶化的情形；修复率 $\mu_{i,j}$ 为状态 $i \rightarrow j$ 的修复时间的倒数。该马尔科夫模型的状态转移速率矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} -\lambda_{12} - \lambda_{13} & \mu_{21} & \mu_{31} & 0 \\ \lambda_{12} & -\lambda_{23} - \mu_{21} & \mu_{32} & 0 \\ \lambda_{13} & \lambda_{23} & -\lambda_{34} - \mu_{31} - \mu_{32} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{34} & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

假设模型中各状态的稳态概率为 $P = [P_1, P_2, P_3,$

$P_4]$ ，且满足在任何时刻系统各状态的概率之和都恒等于 1，即有

$$\sum_i P_i = 1, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

同时状态转移速率与稳态概率矩阵满足

$$PA = 0 \quad (3)$$

由于变压器处于状态 4 时必须停运或保护已经跳闸，可认为此状态为变压器内部潜伏性故障发展过程的终结，即处于状态 4 的稳态概率 $P_4 = 0$ 。求解由式(2)、(3)组成的方程组即可得出模型在各个状态时的稳态概率：

$$P_1 = \frac{\mu_{21}\mu_{32} + \lambda_{23}\mu_{31} + \mu_{21}\mu_{31}}{\Delta} \quad (4)$$

$$P_2 = \frac{\lambda_{12}\mu_{32} + \lambda_{13}\mu_{32} + \lambda_{12}\mu_{31}}{\Delta} \quad (5)$$

$$P_3 = \frac{\lambda_{12}\lambda_{23} + \lambda_{13}\lambda_{23} + \lambda_{13}\mu_{21}}{\Delta} \quad (6)$$

$$\Delta = \mu_{21}\mu_{32} + \lambda_{23}\mu_{31} + \mu_{21}\mu_{31} + \lambda_{12}\mu_{32} + \lambda_{12}\lambda_{23} + \lambda_{13}\mu_{32} + \lambda_{13}\lambda_{23} + \lambda_{13}\mu_{21} + \lambda_{12}\mu_{31} \quad (7)$$

设 T_w 为变压器从初始时刻发展到状态 4 所需时间(随机变量)，其故障失效概率为

$$\lambda_s = P(T_w < t) = LP \quad (8)$$

由模型图可知， $L = [0 \ 0 \ \lambda_{34} \ 0]$ ，所以有

$$\lambda_s = \lambda_{34}P_3 = \lambda_{34} \frac{\lambda_{12}\lambda_{23} + \lambda_{13}\lambda_{23} + \lambda_{13}\mu_{21}}{\Delta} \quad (9)$$

2.2 时变停运子模型

前文中变压器在一定油气含量时的故障停运概率值要通过求解多状态马尔科夫子模型而得出。下面根据油中产气速率的不同建立时变停运子模型，对上述停运概率进行时变修正。

变压器油中不断增长的产气速率暗示变压器内劣化的严重性不断增加。处于不同产气速率的变压器的失效停运概率亦大不相同。变压器专家建议当变压器产气速率高于一定值时，需要采取更加迅速、更加彻底的修复措施。因此需进一步建立在同一健康状态条件下不同产气速率时的变压器时变失效模型。模型假设当产气速率趋于无限大时，设备必失效^[13]，即有

$$v \rightarrow \infty \Rightarrow \lambda_v \rightarrow 100\% \quad (10)$$

式中： v 为油中产气速率； λ_v 为变压器故障率。在已知油中溶解气体总量检测记录的情况下，一段时

间内产气速率通过下式求得:

$$v = \frac{G(t_2) - G(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (11)$$

式中: $G(t_i)$ 为 t_i 时检测的油中气体总量值; t_1 、 t_2 分别为 2 次气体检测的时间。由于运行中的变压器内一定程度上的气体累积属于正常现象, 因此产气速率小于一个阈值时被认为没有增加失效率。不同状态时的阈值大小根据具体情况而定。一般认为变压器失效率随时间的变化服从以下指数关系^[19]:

$$\lambda_v(t) = C + \alpha e^{\theta t}, \quad \theta \geq 0 \quad (12)$$

式中: C 为外部发生随机故障的概率, 假设 $C = 0.005$; α 为一个非常小的常量; θ 为随时间推移失效率的加速因子。求解式(12)的对数形式, 可以得到时间 t 与 $\log(\lambda_v(t) - C)$ 之间的线性关系。当有历史统计数据时, 通过拟合可证实式(12)的正确性。

$$\log(\lambda_v(t) - C) = \log \alpha + \theta t \quad (13)$$

由于前文中假设当产气速率超过一定值时才

会对变压器停运率产生影响, 因此假设加速因子 θ 与产气速率 v 之间服从如下线性关系^[8]:

$$\theta(v) = m + kv \quad (14)$$

$$\lambda_v(t) = C + \alpha e^{(m+kv)t} \quad (15)$$

式中 m 、 k 均为常数, 其取值根据变压器所处状态来选取。至此, 通过模型求解, 即可得出在一定产气速率时变压器停运概率的时变性。

2.3 综合时变停运模型

由表 1 可知, 变压器主要基于油中气体含量进行健康状态分类, 之后在每种状态时, 根据油中产气速率的不同估计内部潜伏性故障的发展程度, 采取相应措施。因此, 在采用油中溶解气体信息分析变压器由于潜伏性故障发展引起的失效概率时, 将多状态马尔科夫模型的结果作为基值, 并将指数时变停运模型值进行叠加, 见下式。具体求解过程如图 3 所示。

$$\lambda_T = \lambda_s + \lambda_v \quad (16)$$

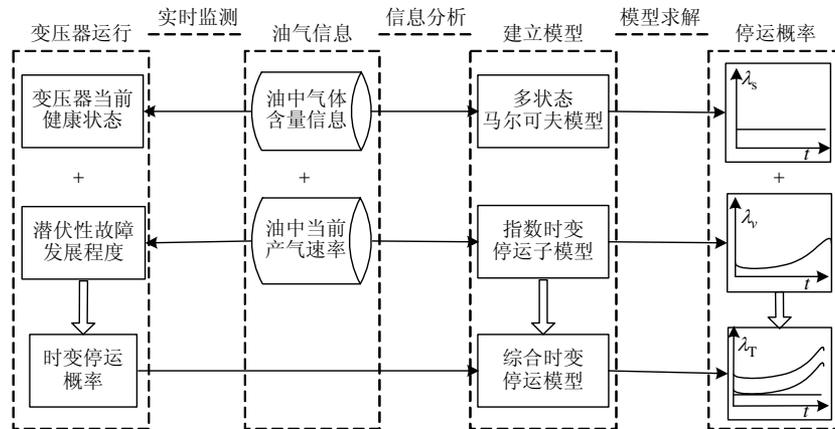


图 3 表征内部潜伏性故障的时变停运模型

Fig. 3 Time-varying outage model representing internal latent fault

3 模型算例分析

3.1 稳态子模型概率

参考文献[20], 本文采用表 2 所示的变压器统计数据进行分析。首先分析气体含量, 将数据代入马尔科夫子模型, 可得各状态转移速率的数值: $\lambda_{12} = 0.0083$, $\lambda_{22} = 0.0085$, $\lambda_{34} = 0.0193$, $\lambda_{13} = 0$ 。采用不完全维修策略时, 根据文献[17], 相应的修复率为 $\mu_{21} = 0.2863$, $\mu_{32} = 0.5120$, $\mu_{31} = 0.0820$ 。求解模型, 代入式(9)可得故障率为 $\lambda_s = 7.7470 \times 10^{-6}$ 。

3.2 时变子模型概率分析

将表 2 中的统计数据代入式(11)可得各检测时刻的产气速率, 如表 3 所示。

表 2 变压器油中的溶解气体数据

Tab. 2 DGA information of power transformer

检测时间	气体含量/($\mu\text{L/L}$)						可燃性溶解 气体总量
	H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	CO	
1995-09-15	3	9	0	19	4	539	574
1996-09-18	0	13	0	20	9	467	509
1997-05-09	0	9	0	30	3	578	620
1998-08-27	26	22	0	54	10	942	1054
1999-04-12	21	28	0	60	6	731	846
2002-09-10	305	691	0	648	192	657	2493
2002-10-15	569	1703	7	1364	451	552	4646
2002-10-22	573	1965	6	1673	520	643	5344
2002-10-28	557	2002	7	1616	535	599	5316
2002-11-10	1	22	0	7	6	5	41

表 3 检测数据产气速率变化趋势

Tab. 3 Gas generating rate of the inspection data

检测时间	产气速率/(mL/天)	检测时间	产气速率/(mL/天)
1995-09-15	-0.178	2002-09-10	70.784
1996-09-18	0.456	2002-10-15	99.600
1997-05-09	0.951	2002-10-22	-3.995
1998-08-27	-0.855	2002-10-28	-173.425
1999-04-12	1.321	2002-11-10	—

由于当产气速率相同时，变压器分别处于不同的运行状态，产气速率对停运概率的加速程度差别很大，因此 m 和 k 的取值在变压器处于不同状态时应不相同。在表 2 的监测数据中，前 3 次记录显示变压器处于良好运行状态，由表 1 可知，在此状态条件下当产气速率 $v \leq 0.25$ mL/a 时，变压器为正常运行，因此式(14)中常量 m 和 k 的关系满足下式；若变压器处于其他运行状态， $m=0$ 。

$$k = -3m \quad (17)$$

3.3 综合时变停运概率

结合表 2 中气体含量及表 3 中产气速率综合分析变压器运行期间内，由内部潜伏性故障导致的失效停运率：

1) 1995-09-15—1996-09-18 期间内，变压器处于良好运行状态且气体含量有所降低，因此可认为这短时间内变压器内部潜伏性故障导致的停运概率无变化，其失效停运率为 $\lambda_{T1} = \lambda_s = 7.747 \times 10^{-6}$ 。

2) 1996-09-18—1998-08-27 期间内，变压器处于良好运行状态，产气速率为 $v = 0.456$ mL/天、 $v = 0.951$ mL/天，均高于运行的注意值，此期间内，停运概率随时间稍有变化， $\lambda_{T2} = \lambda_s + \lambda_v = 7.747 \times 10^{-6} + C + e^{(m-3m)t}$ 。

3) 1998-08-27—1999-04-12 期间内，变压器处于注意运行状态，因此认为此期间内失效率未发生突变， $\lambda_{T3} = \lambda_{T2}$ 。

4) 1999-04-12—2002-09-10 期间内，变压器处于注意运行状态，产气速率为 $v = 1.321$ mL/天，此期间失效率随时间的变化趋势发生变化， $\lambda_{T4} = \lambda_s + \lambda_v = 7.747 \times 10^{-6} + C + e^{kvt}$ 。

5) 2002-09-10—2002-10-15 期间内，变压器处于严重运行阶段，此期间内产气速率较高，达到 70.784 mL/天，此时变压器运行风险较高，其停运失效率为 $\lambda_{T5} = \lambda_s + \lambda_v = 7.747 \times 10^{-6} + C + e^{kvt}$ 。

6) 2002-10-15—2002-10-22 期间内，变压器已处于故障运行状态，随时可能失效停运，应立即

采取停运修复措施。通过停运检修，设备在 2002-11-10 日的检测数据恢复正常。

变压器失效停运率随时间变化的曲线如图 4 所示。图 4(a)为变压器处于严重状态之前的失效停运率随时间的变化趋势，不同的线型表示不同的产气速率；图 4(b)为包含严重运行状态下产气速率较高时的整体变化趋势。从图中可看出：在产气速率较高时，潜伏性故障的发展迅速，变压器运行风险越来越高，随时可能停运，需要立刻采取措施。

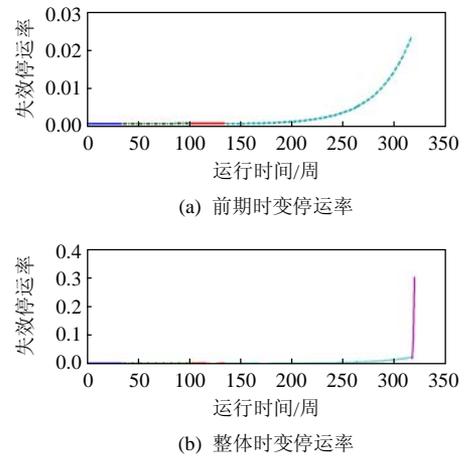


图 4 内部潜伏性故障率的时域曲线

Fig. 4 Curve of internal latent failure rate in time field

3.4 模型分析比较

为了更好地说明模型的实际适用性，在此将文献[7]中以油中气体含量为特征量的暂态马尔科夫模型与本文模型进行比较分析。文献[11]中变压器处于故障状态时失效率为 1；处于严重状态时为一常数；处于健康状态时的时变曲线为图 5(a)；处于注意状态时的时变曲线为图 5(b)。

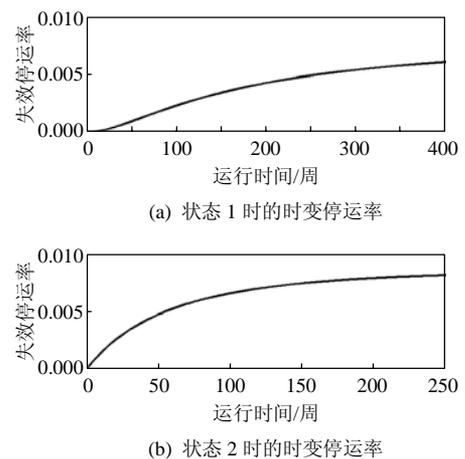


图 5 暂态马尔科夫模型失效停运率时变图

Fig. 5 Time-varying failure rate from transient Markov model

1) 暂态马尔科夫模型中, 变压器在 4 种健康状态下运行分别对应 4 种失效停运率函数。图 5(b) 变压器在注意状态初始时的失效率为 0, 而实际运行的变压器由于潜伏性故障的发展导致气体积累较多才会处于注意状态, 此时失效率应不为 0。

2) 表 2 中, 1999-04-12 的监测数据比 1998-08-27 的监测数据有所下降。可认为由于在线修复减缓了故障的发展, 在图 4 中表现为这段时间内故障率维持不变, 而图 5(b) 由于忽视了修复的影响在这短时间内故障率变化迅速, 与实际出入较大。

3) 2002-09-10 的监测数据显示变压器处于严重运行状态, 此时暂态马尔科夫模型的失效停运率为常数 $\lambda_{34}=0.0193$, 综合模型的分析结果为随时间时变的函数。实际中, 在下一个检测数据显示此时失效率应是随时间增长的。

4) 在表 2 中, 2002-10-15 的检测数据显示设备已经进入故障运行状态, 文献[11]中的停运率显示为 1, 需立即停运; 综合模型分析结果显示失效停运率低于 0.4, 但是增长较快, 还可进行短时间运行, 可通过重新调整检修计划进行停运检修。

4 结论

变压器发生内部潜伏性故障时, 物理化学反应导致变压器油中溶解气体含量和产气速率发生相应变化, 因此选择油中气体信息作为特征量对内部潜伏性故障的发展程度进行分析建模。气体含量和产气速率的综合运用更加真实地反映了变压器内部潜伏性故障的发展程度, 同时模型对于变压器修复过程的考虑, 更好地反映了变压器的运行特性。模型用于风险评估可提高评估结果的准确性。

基于油中产气速率的变压器时变停运模型中的相关模型参数由多次试验确定, 在实际评估运用中应结合实际统计数据修正。此外, 变压器其他检测信息与内部潜伏性故障的发展关系还有待于进一步研究。

参考文献

- [1] 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, 2005: 11-36.
Li Wenyuan. Risk assessment of power systems: models, methods and applications[M]. Beijing: Science Press, 2005: 11-36(in Chinese).
- [2] He J, Sun Y Z, Wang P, et al. A hybrid conditions-dependent outage model of a transformer in reliability evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 2025-2033.
- [3] Hong Y L, Meeker W Q, McCalley J D. Prediction of remaining life of power transformers based on left truncated and right censored lifetime data[J]. The Annals of Applied Statistics, 2009, 3(2): 857-879.
- [4] Wang M, Vandermaar J, Srivastava K D. Review of condition assessment of power transformers in service[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(6): 12-25.
- [5] 刘海涛, 程林, 孙元章, 等. 采用瞬时概率的运行可靠性短期评估[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 20-25.
Liu Haitao, Cheng Lin, Sun Yuanzhang, et al. Short-term operational reliability evaluation by using time dependent state probability[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 20-25(in Chinese).
- [6] Sun Y, Wang P, Cheng L, et al. Operational reliability assessment of power systems considering condition-dependent failure rate[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4(1): 60-72.
- [7] 宁辽逸, 吴文传, 张伯明. 一种适用于运行风险评估的元件修复时间概率分布[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(16): 15-20.
Ning Liaoyi, Wu Wenchuan, Zhang Boming. A novel probability distribution of component repair time for operation risk assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 15-20(in Chinese).
- [8] Moon J F, Kim J C, Lee H Y, et al. Time-varying failure rate extraction in electric power distribution equipment [C]//2006 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. Stockholm, Sweden: KTH, 2006: 1-6.
- [9] He J, Cheng L, Sun Y Z. Transformer real-time reliability model based on operating conditions[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2001, 8(3): 378-383.
- [10] Ramu T S, Pradhan M K. On the estimation of elapsed life of oil immersed power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 1962-1969.
- [11] 宁辽逸, 吴文传, 张伯明. 运行风险评估中的变压器时变停运模型(一): 基于运行工况的变压器内部潜伏性故障的故障率估计方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15): 9-13, 95.
Ning Liaoyi, Wu Wenchuan, Zhang Boming. Time-varying transformer outage model for operational risk assessment, part one: condition based failure rate estimation method for transformer internal latent fault estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15): 9-13, 95(in Chinese).
- [12] 宁辽逸, 吴文传, 张伯明. 运行风险评估中的变压器时变停运模型(二): 基于延迟半马尔可夫过程的变压器时变停运模型[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(16): 24-28.

- Ning Liaoyi, Wu Wenchuan, Zhang Boming. Time-varying transformer outage model for operational risk assessment, part two: time-varying transformer outage model based on delayed semi-Markov process[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(16): 24-28(in Chinese).
- [13] Karlsson S. A review of lifetime assessment of transformers and the use of dissolved gas analysis[D]. Sweden, Stockholm: The Royal Institute of Technology, 2006.
- [14] IEEE Power & Energy Society. IEEE Std C57.104—2008. IEEE Guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers[S]. USA: IEEE Power & Energy Society, 2009.
- [15] Schijndel A V. Power transformer reliability modelling [D]. Netherlands, Eindhoven: Eindhoven University, 2010.
- [16] Ding H Z, Heywood R, Lapworth J, et al. Why transformer fail[C]//Euro TechCon. Warrington, United Kingdom: TJH2b Analytical Services' inaugural TechCon, 2009: 1-18.
- [17] Franzen A, Bertling L. State of the art-life time modeling and management of transformers[R]. Sweden, Stockholm: Royal Institute of Technology, KTH School of Electrical Engineering RCAM, 2007.
- [18] Jirutitjaroen P, Singh C. The effect of transformer maintenance parameters on reliability and cost: A probabilistic model[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 72(3): 213-224.
- [19] William H B, Bartley P E. Keeping the lights on: an action plan for America's aging utility transformers[EB/OL]. 2007[2012-03-26]. <http://www.hsb.com/thelocomotive/Story/FuST-FSTRANAGE.html>.
- [20] Pahak J, Jiang Y, Honavar V, et al. Condition data aggregation with application to failure rate calculation of power transformers[C]//Proceedings of the 39th Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Kauai, USA: IEEE Computer Society, 2006: 1-10.



郭创新

收稿日期: 2012-04-18。

作者简介:

郭创新(1969), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能电网和分布式能源并网、智能信息处理技术及其在电力系统中应用, guochuangxin@zju.edu.cn;

王越(1982), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统设备可靠性与系统运行风险评估, wangyue00@zju.edu.cn;

王媚(1970), 女, 高级工程师, 主要从事电力科技信息管理工作, meiwang70@hotmail.com;

尹玉娟(1986), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为变压器故障诊断和风险评估, yinyujuan@zju.edu.cn;

文云峰(1986), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统风险评估与决策支持, 11010051@zju.edu.cn;

张金江(1971), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为输变电设备状态监测与评估、电力信息集成技术及其在智能电网中的应用, JinjiangZhang@163.com。

(责任编辑 谷子)