

# 表征运行状态及运行工况的变压器时变停运模型研究

变压器油中溶解气体含量可以很好地反映变压器运行状态，而热点温度可以综合体现变压器运行工况。以此为基础，建立适用于电力系统风险评估的变压器时变停运模型。模型依据DGA信息含量划分变压器运行状态，通过隐士半马尔科夫过程分析预测变压器运行状态。考虑运行工况对变压器运行状态的影响，选取热点温度作为综合反映变压器运行工况的因素，引入加速老化因子对模型修正。实例分析表明，变压器的自身运行状态和运行工况对变压器故障率有较大影响。所建立的时变停运模型更符合变压器的运行实际。

张广东 温定筠/国网甘肃省电力公司电力科学研究院  
王 峰 张忠元 毛光辉/国网甘肃省电力公司

## 0 引言

油浸式电力变压器作为电力系统的核心设备，精确估算其故障率对电力系统风险评估具有十分重要的意义。但目前，传统可靠性分析模型中元件的故障率多采用长期历史统计求均值得到，无法体现环境、自身状态和运行工况等信息对故障率的影响。

油浸式电力变压器内绝缘材料的电、热老化劣化过程均会产生相应的特征气体，这些故障气体的组成和含量可以很好地反映变压器的缺陷类型和故障严重程度。文献[1]基于油中溶解气体和产气速率刻画变压器内部潜伏性故障发展过程，并求得故障率的基值；文献[2]以油中溶解气体为特征量，在忽略工况信息的前提下建立了暂态马尔科夫模型；文献[3]基于变压器能量加权DGA为特征量建立模型求解时变故障率。这些模型以油气信息反映变压器潜伏性故障，有较好的效果，但是变压器运行状

态不同，其潜伏性故障发展过程也不同，分析变压器的失效率应对应具体的运行状态。

此外，变压器热点温度是内部损耗与外部气候环境、变压器负载水平综合作用的结果<sup>[4]</sup>，热点温度能够综合反映变压器的运行工况。因此，本文综合油气信息和热点温度建立表征运行状态和运行工况的变压器时变停运模型。模型结合马尔科夫过程对变压器进行运行状态分析及预测，对应具体运行状态建立相应的时变停运模型，最后选取热点温升表征变压器运行工况，对故障率进行修正。算例分析表明，模型可以较好地表征变压器不同状态时故障率的发展过程，以及反映运行工况对故障率的影响，可为风险评估提供参考。

## 1 变压器运行状态与油中溶解气体关系

变压器DGA发展趋势与其运行状态变化有密切联系，基于变压器DGA数据能够构建观测变压器运行的状态空间，可以对变压器运行状态进行有效分析和表征。文献[5]采用各类特征气体的含量以及总气体含量，将变压器的运行状态划分为良好、警告、危险和故障四种状态，如表1所示。本文选取 $H_2$ 、 $CH_4$ 、 $C_2H_2$ 、 $C_2H_4$ 和 $C_2H_6$ 五种特征气体的油中含量数据作为变压器状态转移过程分析的样本，判定变压器运行状态时采用取上限原则，即只要某一种气体达到“警告”、“危险”和“故障”标准，则认



张广东/高级工程师

### 关键词/Keywords

运行状态·  
运行工况·  
热点温度·  
时变停运模型·

为变压器进入相应状态。

表1 IEEE标准中依据DGA体积分数的状态划分

| 气体体积分数/ $10^{-6}$             |               |               |               |               |
|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 气体                            | 良好状态<br>(状态1) | 警告状态<br>(状态2) | 危险状态<br>(状态3) | 故障状态<br>(状态4) |
| H <sub>2</sub>                | <100          | 101~700       | 701~1 800     | >1 800        |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | <120          | 121~400       | 401~1 000     | >1 000        |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | <35           | 36~50         | 51~80         | >80           |
| CH <sub>4</sub>               | <50           | 51~100        | 101~200       | >200          |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | <65           | 66~100        | 101~150       | >150          |
| CO                            | <350          | 351~570       | 571~1 400     | >1 400        |
| TDCG                          | <720          | 721~1 920     | 1 921~4 630   | >4 630        |

2 隐士马尔科夫状态分析模型

变压器的状态通常无法直接观察，需要通过测量一系列相关数据来推测，且变压器运行过程中，DGA的每个观测值变化不符合马尔科夫过程，而其对应的“宏状态”才满足马尔科夫过程，因此变压器DGA状态变化过程可以通过隐式半马尔科夫模型（Hidden Semi-Markov Model，HSMM）进行描述。

实际情况中，变压器在运行期间性能会逐渐退化，可令 $P_{ij}=0(1\leq j<i\leq n)$ ；设备完全失效时，若不进行维修会始终停留在此状态上，即 $P_{nn}=1$ 。设由单步状态转换概率 $P_{ij}$ 组成的概率转换矩阵为 $\Phi$ ，则可以简化为

$$\Phi = \begin{pmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & \cdots & P_{1,n-1} & P_{1,n} \\ 0 & P_{2,2} & \cdots & P_{2,n-1} & P_{2,n} \\ \vdots & & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & P_{n-1,n-1} & P_{n-1,n} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中， $P_{ij}$ 表示设备在状态*i*时，转换到状态*j*的概率， $\sum_{j=1}^n P_{i,j}=1$ 。

变压器运行过程中，其运行状态的劣化速度不断加快，变压器停留在当前状态上的概率会随着运行时间增加而逐渐降低，其退化遵从指数形式，即有

$$P_{ij}(t+\Delta t)=P_{ij}(t) \quad (2)$$

逆推至起始时刻点的概率 $P_{ij}=P_{ij}(t=0)$ ，则时

刻*t*的状态转换概率 $P_{ij}(t=k\Delta t)$ 为

$$P_{ij}(t=k\Delta t)=\{P_{ij}[t=(k-1)\Delta t]\}=\cdots=(P_{ij}^0)^k \quad (3)$$

进一步可求得 $P_{ii}$ ，即

$$P_{ii}(t=k\Delta t)=1-\sum_{j=i+1}^n P_{ij}(t=k\Delta t)=1-\sum_{j=i+1}^n (P_{ij}^0)^k \quad (4)$$

因此，运行时间 $t=k\Delta t$ 后，变压器状态转换矩阵 $\Phi_t$ 为

$$\Phi_t = \begin{pmatrix} 1-\sum_{j=2}^n (P_{1j}^0)^k & (P_{12}^0)^k & \cdots & \cdots & (P_{1n}^0)^k \\ 0 & 1-\sum_{j=3}^n (P_{2j}^0)^k & (P_{22}^0)^k & \cdots & (P_{2n}^0)^k \\ \vdots & 0 & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & 1-(P_{(i-1)n}^0)^k & (P_{(i-1)n}^0)^k \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

3 时变停运模型

若变压器由初始状态（ $t=0$ ）开始，运行时间*T*后发展到状态4（故障停运），其概率分布为

$$F(t)=P(T<t)=P_4(t)=1-ae^{-\lambda_{12}t}-be^{-\lambda_{23}t}-ce^{-\lambda_{34}t} \quad (6)$$

*a*、*b*和*c*分别为常数，即

$$\begin{cases} a=\frac{\lambda_{23}\lambda_{34}}{\lambda_{12}^2-(\lambda_{23}+\lambda_{34})\lambda_{12}+\lambda_{23}\lambda_{34}} \\ b=\frac{\lambda_{23}\lambda_{34}}{\lambda_{23}^2-(\lambda_{12}+\lambda_{34})\lambda_{23}+\lambda_{12}\lambda_{34}} \\ c=\frac{\lambda_{12}\lambda_{23}}{\lambda_{34}^2-(\lambda_{12}+\lambda_{23})\lambda_{34}+\lambda_{12}\lambda_{23}} \end{cases} \quad (7)$$

根据元件故障率与元件寿命的概率函数之间数值的一致性关系，可求解得到变压器故障率的时域公式，即

$$P_f(t)=\frac{F'(t)}{1-F(t)} \\ =\frac{a\lambda_{12}e^{-\lambda_{12}t}+b\lambda_{23}e^{-\lambda_{23}t}+c\lambda_{34}e^{-\lambda_{34}t}}{ae^{-\lambda_{12}t}+be^{-\lambda_{23}t}+ce^{-\lambda_{34}t}} \quad (8)$$

当变压器过负荷运行时导体发热加剧，绕组和绝缘油的温度剧增，将危及变压器的正常运行。热点温度作为表征油浸式电力变压器运行工况的特征参量，能综合反映变压器的运行工况，IEEE C57.91—1995中以110℃为热点运行温度的

参考值，定义了在给定的负载系数和环境温度下的加速老化因子 $F_{AA}$ ，即

$$F_{AA} = \exp\left(\frac{1500}{383} - \frac{1500}{\theta_h + 273}\right) \quad (9)$$

当热点温度大于110 ℃时， $F_{AA} > 1$ 。给定时间和温度周期内的等效加速老化因子 $F_{EQA}$ 为

$$F_{EQA} = \frac{\sum_{n=1}^N F_{AA_n} \Delta t_n}{\sum_{n=1}^N \Delta t_n} \quad (10)$$

式中， $\Delta t_n$ 为第 $n$ 个监测周期的时间间隔，以小时计算； $F_{AA_n}$ 为在 $\Delta t_n$ 内的加速老化因子。

最后，由式（9）、式（10）进行反推，可以计算监测时间 $t$ 内的平均热点温度 $\bar{\theta}_h$ ，即

$$\bar{\theta}_h = \frac{1500}{\frac{1500}{383} - \ln(F_{EQA})} - 273 \quad (11)$$

在变压器的HSM模型中，每个时序长度为1.5个月，可近似认为变压器在该时段内运行工况保持稳定，受相应运行工况影响，变压器状态劣化过程加速，引入故障率修正因子 $r = F_{AA}$ ，其变压器故障率的时域公式可修正为

$$P'_f(t) = \frac{a\lambda_{12}e^{-\lambda_{12}t} + b\lambda_{23}e^{-\lambda_{23}t} + c\lambda_{34}e^{-\lambda_{34}t}}{ae^{-\lambda_{12}t} + be^{-\lambda_{23}t} + ce^{-\lambda_{34}t}} \quad (12)$$

变压器油中不断增长的气体含量暗示变压器内劣化的严重性不断增加。处于不同运行状态的

变压器的失效停运概率亦不相同，因此需进一步对在不同运行状态条件下变压器的时变失效模型分别进行求解。

1) 变压器处于状态1（良好）时，由式（12）对变压器故障直接求解。

2) 当变压器处于状态2（告警）时，变压器故障率为

$$P'_f(t) = \frac{r\lambda_{23}\lambda_{34}(e^{-\lambda_{23}t} - e^{-\lambda_{34}t})}{\lambda_{34}e^{-\lambda_{12}t} + \lambda_{23}e^{-\lambda_{34}t}} \quad (13)$$

3) 当变压器处于状态3（危险）时，由式（12）推导，变压器故障率为

$$P'_f(t) = r\lambda_{34} \quad (14)$$

综上所述，该时变故障率模型如图1所示。由构建的HSM模型对变压器当前时间及未来时间段的DGA信息判定变压器的运行状态并求解该状态下故障率的解析表达式，最后依据运行工况信息修正故障率。

4 实例分析

某220 kV变电站类型为终端变电站，站内有双变压器运行，其中1#主变压器于2002年3月投运，经过分析预防性试验数据，存在绕组直流电阻异常增大，顶层油温及绕组温升较为明显，推断变压器可能在分接开关处存在放电缺陷及相应的发热现象，变压器处于部分停运风险模式下。

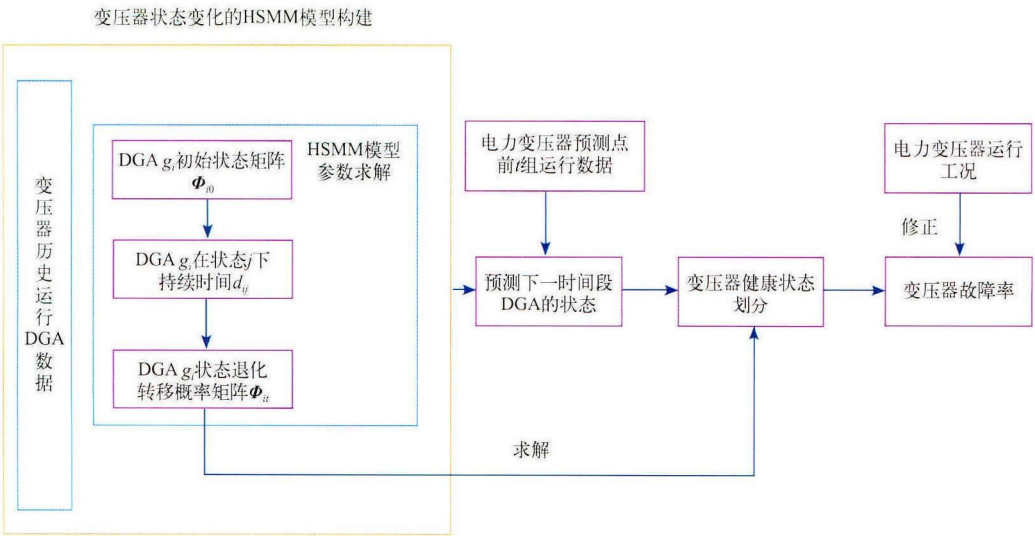


图1 基于状态分析和运行工况的故障率模型

4.1 时变停运模型

(1) 变压器运行状态分析

2011年5月8日~10月10日共采集了五组油色谱数据,如表2所示(测量时间间隔 $\Delta t$ 为1.5个月左右,每一个时间间隔为一个时序)。

表2 油色谱在线监测数据

(单位:  $\mu\text{L/L}$ )

| DGA            | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | 时序 |
|----------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----|
| 测量<br>色谱<br>数据 | 15.02          | 16.26           | 0.00                          | 23.37                         | 28.23                         | 23 |
|                | 15.23          | 22.91           | 0.00                          | 29.02                         | 34.16                         | 24 |
|                | 21.16          | 27.54           | 0.12                          | 32.31                         | 39.77                         | 25 |
|                | 26.47          | 32.62           | 0.33                          | 41.05                         | 50.31                         | 26 |
|                | 32.84          | 43.37           | 0.35                          | 52.14                         | 60.29                         | 27 |

依据变压器的历史DGA数据求解变压器状态转移矩阵时,考虑到距现在时间较久远的变压器运行状态对现在影响较小,本文中HSMM的模型取最大步长为3。依据220 kV变压器历史运行数据,分别求得变压器油中C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>步长为1、2和3的马尔科夫链的一步状态转移概率公式如式(15)~式(17)所示。

$$\Phi^{(1)} = \begin{pmatrix} 0.9874 & 0.0126 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9506 & 0.0494 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9173 & 0.0827 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\Phi^{(2)} = \begin{pmatrix} 0.9516 & 0.0484 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9216 & 0.0742 & 0.0042 \\ 0 & 0 & 0.8806 & 0.1194 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$\Phi^{(3)} = \begin{pmatrix} 0.9017 & 0.0957 & 0.0026 & 0 \\ 0 & 0.8387 & 0.1528 & 0.0085 \\ 0 & 0 & 0.7592 & 0.2408 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

根据前述变压器DGA分析流程,利用HSMM模型分别对各DGA的状态变化进行分析,具体状态转移过程如表3所示。

表3中,{1, 2, 3, 1, 4, 1→4}理解为:在未来时序28内,H<sub>2</sub>处于状态1,CH<sub>4</sub>处于状态2,C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>处于状态3,C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>处于状态1,C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>处于状态4,CO处于状态4,由取上限原则,综合判定变压

表3 变压器状态转移过程

| DGA   | H <sub>2</sub>       | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | 时序 |
|-------|----------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----|
| DGA状态 | 1                    | 1               | 2                             | 1                             | 2                             | 25 |
|       | 1                    | 1               | 2                             | 1                             | 3                             | 26 |
|       | 1                    | 2               | 3                             | 1                             | 3                             | 27 |
| 预测状态  | 1                    | 2               | 3                             | 1                             | 4                             | 28 |
| 状态分析  | 1, 2, 3, 1, 4→4 (故障) |                 |                               |                               |                               |    |

器将由危险状态3转为故障状态4,该状态分析与预防试验数据分析结果一致。

(2) 故障率求解及修正

由文献[3]的方法得到各状态转移速率的数值 $\lambda_{12}=0.0074$ , $\lambda_{23}=0.0080$ , $\lambda_{34}=0.0206$ ,单位为次/星期。变压器当前状态处于状态3,下个时序变压器将转为状态4,因此故障计算得到 $P_f=0.0206$ 。

该变压器2011年全年的负载率数据量较大,为简化取该变压器夏季和冬季的两个典型月的日平均负荷率数据分析其热点温度,依据式(9)~式(11)进行计算可以得到该变压器的平均加速因子为0.4099,根据式(11)可得该变压器的平均热点温度为38.963℃。

变压器当前状态处于状态3,基于变压器温升水平计算得到变压器故障率修正因子 $r=0.4099$ ,考虑变压器的运行工况,则由式(14)修正 $P_f=0.0084$ 。

一般来说,变压器内部潜伏性故障的发展周期较长,DGA的增加需要较长时间的积累,而在线DGA信息采集装置的周期相对于变压器运行时间而言非常短,因此可以假设相邻临界状态间的转换是短时内完成。该变压器的时变概率分布如图2所示,变压器在不同运行状态时期故障率的时

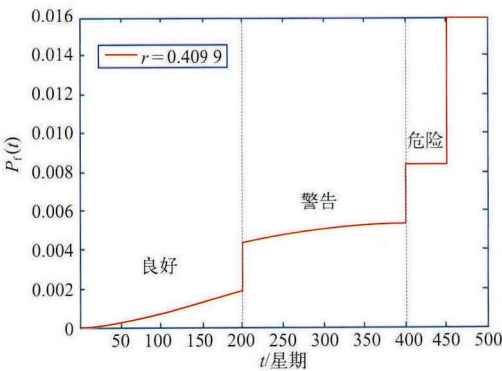
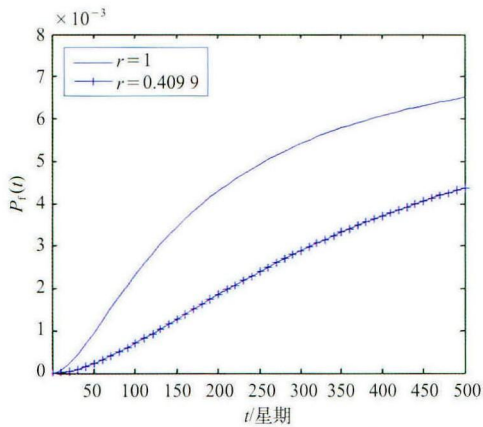


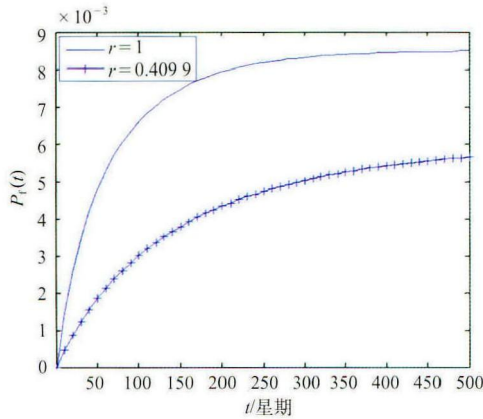
图2 变压器三种运行状态时故障率曲线

域曲线不同，虽然其在正常和警告状态下故障率曲线都是按照指数规律发展，但是故障率的曲率和增长快慢都不同，这与变压器内部故障的发展过程相类似。

为进一步分析热点温升对变压器故障率的影响，分别得到各状态下故障率分布曲线：若变压器处于状态1，考虑热点温度的影响，其概率分布曲线如图3a所示。从图3a中可以看出，随着加速老化因子的变大，变压器内部故障的发展速率加快，变压器故障概率变大。若变压器处于异常状态2，其故障率分布如图3b所示，热点温度对变压器故障率的影响与状态1相似。当变压器处于状态3（危险）时，由式（14）可知，故障率的波动直接取决于加速老化因子，可以达到没有计及温升水平故障率的几十倍。



(a) 良好状态下不同热点温度的故障率曲线



(b) 告警状态下不同热点温度的故障率曲线

图3 不同热点温度下变压器时变故障率曲线

对三种运行状态下变压器故障率分析可知，随着热点温度的升高，三种运行状态下变压器内部故障发展将会加快，故障率也将变大；当变压

器处于不同运行状态时，热点温度的影响程度也不同，变压器运行状态越差，热点温升会越高，内部潜伏性故障发展越快，变压器故障率受影响越大。

4.2 与其他模型的比较

为了进一步说明模型的合理性，将其与文献[2]中同样以DGA为特征量的潜伏性故障率估计模型进行比较分析。变压状态为故障时失效率为1，状态为故障时为常数。良好状态时其故障率曲线如图4所示。

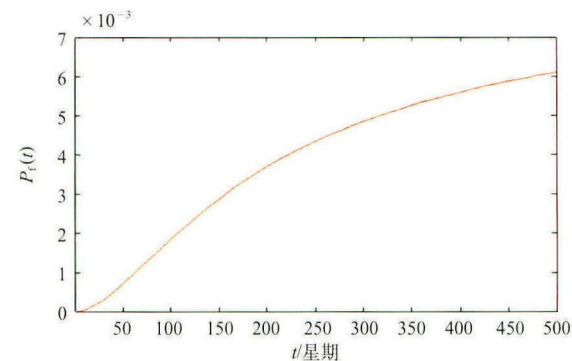


图4 暂态马尔科夫模型失效停运率时变图

1) 在时序25时，监测数据显示变压器处于警告状态，对下一阶段变压器失效率描述时文献中的马尔科夫模型失效停运概率为图4中的曲线，而实际变压器运行状态处于危险状态，应为一常数  $P_f=0.0193$ ，与实际出入较大。

2) 文献[2]的马尔科夫模型中，变压器下一时段内的状态以当前状态替代，图4在时序为28、29时（未来3个月），其失效率变化缓慢数值较小，而实际运行变压器由于潜伏性故障的发展已经导致故障，此时失效率为1。

3) 文献[2]中的失效停运函数，均没有体现出运行工况的影响。而实际运行变压器的潜伏性故障的发展受热点温度的影响较大，因此加速老化因子引入描述对变压器失效率的影响更符合实际情况。

5 结束语

1) 变压器发生内部潜伏性故障时，物理、化学等多种因素共同作用导致变压器油中溶解气体

含量发生相应改变，因此模型依据当前DGA的监测信息，结合隐士半马尔科夫状态转移矩阵，可以较好地对未来评估时间段内变压器的运行状态进行分析。

2) 变压器处于不同运行状态时，内部故障的发展过程不同，状态转移速率不同，模型对应具体的运行状态分别求解变压器故障率，更好地反映了变压器的运行特性。

3) 热点温度对变压器的内部潜伏故障率有明显的影响，加速老化因子的引入对变压器故障率的描述更符合实际运行情况，有利于提高风险评估结果的准确性。

### 参考文献

[1] IEEE Std C57 104—2008 IEEE guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers [S]. USA: IEEE Power & Energy Society, 2008.

[2] 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.

[3] Liang Yongliang, Li Kejun, Niu Lin, et al. EWDGA and Markov process based failure rate estimation of transformer internal latent fault [C]. Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2012: 1-5.

[4] 张军六, 熊莉娟, 司亚峰, 等. 变压器热路模型和负荷智能控制技术研究 [J]. 华东电力, 2014, 42 (11): 2344-2348.

[5] Argon C, Wu G S. Real-time health prognosis and dynamic preventive maintenance policy for equipment under aging Markovian deterioration [J]. International Journal of Production Research, 2007, 45 (15): 3351-3379.

(收稿日期: 2016-01-12) **EA**

广告 | AD



**Weidmüller**

## 魏德米勒Energy Meter电力参数测量仪 —— 高效透明的生产电能监测

魏德米勒Energy Meter电力参数测量仪不仅能监测电能的消耗，它还能监测电能质量的基本参数和分析来自不同导体的电流的细微差别，使电力行业用户能够快速地了解生产设备中电能参数的变化情况，保证其稳定和高效地使用。具有综合功能的Energy Meter电力参数测量仪使您可以将生产点的能源网络分块测量，尽可能精确地进行监测，配备有一体的液晶显示屏，重要的监测数据如电压、电流、功率和能耗都能一目了然。

扫一扫，关注魏德米勒官方微信



Let's connect.

魏德米勒电联接(上海)有限公司

电话: 86 21-22195008 网址: [www.weidmueller.com.cn](http://www.weidmueller.com.cn)