# 基于相关性分析的 OLTC 运行状态评价方法研究

王开明[1]，束洪春[2]，曹立平[2]，董 俊[2]，苏应敢[1]，崔 政[1]

(1.云南电网公司西双版纳供电局，云南 西双版纳 666100；2.昆明理工大学，云南 昆明 650504)

**摘要：**在有载调压变压器分接开关(OLTC)动作过程中，监测驱动电机电流信号和切换振动信号并对其进行处理。通过分析信号与 OLTC 运行状态的关联关系，选取能显著反映 OLTC 运行状态的重要指标量，并将其处理形成基于正常运行标准值的标准化后的相对值。以每次监测获得的一组指标量为一个样本，通过采集样本与正常样本间的相关性分析，或两组以上的样本中某两个关注样本之间的偏相关性分析，得到相关系数或偏相关系数。以相关系数或偏相关系数作为 OLTC 运行状态评价的重要参考指标，判断 OLTC 运行的正常与否及运行状态变化趋势。

**关键词：**有载调压分接开关；相关性分析；指标量；评价方法；运行状态

## Study of OLTC running state evaluation method based on correlation analysis

WANG Kaiming[1], SHU Hongchun[2], CAO Liping[2], DONG Jun[2], SU Yinggan[1], CUI Zheng[1]

(1. Xishuangbanna Power Supply Bureau,Yunnan Power Grid Company, Xishuangbanna 666100, China;
2. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China)

**Abstract:** In the process of OLTC switch, monitor and process OLTC's drive motor current signal and switch vibration signal. Through the correlation analysis of signal and the running state of the OLTC, indexes are used to reflect the running status of OLTC significantly, and its relative quantitative values can be formed basing on the normal operation standardization. A set of indexes is a sample, and through the analysis of the correlation between the sample and a sample of normal, or through the partial correlation analysis of two samples between more than two sets of samples, the correlation coefficient and the partial correlation coefficient can be acquired. The correlation coefficient and the partial correlation coefficient are important reference indexes for evaluating OLTC running status and judging the OLTC running state change trend.

**Key words:** OLTC; correlation analysis; index; evaluation methodology; running status

中图分类号： TM732 文章编号： 1674-3415(2015)19-0054-06

## 0 引言

有载调压变压器是保证电网供电质量的有效设备，可以联络电网、稳定负荷中心电压、调节电网潮流分布[1]，在有载调压变压器中，有载调压变压器分接开关(OLTC)又是关键装置，且故障发生率较高[2]。在有载调压变压器的运行维护中，主要的工作量也集中在 OLTC 上。OLTC 的性能包含电气性能和机械性能两个方面，电气性能主要指触头接触电阻，当触头接触电阻增大时，会引起触头过热，甚至烧损；OLTC 的机械性能指 OLTC 操作过程中选择开关和切换开关等部件的动作顺序和时间配合，以及切换过程中是否存在卡塞和触头切换不到位等，OLTC 的机械故障也能够导致触头、过渡电阻甚至变压器绕组烧损的严重故障。针对 OLTC 的故障特性，如何在长期运行中及时发现其故障或潜在故障，保证其安全正常运行，是对有载调压开关进行有效管控的重要问题。

对电力系统中的有关问题和设备，故障树分析方法[2]、相关性分析方法都有有效的应用研究[3-4]，而针对 OLTC 的运行状态的传统检测方法主要通过停电测试其接触电阻、过渡电阻、切换时间来判断其是否能够安全正常运行，工作量较大，而且检测的环境要求严苛，且须停电运行。针对日常运行的管理则没有有效的手段，尤其针对在线运行的状态。一种可行的方法是监测变压器有载调压开关切换过程中的振动信号及驱动电机电流信号，在 OLTC 处于正常运行、异常运行、故障状态时，从监测信息

中提取的重要指标量具有丰富的相关信息，对减少 OLTC 故障，保证有载调压变压器正常运行具有重要的意义。

## 1　OLTC 振动信号、驱动电机电流信号监测原理

OLTC 的结构主要分为切换开关、分接开关(选择器)、电动机构三部分。电动机构作为一般安装在变压器油箱的侧壁上，通过传动机构控制 OLTC 动作过程中的分接位置选择，并控制切换开关的快速动作弹簧机构的储能和快速释放，驱动电机电流通过对弹簧机构的稳定功率输出，完成切换动作能量的储备，其整个切换动作中的电流信号如图 1 中上半部分所示，若储能过程异常，则电机的驱动力矩发生变化，驱动电流波形也将随之变化[5]。OLTC 切换时，动、静触头接触、分离的过程产生脉冲冲击力进而产生振动信号，并通过变压器内部的接线端子和绝缘油传递至变压器侧壁，安装于合适位置的振动加速度传感器获得振动信号如图 1 下半部分波形所示，若弹簧机构疲劳、触头磨损等异常或故障，则振动波形将有明显的异常特征。通过对图 1 测得的原始波形处理形成如图 2 所示的包络图形[6]，通过对图 2 所示图形中的信息提取，可以关联分析 OLTC 切换动作过程中正常运行、异常运行及故障状态[7]。

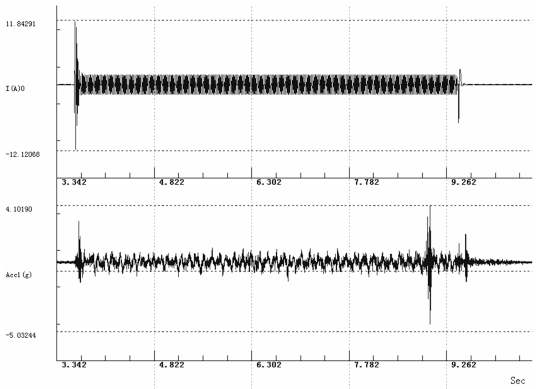


图 1 驱动电机电流信号和振动信号原始图形

Fig. 1 Original graphics of drive motor current signal and vibration signal

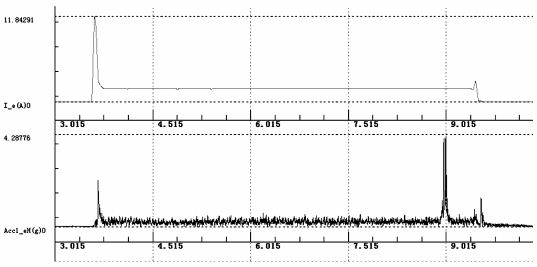


图 2 驱动电机电流信号和振动信号包络图形

Fig. 2 Envelope graph of drive motor current signal and vibration signal

## 2　相关性指标量的选择及其标准化

### 2.1 相关性分析重要指标量的选择

通过振动信号和驱动电机电流信号中包含的信息可以关联 OLTC 切换动作的正常与否，而对 OLTC 运行状态的判断和评价则需要具体的具有明显特征的指标量关联异常运行、故障及对其进行综合评价。综合大量的 OLTC 运行监测经验及典型故障类型的分析可知，以下特征信息可以作为重要的典型指标量用于评价 OLTC 的运行状态。

(1) 驱动电机电流信号的持续时间 $t_1$。

根据大量监测数据的分析可知，OLTC 正常动作过程电动机构驱动电机电流信号可分为三个明显的特征阶段：涌流阶段、动作机构切换阶段和制动器动作阶段，整个电流信号从 OLTC 切换操作开始时出现短期涌流到切换动作完成电流迅速衰减为零，过程持续 5~7 s。而当 OLTC 切换故障：开关滑档或控制继电器异常时，驱动电机电流信号将持续存在，直接提供下一次切换动作的能量储备，持续时间远大于 5~7 s。

(2) 驱动电机电流信号稳定功率输出阶段(如图 3 范围 1 所示)的幅值 $i_{max}$。

驱动电机在切换动作的过程中经历初始阶段的涌流过程后，电流趋于平缓并持续整个切换操作过程 90%以上的时间，直到制动器动作时再次出现较大电流并迅速衰减为零。因此 OLTC 正常运行时驱动电机电流信号稳定功率输出阶段的幅值 $i_{max}$ 根据设备型号的不同为 1~2 A，而当驱动机构存在润滑不足或传动机构部件断裂等故障时，$i_{max}$ 将显著大于 1~2 A，达到 4~7 A 或更高，显著反映 OLTC 动作过程中的某些异常或故障类型。

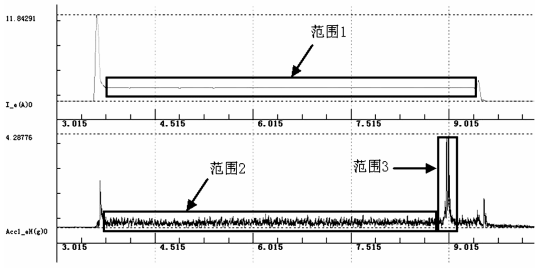


图 3 OLTC 切换过程各阶段示意图

Fig. 3 OLTC switching process diagram

(3) OLTC 振动包络信号中弹簧储能阶段(如图 3 范围 2 所示)的幅值 $g_{1max}$。

根据 OLTC 切换动作的整个过程的时序，在切换开关动作前的 3~5 s 时间内，快速机构的弹簧处

于储能阶段，在这一时期内监测到的振动信号主要为电动机构和传动机构的振动，若正常运行的OLTC相关档位切换，这一阶段的振动幅值 $g_{1max}$ 明显低于OLTC切换动作的振动幅值 $g_{2max}$。若传动机构存在润滑不足，齿轮松动等异常状态时，则储能阶段的 $g_{1max}$ 有明显的增大，同一档位切换动作异常值可以达到正常值的2~3倍或更大，出现如图4所示的明显的“毛刺”。

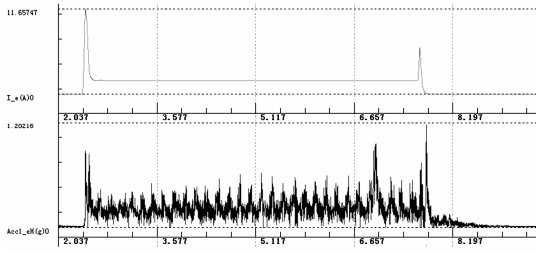

**图4 某OLTC异常信号图形**

Fig. 4 An OLTC abnormal signal pattern

(4) OLTC 振动包络信号中切换动作的持续时间 $t_2$。

OLTC 的类型繁多，且分为组合式和复合式两种结构类型，而切换开关根据动作原理又分为枪机式、过死点式、摆杆式等类别，故各种类型设备的切换动作时间有一定的差异，但综合来看，大多为40~70 ms之间，而在实际切换操作中，由同一弹簧快速机构带动的三相触头，切换动作也存在一定的不同步，根据技术要求，对于由一个电动机构驱动两个或以上切换开关，不同步时间应小于100 ms。因此，OLTC 振动包络信号中切换动作的持续时间 $t_2$ 应不大于170 ms左右，而当弹簧老化、三相严重不同步时，$t_2$ 将显著大于170 ms，反映OLTC的异常或故障运行状态。

(5) OLTC 振动包络信号中切换动作的振动(如图3范围3所示)幅值 $g_{2max}$。

OLTC 的切换动作产生动、静触头的碰撞，进而形成明显的脉冲冲击力信号，这一冲击振动信号明显区别于弹簧储能阶段的振动信号，振动幅值 $g_{2max}$ 一般根据OLTC类型的区别为1.5~5$g$，不同类型的OLTC切换动作 $g_{2max}$ 有较大的区别，但同一类型的 OLTC 或同一台 OLTC 的不同档位切换动作 $g_{2max}$ 范围接近，可以相互进行比较。当弹簧老化、触头松动、触头磨损等异常或故障运行状态时，$g_{2max}$ 相对于同型号、同一 OLTC、同一档位切换将有明显的幅值变小，严重时将有2倍以上的区别。

针对OLTC振动信号和驱动电机电流信号关联设备运行状态的研究目前形成的成果应用还较少，故本文讨论相关研究分析方法采用以上5个能显著关联OLTC运行状态的指标量进行相关分析研究。随着后续研究的深入，指标量可扩展。

### 2.2 指标量的标准化

通过分析大量的OLTC振动信号和驱动电机电流信号，并跟实际的OLTC运行状态相印证，及典型异常运行、故障案例相关联分析，不同的典型指标量可以反映不同的OLTC切换动作正常、异常、故障运行状态[8]，但是如何量化反映 OLTC 的实际运行状态及长期的运行趋势，则需要一定的数据处理方法。一种有效的方法是将不同量纲的指标量与正常运行的基准值的对比处理形成类似于标幺值的无量纲的相对值(即标准化的指标量)，以相对值数值的大小初步判断设备相关联的运行状态。指标量标准化的具体方法是：从同一台有载调压变压器的分接开关动作监测历史数据中选择至少 10 次同一档位动作的指标量数据，且采集的数据应经有载调压切换装置切换过程试验结果验证为正常动作，分别求取各个指标量的数学期望值作为对应的档位切换相关的单个指标量的基准值，将一次监测结果中提取的指标量值除以各自对应的基准值，得到指标量不同量纲基于基准值的相对值作为一组标准化后的指标量值形成的一个样本。相应的样本定义及计算公式为

$$\begin{aligned} &X_{\mathrm{N}}=(x_{i1},x_{i2},\cdots,x_{ij}),\ X_j=(x_1,x_2,\cdots,x_j)\\ &X^*=(x_1^*,x_2^*,\cdots,x_j^*),\\ &X^*=\frac{X_j}{E(X_{\mathrm{N}})}=\frac{x_j}{\sum_{i=1}^{n}p_i x_{ij}}\ (\text{其中}i=1,2,\cdots,n) \end{aligned} \tag{1}$$

其中：$X_{\mathrm{N}}$ 为监测历史数据中正常运行的任意一个指标量样本；$X_j$ 为某次测量的一个指标量样本，$j$ 为指标量的个数，本文的研究分析涉及上文中的 5 个量值；$X^*$ 为指标量基于基准值标准化后无量纲的相对值样本；$x_{ij}$，$x_j$，$x_j^*$ 分别为监测指标量的正常基准值、待评估值、标准化值。

关联监测运行经验，根据已有的正常运行、故障或存在潜在故障时的边界阈值确定不同状态对应的区间范围，以单个标准化的指标量与不同运行状态的区间范围进行对比，以分别属于不同的区间为依据判断OLTC不同档位切换动作的正常运行、故障或潜在故障。基于单个指标量对OLTC运行状态的评价虽然只是一种简单的评价方法，但是相对于发生典型性异常状态或故障的OLTC仍具有较高的判断准确率和信息价值，而若如图4所示的包络图

形中，OLTC 振动包络信号中弹簧储能阶段的幅值相对值为正常运行幅值的 4.5 倍，处在异常运行的区间范围内，则可判断为驱动机构润滑不足。

## 3　基于相关性分析的 OLTC 运行状态评价

单个指标量可以关联 OLTC 某些特定异常运行状态或故障，具有较好的信息价值，但是对于某些异常或故障，单个的指标量并不能明显地反映出准确的运行状态信息，如驱动电机电流信号的持续时间超过正常动作时间一定量，大多数的故障案例显示为开关滑档，也有个别案例显示为制动器运行异常。而对应于某些异常或故障类型，则存在两个或两个以上的指标量与其关联，如驱动机构润滑不足时，振动包络信号中弹簧储能阶段具有明显的振荡现象，该阶段幅值比正常幅值明显偏大，同时驱动电机电流信号稳定功率输出阶段的幅值发生明显的变化，通过这两个指标量的相关性分析，可以显著提高 OLTC 运行状态评价的准确性。同时，对于 OLTC 某个档位切换的整体运行状态评价也需要对多个单独的指标量进行综合分析，以确定其运行状态的好坏，而针对多个指标量的相关性分析是一种行之有效的评价方法。

相关性分析作为数据多元分析的重要技术手段在指标筛选、有效特征选取等具有重要作用，利用相关系数来衡量两个变量之间的相关性，其价值在于定量刻画两个数据向量的相似程度[9]。对 OLTC 的运行状态进行评价时，以新采集的标准化的指标量形成待评价样本 $X$，以一组正常运行的相对值标准化样本为 $Y$，计算其相关系数，以新采集样本和正常运行样本之间的相关关系的密切程度，即相关系数评价 OLTC 的运行状态的安全与否及其安全程度。相关系数越大，即表示 OLTC 越接近已知的正常运行状态；相关系数越小，则表示 OLTC 运行异常或存在弹簧老化、触头磨损等相关潜在故障或直接故障。相应的计算公式为

$$\rho_1=\rho_1(X,Y)=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{X})(y_i-\overline{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{X})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\overline{Y})^2}} \tag{2}$$

其中，$\rho_1$ 为相关系数，$|\rho_1|\le 1$，当$|\rho_1|$的值越大，说明 $X$ 和 $Y$ 之间的相关程度越大或称越相似，即 OLTC 运行趋于正常；当$|\rho_1|$的值越小，说明 $X$ 和 $Y$ 越不相关(不相似)，即 OLTC 运行状态为异常或故障。

在图 3 和图 4 所示监测信号中分别提取上文所述的 5 种关联 OLTC 运行状态的指标量，并分别对其进行标准化，形成两个样本为

$X_1^*$=(1.045, 0.989, 0.975, 1.121, 0.953)

$X_2^*$=(1.058, 1.105, 4.504, 1.258, 0.904)

并分别以图 3 和图 4 中监测的 OLTC 档位切换的一组正常运行的相对值标准化样本为

$Y_1^*$=(1.011, 1.005, 0.996, 1.056, 0.989)

$Y_2^*$=(1.018, 1.012, 0.993, 1.021, 0.992)

计算它们各自的相关系数分别为

$$\rho_{1(1)}=\rho_{1(1)}(X_1^*,Y_1^*)=0.9695$$

$$\rho_{1(2)}=\rho_{1(2)}(X_2^*,Y_2^*)=-0.514$$

$$|\rho_{1(2)}|=0.514$$

利用相关系数 $\rho_1$ 判断相关关系的密切程度标准定义如下：

若相关系数 $\rho_1=0$，则相关程度为完全不相关；

若相关系数 $0<\rho_1\le 0.5$，则相关程度为低度相关；

若相关系数 $0.5<\rho_1\le 0.9$，则相关程度为显著相关；

若相关系数 $0.9<\rho_1<1$，则相关程度为高度相关；

若相关系数 $\rho_1=1$，则相关程度为完全相关。

可知图 3 所监测的 OLTC 档位切换运行高度相关于正常动作，可判断为正常运行，图 4 所监测的 OLTC 档位切换运行仅显著相关于正常动作，判断为异常运行，应对其进行重点关注。由于以往针对 OLTC 运行状态判断的方法主要通过切换装置切换过程实验实现，而切换实验的开展仅在投运前及大修时进行，对于实时掌握 OLTC 的状态显然还有一定的限制和不足。通过分析可知，本方法可以对在线或离线的状态的监测数据进行分析判断，相关结果可作为精细的切换装置切换过程实验开展的辅助和验证信息。

## 4　基于偏相关性分析的 OLTC 运行管控

在对 OLTC 的运行管控中，需要对 OLTC 的相同档位切换在某一时期内的运行状态趋势变化进行比较分析，则需要选取这一时期内的同一档位切换的多组样本，进行偏相关性分析。在讨论一组变量内部之间的相关性时，涉及到讨论一组变量里的某两个变量之间的相关性，但这种相关性又不同于单独只有两个变量之间的相关性问题。因为这两个变量的相关性有一部分可能是受到其余变量的共同影响而产生的，当把这种影响按照一定的统计原理消

除后所做的相关性分析称为偏相关性分析。

应用最近一次的样本和之前某一时间点的一个样本，求取它们之间的偏相关系数作为评价这两个档位之间切换动作的状态变化趋势的标准。相关系数越小，表示跟这一时期内其他样本相关的两个样本间的相关密切程度越低，则相关档位切换动作的状态变化较大；相关系数越大，表示跟这一时期内其他样本相关的两个样本间的相关密切程度越高，则相关档位切换动作的状态变化较小(如选取的之前样本为故障或潜在故障时的样本，则最近一次的样本也类似于之前样本时的状态；如选取的之前样本为正常状态时的样本，则最近一次的样本也接近于正常运行状态，即其相关功能良好，状态劣化不明显)。相应的计算公式为

$$\boldsymbol{S}=\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_1^{\mathrm{T}} \\ S_{21} & S_{22} & S_2^{\mathrm{T}} \\ S_1 & S_2 & S_{22} \end{pmatrix} \tag{3}$$

$$\rho_2=\rho_2(Y_1,Y_2,X_1,X_2,\cdots,X_p)=\frac{S_{12}-S_1^{\mathrm{T}}S_{22}^{-1}S_2}{\sqrt{S_{11}-S_1^{\mathrm{T}}S_{22}^{-1}S_1}\sqrt{S_{22}-S_2^{\mathrm{T}}S_{22}^{-1}S_2}} \tag{4}$$

其中：$\boldsymbol{S}$ 为样本组 $Y_1,Y_2,X_1,X_2,\cdots,X_p$ 的样本协方差矩阵的分块矩阵形式，$Y_1,Y_2$ 为样本组中的两个关注变量，$X_1,X_2,\cdots,X_p$ 为样本组中除 $Y_1,Y_2$ 的其余样本；$\rho_2$ 为 $Y_1$ 与 $Y_2$ 跟样本组中其余样本相关联的偏相关系数，$|\rho_2|\leq 1$，当$|\rho_2|$越小，表示 $Y_1$ 与 $Y_2$ 的相关密切程度越低，则相关档位切换动作的状态变化较大，当$|\rho_2|$越大，表示 $Y_1$ 与 $Y_2$ 的相关密切程度越高，则相关档位切换动作的状态变化较小。

以图 3 所示监测信号中提取的指标量形成的样本为 $Y_1$=(1.045, 0.989, 0.975, 1.121, 0.953)，以一段时间(如一年)前的一组经有载调压切换装置切换过程试验结果验证为正常动作的样本为 $Y_2$=(1.005, 0.996, 0.986, 1.015, 0.991)，$Y_1$ 与 $Y_2$ 为这段时间内所有监测数据形成样本组中的两个关注样本，另以本时期内的其他任选一个样本为 $X$ =(1.011, 1.005, 0.996, 1.056, 0.989)，计算偏相关系数 $\rho_2=\rho_2(Y_1, Y_2, X)=0.6846$。通过参照上一节定义相关系数密切程度的方法类似地定义偏相关系数的密切程度判断标准，以分别属于不同的范围判断 OLTC 在这段时间内的变化程度，作为 OLTC 全寿命周期管理的相关判断参照依据。通过分析可知，本次监测指标量考虑一段时间内任选的一个样本较这段时间有一定程度的差异，即有一定的劣化，应当在随后的运行管控中对此档位切换进行持续关注。通过偏相关分析法的量化判断，可以为 OLTC 在整个运行过程中的全寿命周期管理提供必要的判断决策依据。

## 5 结论

(1) 通过对 OLTC 驱动电机电流信号和切换振动信号的分析处理，提取能显著反映 OLTC 运行状态的指标量，并对其进行基于正常运行基准值的标准化，从而解决不同量纲的指标量对反映 OLTC 运行状态的统一量化问题。标准化的指标量可以作为多维信息，关联并直观反映 OLTC 运行状态正常、异常或故障的程度。

(2) 通过将一次采集指标量进行标准化后形成的无量纲的指标量作为一个独立样本，并对新采集样本和正常样本的相关性分析，从而得出相关系数作为 OLTC 运行状态的判断依据的方法，可以将多个指标量作为相互关联的影响因素，综合关联分析 OLTC 的运行状态，对准确判断 OLTC 运行状态提供量化标准。

(3) 在对具体 OLTC 设备进行动态过程运行管控中，以一段时期内同一 OLTC 同一档位切换的多个样本中的两个关注样本进行偏相关分析的方法，可以对 OLTC 的全过程寿命管理提供有效的量化判断依据，同时对 OLTC 相关部件的劣化趋势或程度提供量化判断依据。

## 参考文献

[1] 王光亮. 有载调压变压器对电压稳定性影响综述[J]. 继电器, 2008, 36(11): 79-84.
WANG Guangliang. A survey on effect of on-load tap changer on the voltage stability[J]. Relay, 2008, 36(11): 79-84.

[2] 周宁, 马建伟, 胡博, 等. 基于故障树分析的电力变压器可靠性跟踪方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 72-77.
ZHOU Ning, MA Jianwei, HU Bo, et al. Reliability tracing technique for power transformers using the fault tree analysis method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 72-77.

[3] 高英, 谢开贵, 胡博, 等. 考虑光伏出力与负荷相关性的光伏电站容量可信度评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 1-6.
GAO Ying, XIE Kaigui, HU Bo, et al. Photovoltaic power capacity credit evaluation model considering the correlation between photovoltaic power generation and system load[J]. Power System Protection and Control,

2013, 41(14): 1-6.

[4] 王韶, 朱姜峰. 基于改进相关性分析法的配电网络单相接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 76-81.
WANG Shao, ZHU Jiangfeng. Faulty line selection of single-phase to ground fault in distribution network based on improved correlation analysis method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 76-81.

[5] 朱光伟, 张彼德. 电力变压器振动监测研究现状与发展方向[J]. 变压器, 2011, 39(24): 123-131.
ZHU Guangwei, ZHANG Bide. Research present situation and the development direction of power transformer vibration monitoring[J]. Transformer, 2011, 39(24): 123-131.

[6] RIVAS-TRUJILLO E, LANIADO-JÁCOME E, SAN-ROMÁN J L, et al. Characterizing the diverter switch of a load tap changer in a transformer using wavelet and modal analysis[J]. Engineering Structures, 2010, 32(10): 3011-3017.

[7] 马宏彬, 何金良, 陈青恒. 500 kV单相电力变压器的振动与噪声波形分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(8): 1599-1604.
MA Hongbin, HE Jinliang, CHEN Qingheng. Vibration and sound waveform analysis of 500 kV single phase power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(8): 1599-1604.

[8] 程锦, 王正刚, 徐燕飞, 等. 振动法在线检测电力变压器有载调压开关触头状况的可行性研究[J]. 高压电器, 2005, 41(2): 95-97.
CHENG Jin, WANG Zhenggang, XU Yanfei, et al. Feasibility study using vibration measurement to on-line detect the contact condition of OLTC[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(2): 95-97.

[9] 陈曦, 陈伟根, 王有元, 等. 油纸绝缘局部放电与油中产气规律的典型相关分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 92-99.
CHEN Xi, CHEN Weigen, WANG Youyuan, et al. Canonical correlation analysis of dissolved gas production with partial discharges in oil paper insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 92-99.

**收稿日期：2014-12-25；　修回日期：2015-03-03**

**作者简介：**

王开明(1981-)，男，工程师，研究方向为电力系统运行控制；

束洪春(1961-)，男，博士，教授，博士生导师，研究方向为电力系统继电保护和电力系统稳定控制；

曹立平(1985-)，男，通信作者，硕士研究生，研究方向为电力系统监测及继电保护。E-mail: 349514121@qq.com

(编辑　周金梅)