

改进主成分分析法在配电变压器综合评价中的应用研究

李涛¹, 刘东¹, 王媚², 费华², 孙文华³

(1.上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2.上海市电力公司市区供电公司, 上海 200070; 3.常州市供电公司, 江苏 常州 213000)

摘要:配电网中配电变压器的监测已经成为配电自动化系统中的一个重要组成部分, 但是如何充分利用已收集到的配变监测历史数据对其运行优劣情况进行科学的评价仍然是一个急待解决的问题。首先从配变监测系统的海量历史负荷信息中计算出表征配变优劣运行的多项运行参数指标, 然后针对评价指标数据中庞大的数据空间以及数据之间的相关性而不易进行综合评价的缺点, 运用改进主成分分析法, 经过矩阵变换, 在保留运行参数数据主要信息的基础上去除数据间的相关性, 降低评价配变的指标维数, 提炼出反映配变优劣运行的主要特征, 获得配电变压器运行的综合评价指标, 为配变的运行、管理、状态监测与诊断提供有效的评价。一个现场的实例验证了所提方法的有效性。

关键词:主成分分析 (PCA); 配电变压器; 综合评价; 数据挖掘

Study on comprehensive evaluation for distribution transformer based on modified principal component analysis

LI Tao¹, LIU Dong¹, WANG Mei², FEI Hua², SUN Wen-hua³

(1.Electrical Engineering Department, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China ;
2.Shanghai Urban Power Supply Company, Shanghai 200070, China ;
3. Changzhou Power Supply Company, Changzhou 213000, China)

Abstract: The monitoring system for distribution transformer has become an important part of the distribution automation system. However, how to make use of the historical data to evaluate distribution transformer 's optimal operation is still an urgent problem to be solved. This paper calculates many indices of the operational parameters from massive historical loading data to evaluate the distribution transformer 's operational status. Moreover, this paper makes use of the indices and applies the modified principal component analysis (PCA) to evaluate the optimal operation states, which can reduce the dimensions of the indices through matrix conversion, abstract the principal components. It can provide the effective evaluation for the operation, management, status monitoring and diagnosis of the distribution transformers. The practical example shows that the proposed method is effective.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.90612018).

Key words: principal component analysis ; distribution transformer ; comprehensive evaluation ; data mining

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2006)24-0026-07

0 引言

目前,基于各种通讯方式的配电变压器监测系统在配电网中得到了广泛应用^[1],日益成为配电自动化系统的一个重要组成部分。但是在已有的配变

监测历史数据中,还没有科学的方法进行充分综合利用。在配变运行状况的评价中,涉及到众多的运行参数,如配变的电流重载率、负载系数、三相负荷不平衡度、空载损耗和负载损耗、绕组温度、经济运行区、电压合格率、零序电流等,这些运行参数指标能够真实、完全的反映配变的运行状态。若直接对如此庞大的数据空间进行分析,往往不能取

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(90612018)

得良好的效果,并且各个运行参数都是有一定的相关性,从而使得这些运行参数提供的信息在一定程度上有所重叠。

主成分分析 PCA (Principal Component Analysis) 是多元统计学中解决多变量高维复杂系统的简便、有效的数学方法^[2]。其基本思想就是寻找一组新的变量代替原有变量,新变量是原变量的高度综合和最佳简化,近来已成为构造系统评估指数和系统数据评估排序的重要方法。文献[3]在进行电力负荷预测时采用主成分分析法减少输入向量的维数,并保留了原来输入向量的有用信息。文献[4]在不损失原始数据主要信息的前提下,利用主成分分析进行暂态稳定评估的输入特征变量选择。文献[5]运用主成分分析法,经过矩阵变换、降低维数提取出故障信息的主要特征实现了变压器的故障诊断。

目前国内外很多关于配电变压器运行的优劣和更换的文献还仅仅局限于研究单个的运行参数来进行判断^[6]。因此,如何从配变大量的运行数据中形成一套完整、适用的综合评价指标体系仍然是一个值得研究的课题。本文首先在配变监测系统中历史数据的基础上计算出表征配变优劣运行的多项运行参数指标,然后对这些运行指标进行主成分分析,找到影响配变运行的综合主成分,这样就可以得到对各台的配电变压器进行综合指标排序。

1 主成分分析原理及其改进

1.1 主成分分析原理

主成分分析法的背景是研究中经常会遇到多指标的问题,这些指标之间往往存在一定的相关性,直接纳入分析不仅复杂,变量间难以取舍,而且可能因为共线性而无法得出正确结论。主成分分析的核心是导出少数几个主成分分量,使它们尽可能完整的保留原始变量的信息,且新变量之间互不相关,从而在不丢掉主要信息的前提下避开了共线性的问题,便于进一步分析。

数据挖掘中涉及的属性也往往是相关的,这就给数据处理带来很大困难。因此需要在尽可能少丢失信息的前提下降低信息系统的维数。主成分分析就是这样一种方法,能够导出少数几个主成分分量,使它们尽可能完整地保留原始变量的信息,且彼此间不相关,以达到分离数据矢量之间的共性和差异性并简化数据的目的。

设 p 个进行评价的原始指标: $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$,

在 n 个单位之间进行比较,则共有 np 个原始数据,主成分分析的目标是将这些原始指标组合成新的相互独立的综合指标 $y_1, y_2, y_3, \dots, y_p$,即

$$y_i = Xa_i = \sum_{j=1}^p a_{ij}x_j \quad (j=1,2,\dots,p) \quad (1)$$

在文献[7]中已得到结论:协方差矩阵 $V = \frac{1}{n} X^T X$ 的第 1 个特征值 λ_1 所对应的标准化特

征向量 a_1 为第一主轴, $y_1 = Xa_1$ 为第一主成分,依此类推可求得各个主成分分量。其中 y_1 携带的信息量最大, y_2 次之,……。如抽取了 m 个主成分,其携带的信息总和为: $\sum_{h=1}^m \lambda_h$ 。在主成分分析中,

$\beta_j = \lambda_j / \sum_{i=1}^p \lambda_i$ 为各个主成分的包含信息量(贡献率),而 $\sum_{j=1}^m \lambda_j / \sum_{i=1}^p \lambda_i$ 为前 m 个主成分的累计包含信息总量(累积贡献率)。实践中根据问题的需要选取主成分的个数,要求累积贡献率 85%。

1.2 主成分分析法的改进

原始数据一般包括两部分信息:一是反映各维指标变异程度的差异信息,由各维指标的方差大小反映;二是反映各指标间相互影响程度的相关信息,由相关矩阵体现。传统的标准化方法是使各维指标的方差变成 1,消除各维指标在变异程度上的差异,但从中提取的主成分只包括了各维指标间的相互影响这一部分信息,不能准确反映原始数据所包含的全部信息。

文献[8]中证明:用原始数据除以各维指标的均值来标准化数据,即 $x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{E(x_j)}$ ($i=1,2,\dots,n$,

$j=1,2,\dots,p$),这样均值化处理后的协方差矩阵

不仅消除了指标量纲与数量级的影响,还能包括原始数据的全部信息。本文的改进 PCA 法使用均值标准化的方法来进行无量纲化处理^[9]。

2 配电变压器评价指标及其主成分分析

2.1 配电变压器电流重载率

配电变压器的安全和寿命同负载有直接关系。长期过负载运行将引起配变绕组温升增加,油温升高,绝缘降低,从而缩短其寿命,甚至烧坏配变^[10]。

规定 A、B、C 三相中任意单相电流超过电流重载阈值,则记为重载一次,且电流重载率定义为:

$$\text{电流重载率} = \frac{\text{电流重载次数}}{\text{ABC相电流总采集点}} \quad (2)$$

其中:电流重载率阈值为配变额定电流的 70%。

2.2 配电变压器三相负荷不平衡度

我国 6~10 kV 配电网中多采用三相四线制接线,且存在大量的单相负载,因此配变的三相不平衡运行会造成部分变压器运行不经济、变压器故障率高、甚至烧损用户设备^[11]。

2.3 配电变压器的零序电流

配电变压器采用 Y/Y_{n0} 接线,由于三相负载不平衡造成的零序电流可以引起附加损耗,使得变压器运行温度升高,危及变压器的安全和寿命。国家标准 DL/T 572-1995《电力变压器运行规程》^[12]中规定 Y/Y_{n0} 接线的配电变压器运行时中线电流不能超过变压器额定电流的 25%。

2.4 配电变压器的绕组温度

配电变压器的绕组温升与变压器负荷间关系在国家标准 GB/T15164-1994《油浸式电力变压器负载导则》^[13]中给出。即:

$$Th_s = T_{t0} + 1.1g(I/I_n)^{1.6} \quad (3)$$

式中:Th_s为绕组热点温度(); T_{t0}为顶部油温; g为稳态时绕组与油间的平均温差(K); I为绕组的电流(A); I_n为绕组的额定电流(A)。

2.5 配电变压器的最佳经济运行区

国家标准 GB/T13462-1992《工矿企业电力变压器经济运行导则》^[14]提出变压器经济运行区和变压器最佳经济运行区的概念,将变压器的运行区间划分为最佳经济运行区、经济运行区、最劣运行区。

文献[15]给出了变压器的运行区的确定方法。其中最佳经济运行区为 1.33β_j β 0.75;经济运行区为 β_j² β 1;最劣运行区为 0 < β < β_j², 式中 β 为负载率, β_j 为经济负载系数, β_j = √(P₀/P_K)。

2.6 配电变压器的负载波动损耗系数

文献[15]中引入负载波动损耗系数 K_T 来对变压器功率损耗动态计算。负载波动损耗系数 K_T 指一定时间内,变压器负载波动引起的负载损耗与其平均负载损耗之比,具体定义为:

$$K_T = \frac{\beta_{TJ}^2}{\beta^2} = \frac{T \int_0^T \beta_i^2 dt}{(\int_0^T \beta_i dt)^2}$$

式中:β_{TJ}为 T 时间段的均方根负载系数, β 为 T

时间段的平均负载系数。

2.7 配电变压器的电压合格率

配变的电能质量直接关系到用电用户。国家标准规定:供电电压 10 kV 及以下的三相供电电压不能超过额定电压的±7%, 220 V 电压不能超过额定电压的+7%和-10%。电压偏高时,变压器铁损增加,电压偏低时,变压器铜损、线路损耗增加,因此电压合格率直接影响到配电变压器的优化运行。

2.8 配电变压器的空载损耗和负载损耗

在 10 kV 城乡配电网中,变压器损耗(空载损耗和负载损耗)约占配网总损耗的 50%左右,占有相当比例,特别是在用电低谷时,因为负荷低,运行电压高,空载损耗更大,这样就不利于配电变压器的优化运行。

2.9 配电变压器运行指标的改进 PCA 步骤

为了利用这些运行参数指标统一表征配变的运行优劣,规定指标值越大,配变的运行情况越差,相反运行越优,其中采用非最优运行率,即配变处于最劣运行区和经济运行区的时间和与总的运行时间的比值来反映配变的经济运行。另外利用配变的电压不合格率来表征配变的供电质量,并利用配变的负载系数代表绕组的温度,来间接反映配变的绕组温升。

在上述指标中,电流重载率、负载系数和负载损耗都同负荷有直接的关系,反映配变的安全运行因素;三相负荷不平衡度和零序电流反映的是配变的三相不平衡的运行特性;空载损耗、负载波动损耗系数、非最优运行率反映配变的经济运行特性;另外电压不合格率则反映配变的供电质量特征。这 9 个指标都可以从配变监测的历史数据中直接获得或计算出来,并能单独反映配变的运行特性。目前国内外配电自动化系统中的高级应用模块还仅仅是局限于研究这些单个的运行参数来判断配变运行的优劣状况。但是这些运行参数太多,不但会增加计算的复杂性,而且也给配变运行情况的合理性分析和解释带来困难。另外各个运行参数都是有一定的相关性的,从而使得这些运行参数提供的信息在一定程度上有所重叠。

因此,在以上计算出表征配变优劣运行的各项运行参数指标的基础上,就可以对这些运行指标进行主成分分析,找到影响配变运行的综合的主成分。具体运用改进 PCA 法进行配变综合评价的流程图如图 1 所示。

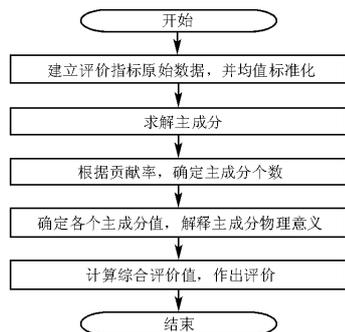


图 1 运用改进 PCA 法进行配变综合评价的流程图

Fig. 1 Flow chart of comprehensive evaluation based on modified PCA

3 实例分析

表 1 配电变压器的运行参数指标

Tab.1 Operational indices of distribution transformers

配变名称	不平衡度	重载率	负载系数	波动损耗系数	电压不合格率	空载损耗	负载损耗	非最优运行率	零序电流
清凉 34 幢	0.256	0.001	0.148	1.065	0.015	1.01	0.118	0.947	2.149
劳动南 20 幢	1.317	0.003	0.088	1.078	0.414	0.713	0.336	0.991	8.353
许家巷 10 幢	0.652	0.000	0.036	1.033	0.05	0.713	0.005	0.983	2.503
劳动南 37 幢	0.15	0.004	0.142	1.007	0.02	0.6	0.08	0.884	1.348
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
太雷故居	0.923	0.003	0.297	1.054	0.549	0.644	0.325	0.61	4.157
清潭三村	1.13	0.001	0.054	1.074	0.394	0.293	0.006	1.000	6.887
浦北 19 幢	1.036	0.139	0.379	1.102	0.000	0.49	0.508	0.726	4.317
建筑学院	0.837	0.085	0.366	1.066	0.003	0.46	0.277	0.386	3.918

3.2 配变运行指标进行主成分分析

对原始数据分别采用上述两种主成分分析法, 表 2 中列出了各个主成分对应的特征值和相应的贡献率和累积贡献率。根据累积贡献率 85% 的原则, 确定主成分个数。从表 2 中可以看出, 利用改进主成分和常规主成分分析法, 前 4 个主成分分量的累积贡献率已经达到 98.3% 和 90.3%, 这说明前 4 个主成分提供了原始数据的足够信息, 因此提取 4 个主成分。这样主成分分析法一方面在不影响评价结果的前提下, 用少量的、代表性的综合特征构建新的综合指标, 明显降低了评价指标的维数; 另一方面又可涵盖原指标变量包含的信息量。

从表 2 比较结果得出, 利用均值标准化的改进

本文的实例是针对常州供电公司城区的 108 台配变监测的历史数据进行分析和验证的, 并且在 Visual C#.Net 环境下实现了完整的基于改进主成分分析法的配电变压器指标评价算法程序和功能模块, 其中包括计算出考查和评价配变优劣运行的多项运行参数指标, 并在这些评价指标的基础上, 运用改进 PCA 法, 提取出反映配变优劣运行的主要特征, 实现对配电变压器的综合指标评价。

3.1 配变运行指标数据准备

表 1 列出了根据某供电公司城区 108 台的配变终端在 2004 年 5 月 1 日 ~ 2006 年 3 月 1 日的历史负荷数据计算出的运行参数指标。

主成分分析法, 前 4 个主成分包含的信息比常规方法前 4 个主成分承载的信息高 8%, 可见改进主成分分析法可用较少的主成分提取更多的原始信息。

3.3 配变主成分分析的物理解释

利用改进 PCA 法, 可以计算出所有配变的各个主成分值。在图 2 中, 横轴表示各台配变的第 1 主成分值, 而纵轴表示的是各台配变的第 2 主成分值, 这样所有配变各自的第 1 主成分值和第 2 主成分值的分布情况表示在图 2 中。其中主成分值越大就代表配变在此主成分值下的运行最差, 需要重点关注。因此, 在分布图的最右上方的配变的运行相对比较差, 而分布在最左下方的配变运行越优。

表 2 常规和改进 PCA 法的结果比较

Tab.2 Comparison of conventional PCA and modified PCA

主成分序号	改进主成分分析法			常规主成分分析法		
	特征值	贡献率/(%)	累积贡献率/(%)	特征值	贡献率/(%)	累积贡献率/(%)
1	11.382	61.7	61.7	4.264	47.4	47.4
2	2.657	14.4	76.1	1.600	17.8	65.2
3	2.349	12.7	88.8	1.323	14.7	79.9
4	1.748	9.5	98.3	0.932	10.4	90.3
5	0.257	1.4	99.7	0.342	3.8	94.1
6	0.037	0.2	99.9	0.237	2.6	96.7
7	0.016	0.1	100.0	0.161	1.8	98.5
8	0.002	0.0	100.0	0.106	1.2	99.7
9	0.001	0.0	100.0	0.035	0.3	100.0

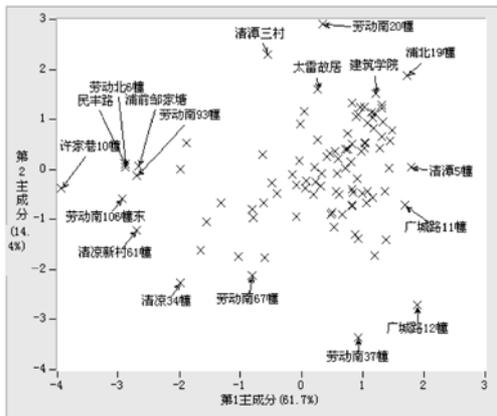


图 2. 配变的第 1 主成分和第 2 主成分值分布

Fig.2 Distribution of the first and second component

各个主成分与原变量的线性组合关系如表 3 所示。

表 3 各个主成分与原变量之间的线性关系

Tab.3 Linear relation between each principal component and the original variable

	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分	第 4 主成分
不平衡度	-0.017	0.563	-0.128	0.152
重载率	0.484	0.060	-0.142	0.080
负载系数	0.370	-0.062	0.152	-0.205
波动损耗系数	-0.003	0.008	0.513	-0.004
电压不合格率	-0.033	0.181	-0.188	0.981
空载损耗	-0.006	-0.018	0.344	0.013
负载损耗	0.415	-0.120	-0.096	-0.025
非最优运行率	-0.011	0.003	0.407	0.008

由表 2 中可以看出:第 1 主成分对所有的指标贡献率占 61.7%,表 3 中第 1 主成分中分项指标重载率、负载系数和负载损耗相对比较大,且为正,这就表明第 1 主成分在重载率、负载系数和负载损

耗指标上倾向于大的值,即这 3 个指标值越大,配变的第 1 主成分值越大。这 3 个分项指标可以看作配变的负载运行特性,因此第 1 主成分称为配变的安全运行成分。以表 1 中的许家巷 10 幢配变为例,这台配变的重载率、负载系数和负载损耗相对其它变压器来说偏小,因此许家巷 10 幢配变的第 1 主成分综合指标值最小,即这台配变在第 1 主成分下运行情况是最优的。而浦北 19 幢配变的重载率、负载系数和负载损耗偏大,因此,浦北 19 幢配变的第一主成分综合指标最大,即这台配变在第 1 主成分下运行情况是最差的。具体的排序结果如表 4 中“第 1 主成分排序”列所示,这样对于第 1 主成分值偏大的配变,如许家巷 10 幢和建筑学院等配变的运行状况主要是长期的过载运行,因此应该更换容量偏大的配变或者降低其负载运行。

表 2 中列出第 2 主成分对所有的指标贡献率占 14.4%,表 3 中的第 2 主成分中分项指标三相不平衡度和零序电流最大,且为正,这就表明这 2 个指标值越大,配变的第 2 主成分值越大。这 2 个分项指标可以看作反映三相不平衡的运行特性,第 2 主成分称为配变不平衡运行成分。以表 1 中劳动南 37 幢配变为例,这台配变的不平衡度和零序电流相对其他的配变偏小的,因此劳动南 37 幢配变的第 2 主成分综合指标值最小,即这台配变在第 2 主成分下运行情况是最优的。而劳动南 20 幢配变的不平衡度和零序电流偏大,因此这台配变的第 2 主成分综合指标值最大,即劳动南 20 幢配变在第 2 主成分上运行情况是最差的。具体的排序结果如表 4 中“第 2 主成分排序”列所示,这样对于第 2 主成分值偏大的配变,如劳动南 20 幢和清潭三村等

配变的运行状况主要是不平衡运行,因此应该考虑调整负荷尽可能使之三相平衡运行。

依此类推,表2中列出第3主成分对所有的指标贡献率占12.7%,而在表3的第3主成分中分项指标空载损耗、非最优运行率和波动损耗系数偏大,且为正,这就表明这3个指标值越大,配变的第3主成分值越大。这3个分项指标可以看作反映配变经济运行的特征,因此第3主成分称为配变经

济运行成分。

而第4主成分对所有的指标贡献率占9.5%,其中的电压不合格率最大,这就表明电压不合格率指标值越大,配变的第4主成分值越大。电压不合格率反映配变供电质量的特征,第4主成分称为配变供电质量成分。这样,对各个主成分指标值偏大的配变运行状况非常清晰,为采取相应的措施提供了科学依据。

表4 配电变压器按前4个主成分和综合指标的排序结果

Tab.4 Collating result ordered by the first 4 principal components and the comprehensive index

配变名称	第1主成分排序	第2主成分排序	第3主成分排序	第4主成分排序	综合指标排序
许家巷10幢	-2.809	-1.571	2.205	-0.609	-1.086
清凉34幢	-1.034	-2.605	4.341	-2.084	-0.996
清潭三村	-0.545	1.895	-2.77	0.159	-0.27
太雷故居	-0.034	-0.887	1.805	0.888	-0.124
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
劳动南20幢	0.249	1.906	3.848	0.702	1.067
劳动南37幢	0.817	-3.836	1.234	-0.638	-0.354
建筑学院	1.288	-0.345	-2.051	-2.4	1.354
浦北19幢	1.903	0.095	-0.329	-3.535	1.512

另外还可以得到各台配变在新的主成分变量下的综合指标,如表4中“综合指标排序”列直观的显示出各台配变的综合指标值和排序结果。其中许家巷10幢配变的综合指标值最小,即表明此台配变的运行最优。而浦北19幢配变的综合指标值最大,即表明此台配变的运行最差。在对配变进行更换或维护管理时就可以重点关注这些综合指标值偏大的变压器。

4 结论

本文在大量配变监测的历史数据信息基础上,计算出表征配变优劣运行的多项运行参数。通过实例可以看出,改进PCA法能够在保留运行参数数据主要信息的前提下,去除数据间的相关性,降低数据维数,将提取出的主成分作为评价配变运行的优劣状况的主要依据,为配变运行、维护、管理和状态监测与诊断提供科学、有效的依据和适用的评价指标体系。该方法已经作为配电自动化系统的高级应用子模块得到了现场的验证。

随着供电企业数据中心的逐步完善,配电变压器的采集数据的可用性增强,对于其运行维护的决策需要科学的评价依据,通过对配电变压器的诸多评价指标进行的主成分分析可以为决策提供一个便捷的实用工具。

参考文献

[1] 李涛,徐建政,杜晓平.基于GPRS无线通信的配变监测系统的设

- 计与实现[J].继电器,2004,32(24):37-40.
- LI Tao, XU Jian-zheng, DU Xiao-ping. Design and Application of GPRS Technology in Monitoring System of Distribution Transformer[J]. Relay, 2004, 32(24): 37-40.
- [2] JIANG Hui-yuan. Application of Principal Component Analysis in Synthetic Appraisal for Multi-objects Decision-making[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2004, 3(6): 467-470.
- [3] 柳进,唐降龙.基于主成分分析L-M神经网络高峰负荷预测研究[J].继电器,2004,32(13):24-27.
- LIU Jin, TANG Jiang-long. Peak Load Forecasting Based on Neural Network with Principal Component Analysis[J]. Relay, 2004, 32(13): 24-27.
- [4] 于之虹,郭志忠.改进主成分分析法用于暂态稳定评估的输入特征选择[J].电力自动化设备,2003,23(8):17-20.
- YU Zhi-hong, GUO Zhi-zhong. Improved Principal Component Analysis to Feature Selection for Transient Stability Assessment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(8): 17-20.
- [5] 张承彪,罗运柏,文习山.主成分分析在变压器故障诊断中的应用研究[J].高电压技术,2005,(8):09-11.
- ZHANG Cheng-biao, LUO Yun-bai, WEN Xi-shan. Study on Fault Diagnosis of Transformer Based on Principal Component Analysis of Dissolved Gas[J]. High Voltage Engineering, 2005, (8): 09-11.
- [6] 杨体.配电变压器烧毁原因的分析[J].电力自动化设备,2002,22(2):83-84.
- YANG Ti. Cause Analysis of Distribution Transformer Burn-Out[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(2): 83-84.
- [7] 高惠璇.应用多元统计分析[M].北京:北京大学出版社,2005.265-292.
- GAO Hui-xuan, Applied Multivariate Statistical Analysis[M]. Beijing: Beijing University Press, 2005. 265-292.
- [8] 叶双峰.关于主成分分析做综合评价的改进[J].数理统计与管理,2001,20:52-55.
- YE Shuang-feng. The Application and Consideration about Principal Component Analysis[J]. Application of Statistics and Management, 2001, 20: 52-55.
- [9] 程其云,王有元,陈伟根.基于改进主成分分析的短期负荷预测方

法[J]. 电网技术, 2005, 29(02): 64-67 .
 CHENG Qi-yun, WANG You-yuan, CHEN Wei-gen. Modified Principal Component Analysis Based Short-term Load Forecasting[J]. Power System Technology, 2005, 29(02): 64-67 .

[10] 李征光, 邢亮. 配电变压器过负荷原因分析及对策[J]. 河北电力技术, 2004, (6): 4-5 .
 LI Zheng-guang, XING Liang . Cause Analysis and Countermeasures of Overload of Power Distribution Transformers[J]. Hebei Electric Power, 2004, (6): 4-5 .

[11] 杨云龙, 王凤清. 配电变压器三相不平衡运行带来的附加损耗、电压偏差及补偿方法[J]. 电网技术, 2004, 28(8): 73-76 .
 YANG Yun-long, WANG Feng-qing . Additional Loss and Voltage Deviation Caused by Unbalance Operation of Distribution Transformer and Countermeasures[J]. Power System Technology, 2004, 28(8): 73-76 .

[12] DL/T572-1995 电力变压器运行规程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000 .
 DL/T572-1995 Specification for Operation of Power Transformers[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2000 .

[13] GB/T15164-1994 油浸式电力变压器负载导则[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000 .
 GB/T15164-1994 Loading Guide for Oil-immersed Power Transformers

[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2000 .

[14] GB/T13462-1992 工矿企业电力变压器经济运行导则[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000 .
 GB/T15164-1992 Guides for the Power Transformers Energy Saving Operation in Factories [S] . Beijing:China Electric Power Press, 2000 .

[15] 胡景生, 胡国元, 裴铁成, 等. 变压器经济运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.266-313 .
 HU Jing-sheng, HU Guo-yuan, PEI Tie-cheng, et al.Operation of the Power Transformer[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.266-313 .

收稿日期: 2006-07-26; 修回日期: 2006-10-13

作者简介

李涛(1979-), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电自动化和配电管理系统; E-mail: litym@sjtu.edu.cn
 刘东(1968-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为配电自动化、调度自动化及计算机信息处理、分布式发电;
 王媚(1970-), 女, 工程师, 上海市电力公司市区供电公司科技主管。

(上接第 20 页 continued from page 20)

[3] LIU Xue-lian, LI Ji-wen, LI Hong-mei, et al . Fuzzy Modeling and Interior Point Algorithm of Multi-objective OPF with Voltage Security Margin[A]. 2005 IEEE/PES T&D Conference & Exhibition: Asia and Pacific. Dalian(China):2005.1-6.

[4] Rosehart W D, Canizares C A, Quintana V H. Multiobjective Optimal Power Flows to Evaluate Voltage Security Costs in Power Networks[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 578-587 .

[5] Torres G L, Quintana V H. On a Nonlinear Multi-centrality-corrections Interior-point Method for Optimal Power Flow[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(2): 222-228 .

[6] 刘明波, 杨勇. 计及静态电压稳定约束的无功优化规划[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(5): 21-25 .
 LIU Ming-bo, YANG Yong . Optimal Reactive Power Planning Incorporating Steady State Voltage Stability Constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(5): 21-25 .

[7] 刘雪连. 电力系统最优运行的电压安全成本研究(博士学位论文)[D]. 济南: 山东大学, 2006 .
 LIU Xue-lian . Research on Voltage Security Cost in Optimal Operation of Power System, Doctoral Dissertation[D]. Jinan: Shandong University, 2006 .

[8] 梁国坚, 梁冠安, 高明振. 电力系统无功功率的模糊优化控制[J]. 电网技术, 1997, 21(1): 42-44 .
 LIANG Guo-jian, LIANG Guan-an, GAO Ming-zhen . A New Method for Optimal Reactive Power Control Using Fuzzy Set Theory[J]. Power Systems Technology, 1997, 21(1): 42-44 .

[9] Zimmerman R D, Murillo-Sánchez C E, Gan D Q. Documentation for Matpower, Version 2[EB/OL]. <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/matpower.html>.

收稿日期: 2006-06-16; 修回日期: 2006-09-08

作者简介:

刘雪连(1979-), 女, 讲师, 博士, 研究方向为电力系统优化运行与控制; E-mail: jasmine.lxl@163.com.
 厉吉文(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统优化控制与无功补偿;
 段振刚(1958-), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为现代测控技术及应用。

(上接第 25 页 continued from page 25)

[14] 吴晓莉, 林哲辉. MATLAB 辅助模糊系统设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002 .
 WU Xiao-li, LIN Zhe-hui. Auxiliary System Design Based on MATLAB[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2002 .

[15] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996 .
 ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun. Advanced Electric Grid[M]. Beijing: Qinghua University Press, 1996 .

[16] 方鸽飞, 王惠祥, 黄晓烁. 改进遗传算法在无功优化中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(4): 17-20 .
 FANG Ge-fei, WANG Hui Xiang, HUANG Xiao-shuo. An Improved Genetic Algorithm for Reactive Power Optimization[J]. Proceedings of the

EPSS, 2003, 15(4): 17-20.

收稿日期: 2006-06-22; 修回日期: 2006-10-23

作者简介:

熊宁(1975-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与经济运行; E-mail: civilaviation@hotmail.com
 陈恩(1956-), 男, 教授, 研究方向为电力系统稳定与经济运行;
 戴伟华(1969-), 男, 副教授, 研究方向为电力与电子技术。