Fisher 判别分类法在光伏并网系统稳态电能质量评估中的应用

王继东，庞文杰

（天津大学 智能电网教育部重点实验室，天津 300072）

摘要：针对稳态电能质量综合评估的复杂性以及单项指标在反映电能质量综合水平的局限性，首次提出将 Fisher 判别分类法用于并网光伏稳态电能质量的评估，进而确定光伏并网可行性。根据已知的电能质量国家标准，通过构造样本来得到判别模型，然后利用回代估计法对模型进行检验，并对实际系统进行判别分析。实验结果表明所提方法所得误判率小，具有较强的判别能力。

关键词：电能质量；Fisher 判别分析；光伏系统；多指标；综合评估；稳态

中图分类号：TM 732；TM 615　　**文献标识码**：A　　DOI：10.16081/j.issn.1006-6047.2017.03.009

0 引言

随着我国经济的快速发展，国内对电力的需求逐步增大。为了解决日益严重的能源消耗问题，光伏、风电等分布式发电技术得到迅速发展并广泛接入电力系统中，目前已经取得了一些成果。但是这些新型发电系统并网后，会对当地电网造成一定的冲击和影响，这种影响可能会造成频率偏差、电压波动、电压闪变、谐波畸变等一系列问题[1-2]，从而引起电网电能质量下降。为了保证电网的安全可靠性，在分布式发电入网前需要进行电能质量分析，若不达标则需要配套相应的治理措施。准确而全面的电能质量综合评估对实现分布式电源并网具有重要的意义。

目前关于综合评估含分布式发电系统电能质量方面，已经提出的方法有突变决策法、概率评估法、数据包络分析法、加权秩和比法、改进层次分析法等[3-7]。评估过程中分级指标体系的建立[3]、隶属度函数的确定[4]受人为因素影响，可能造成评估结果不一致。网络分析法[5]不能得出电能质量等级结果。

在现有的电能质量评估方法基础上，本文从一种新的视角出发，首次提出了运用 Fisher 判别法来对电能质量进行评估。与现有的方法相比：该方法不需要确定电能质量各指标的权重，从而克服了权重确定过程中的主客观因素；所建立的基于多个电能质量指标的线性判别模型，回判估计的误判率很低，判别精度高，分类性能良好；同时能够结合我国国家标准给出研究对象电能质量所属等级。该方法可以为电能质量综合评估提供一种有效途径。

收稿日期：2016-03-23；**修回日期**：2016-12-22

基金项目：国家自然科学基金资助项目（51477111）；国家重点研发计划项目（2016YFB0901102）

Project supported by the National Natural Science Foundation of China（51477111）and the National Key Research and Development Program of China（2016YFB0901102）

1 Fisher 判别分析法原理

Fisher 判别分析方法的基本思想是投影，可以将高位数据点投影到低维空间中，从而克服由于维数较高而引起的“维数祸根”[8]。Fisher 判别分析法是根据类间距离最大、类内距离最小的原则来得到判别函数，然后利用判别函数判定待判样品所属类别。基本思想是从已知样本中筛选出能代表较多信息的变量，建立判别函数并给出待分类对象的类别特征[9-10]。

假设有 m 个已知类别的总体 G_1、G_2、…、G_m，从总体 G_i 中各抽取 n_i 个样本：

$$\boldsymbol{X}_{\alpha}^{(i)}=[x_{\alpha 1}^{(i)}\ \ x_{\alpha 2}^{(i)}\ \ \cdots\ \ x_{\alpha p}^{(i)}]^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{l}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}_{\alpha}^{(i)}=[l_1x_{\alpha 1}^{(i)}\ \ l_2x_{\alpha 2}^{(i)}\ \ \cdots\ \ l_px_{\alpha p}^{(i)}] \tag{2}$$

$\boldsymbol{l}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}_{\alpha}^{(i)}$ 为 $\boldsymbol{X}_{\alpha}^{(i)}$ 在轴上的投影。其中，$\alpha=1,2,\cdots,n_i$；$i=1,2,\cdots,m$；向量 $\boldsymbol{l}=[l_1\ \ l_2\ \ \cdots\ \ l_p]^{\mathrm{T}}$ 表示 p 维空间一个方向。

样本总数 n 满足：

$$n=\sum_{i=1}^{m}n_i \tag{3}$$

求取组内样本均值 $\overline{\boldsymbol{X}}^{(i)}$ 和总样本均值 $\overline{\boldsymbol{X}}$，并表示如下：

$$\overline{\boldsymbol{X}}^{(i)}=\frac{1}{n_i}\sum_{\alpha=1}^{n_i}\boldsymbol{X}_{\alpha}^{(i)} \tag{4}$$

$$\overline{\boldsymbol{X}}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{m}\sum_{\alpha=1}^{n_i}\boldsymbol{X}_{\alpha}^{(i)} \tag{5}$$

于是，可以求得组内离差：

$$\begin{aligned}e=&\sum_{i=1}^{m}\sum_{\alpha=1}^{n_i}(\boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}_{\alpha}^{(i)}-\boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}}\overline{\boldsymbol{X}}^{(i)})^2=\\&\sum_{i=1}^{m}\sum_{\alpha=1}^{n_i}\boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{X}_{\alpha}^{(i)}-\overline{\boldsymbol{X}}^{(i)})(\boldsymbol{X}_{\alpha}^{(i)}-\overline{\boldsymbol{X}}^{(i)})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\mu}=\\&\boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}}\left\{\sum_{i=1}^{m}\left[\sum_{\alpha=1}^{n_i}(\boldsymbol{X}_{\alpha}^{(i)}-\overline{\boldsymbol{X}}^{(i)})(\boldsymbol{X}_{\alpha}^{(i)}-\overline{\boldsymbol{X}}^{(i)})^{\mathrm{T}}\right]\right\}\boldsymbol{\mu}=\\&\boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}}\left(\sum_{i=1}^{m}\boldsymbol{S}_i\right)\boldsymbol{\mu}=\boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}\boldsymbol{\mu}\end{aligned} \tag{6}$$

组间离差为：

$$b=\sum_{i=1}^{m}\sum_{\alpha=1}^{n_i}(\boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}}\overline{\boldsymbol{X}}^{(i)}-\boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}}\overline{\boldsymbol{X}})^2=\sum_{i=1}^{m}n_i\boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}}(\overline{\boldsymbol{X}}^{(i)}-\overline{\boldsymbol{X}})(\overline{\boldsymbol{X}}^{(i)}-\overline{\boldsymbol{X}})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\mu}=\boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}}\left[n_i\sum_{i=1}^{m}(\overline{\boldsymbol{X}}^{(i)}-\overline{\boldsymbol{X}})(\overline{\boldsymbol{X}}^{(i)}-\overline{\boldsymbol{X}})^{\mathrm{T}}\right]\boldsymbol{\mu}=\boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{\mu} \tag{7}$$

为了使判别函数很好地区别不同总体的样本，需要满足不同总体的组间离差越大越好，组内离差越小越好。令：

$$\phi=\frac{b}{e}=\frac{\boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{\mu}}{\boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}\boldsymbol{\mu}} \tag{8}$$

利用拉格朗日乘数法，可以转化为：

$$(\boldsymbol{W}^{-1}\boldsymbol{B}-\lambda\boldsymbol{I})\boldsymbol{\mu}=0 \tag{9}$$

可以看出，λ 为 $\boldsymbol{W}^{-1}\boldsymbol{B}$ 的特征值，$\boldsymbol{\mu}$ 为所对应的特征向量，$\boldsymbol{I}$ 为组内离差平方和与组间离差平方和的比值。将得到的特征值 λ 按大小顺序排序为 $\lambda_1\geqslant\lambda_2\geqslant\cdots\geqslant\lambda_s$，其中 $s\leqslant p$，相应的特征向量为 $\boldsymbol{\mu}_1$、$\boldsymbol{\mu}_2$、…、$\boldsymbol{\mu}_s$。这样就可以得出 s 个判别函数，$y_j=\boldsymbol{\mu}_j^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}$，其中 $\boldsymbol{x}=[x_1\ x_2\ \cdots\ x_p]^{\mathrm{T}}$ 表示待评估对象，$j=1,2,\cdots,s$。取包含信息较多的前 M 个函数，即：

$$y_j=\boldsymbol{\mu}_j^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}=\mu_{1j}x_1+\mu_{2j}x_2+\cdots+\mu_{pj}x_p \tag{10}$$

$$\boldsymbol{\mu}_j=[\mu_{1j}\ \mu_{2j}\ \cdots\ \mu_{pj}]^{\mathrm{T}}\quad j=1,2,\cdots,M$$

根据上述 M 个判别函数，可对每个待判样品作出判别。

Fisher 判别分析的判别过程如下。

a. 将待判数据 $\boldsymbol{X}_\alpha=[x_{\alpha1}\ x_{\alpha2}\ \cdots\ x_{\alpha p}]^{\mathrm{T}}$ 代入每个判别函数，得到 M 个函数：

$$y_\alpha^{(j)}=\mu_{1j}x_{\alpha1}+\mu_{2j}x_{\alpha2}+\cdots+\mu_{pj}x_{\alpha p}\quad j=1,2,\cdots,M \tag{11}$$

b. 将每一类的均值样本 $\overline{\boldsymbol{X}}_i=[x_{i1}\ x_{i2}\ \cdots\ x_{ip}]^{\mathrm{T}}$ 代入判别函数，得：

$$y_i^{(j)}=\mu_{1j}x_{i1}+\mu_{2j}x_{i2}+\cdots+\mu_{pj}x_{ip}\quad j=1,2,\cdots,M;i=1,2,\cdots,m \tag{12}$$

c. 计算待判样本 $\boldsymbol{X}_\alpha$ 与均值样本的判别函数值之间的欧氏距离：

$$D_i^2=\sum_{j=1}^{M}(y_\alpha^{(j)}-y_i^{(j)})^2 \tag{13}$$

从这 m 个值中选出最小值，则待判数据就被划分为属于该等级。

为了考察上述判别准则是否实用，可以采用将训练样本回代的方法来计算误判率。将 G_1、G_2、…、G_m 的 n 个样本代入建立的判别函数，利用判别准则进行判别。统计误判个数 N，其在样本总数 n 中所占的比例称为误判率，表示如下：

$$\beta=\frac{N}{n} \tag{14}$$

2　Fisher 判别法在含光伏系统的稳态电能质量综合评估中的应用

2.1　电能质量综合评估体系

新型发电系统并网可能会造成频率、电压波动和闪变、谐波畸变等一系列问题，本文结合我国电能质量国家标准[11-15]，选取频率偏差指标、电压偏差指标、三相电压不平衡指标、电压波动指标、谐波畸变指标、电压闪变指标这 6 项作为稳态电能质量综合评估指标，建立的评估体系如图 1 所示。

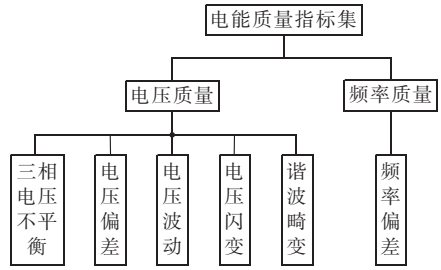

图 1　光伏系统稳态电能质量评估的指标体系

Fig.1 Index system of steady-state power quality evaluation for grid-connected photovoltaic system

根据我国国家标准，将电能质量等级划分为 5 个级别，分别为优质、良好、中等、合格以及不合格，对应地记为 Q_1、Q_2、Q_3、Q_4、Q_5。这既避免了因分级太少而导致计算过程中偏差过大，从而影响计算结果的准确性；又避免了分级过多而造成的计算量过大。划分结果如表 1 所示[16]，其中 x_1 代表频率偏差，x_2 代表电压总谐波畸变率，x_3 代表电压波动（随机不规则电压波动），x_4 代表长时间闪变值，x_5 代表电压偏差，x_6 代表电压三相不平衡度。

2.2　Fisher 判别法样本的获取

根据电能质量的标准，各类电能质量的指标均有上、下限值。当样本中各项电能指标都落在某类

表 1　电能质量等级极限值

Table 1 Limits of power quality grades

级别	x_1/Hz	x_2/%	x_3/%	x_4	x_5/%	x_6/%
Q_1	[0,0.05]	[0,0.10]	[0,0.05]	[0,0.20]	[0,1.50]	[0,0.50]
Q_2	(0.05,0.10]	(0.10,0.20]	(0.05,0.10]	(0.20,0.50]	(1.50,3.00]	(0.50,1.00]
Q_3	(0.10,0.15]	(0.20,0.30]	(0.10,0.20]	(0.50,0.80]	(3.00,4.50]	(1.00,1.50]
Q_4	(0.15,0.20]	(0.30,0.50]	(0.20,0.30]	(0.80,1.00]	(4.50,7.00]	(1.50,2.00]
Q_5	(0.20,∞)	(0.50,∞)	(0.30,∞)	(1.00,∞)	(7.00,∞)	(2.00,∞)

电能质量所规定的范围内,则该样本属于相应级别。故只要对标准类别进行有限次插值(或者在相应指标范围内进行随机取值)就可以获得足够多的训练样本[17],本文通过将每个等级范围平均分为20份来得到判别样本。以 Q_1 级别为例,平均插值得到的样本如表2所示。

表2 插值法得到的 Q_1 样本

Table 2 Samples of Grade Q_1 by interpolation

x_1/Hz	x_2/%	x_3/%	x_4	x_5/%	x_6/%
0	0	0	0	0	0
0.00263	0.05263	0.02631	0.01053	0.07895	0.02631
0.00526	0.10526	0.05263	0.02105	0.15790	0.05263
0.00789	0.15790	0.07895	0.03158	0.23684	0.07895
0.01052	0.21052	0.10526	0.04211	0.31579	0.10526
0.01315	0.26316	0.13158	0.05263	0.39474	0.13158
0.01578	0.31579	0.15790	0.06316	0.47368	0.15790
0.01842	0.36842	0.18421	0.07368	0.55263	0.18421
0.02105	0.42105	0.21052	0.08421	0.63158	0.21053
0.02368	0.47368	0.23684	0.09474	0.71053	0.23684
0.02631	0.52632	0.26316	0.10526	0.78947	0.26316
0.02894	0.57895	0.28947	0.11579	0.86842	0.28947
0.03157	0.63158	0.31579	0.12632	0.94737	0.31579
0.03421	0.68421	0.34211	0.13684	1.02632	0.34211
0.03684	0.73684	0.36842	0.14737	1.10526	0.36842
0.03947	0.78947	0.39474	0.15790	1.18421	0.39474
0.04210	0.84211	0.42105	0.16842	1.26316	0.42105
0.04473	0.89474	0.44737	0.17895	1.34211	0.44737
0.04737	0.94737	0.47368	0.18947	1.42105	0.47368
0.05	1	0.5	0.2	1.5	0.5

2.3 Fisher判别法模型的建立

2.3.1 数据标准化

设被评估对象的6项电能质量指标经过 c 次测量,得到 $c\times6$ 个数据。其中每个数据用 $x_{ij}(1\leqslant i\leqslant c,1\leqslant j\leqslant6)$ 来表示。由于不同指标量纲不同,为了消除不同指标之间的影响,在评估前需要对数据进行标准化处理。对于数值越小越好的逆向指标,做如下标准化处理:

$$x'_{ij}=\frac{x_{ij}}{x_{ij\max}} \tag{15}$$

其中,x'_{ij} 为进行标准化后得到的数据;x_{ij} 为测量方案所得的第 i 组数据中第 j 个指标值;$x_{ij\max}$ 为第 j 个指标的最大值。

类似地,对于数值越大越好的正向指标,处理方法如下:

$$x'_{ij}=\frac{x_{ij\min}}{x_{ij}} \tag{16}$$

其中,$x_{ij\min}$ 为第 j 个指标的最小值。

2.3.2 建立判别模型

对 Q_1、Q_2、Q_3、Q_4 级别内划分得到的80个数据样本进行标准化处理,根据判别方法并结合SPSS(Statistical Product and Service Solutions)软件,得到如表3所示的典则判别函数系数。

表3 典则判别函数系数

Table 3 Coefficients of canonical discriminant functions

对象	系数		
	函数1	函数2	函数3
x_1	−118.089	−96.062	−4.144
x_2	61.002	−66.892	43.660
x_3	−87.632	89.462	−26.543
x_4	157.729	−110.551	−8.835
常数	−9.824	−1.542	−0.954

整理为:

$$y_1=-118.089x_1+61.002x_2-87.632x_3+157.729x_4-9.824 \tag{17}$$

$$y_2=-96.062x_1-66.892x_2+89.462x_3-110.551x_4-1.542 \tag{18}$$

$$y_3=-4.144x_1+43.660x_2-26.543x_3-8.835x_4-0.954 \tag{19}$$

Fisher判别分析中,判别方程的解释量可以用其方差所占的比例来解释。结合表3和表4,可以看出,判别函数1的方差贡献率为70.8%,判别函数2的方差贡献率为28.2%,联合运用这2个函数进行判别时,判别结果的准确率可以达到99%,几乎可以解释所有样本的信息。本文采用前2个判别函数即可。

表4 特征值和贡献率

Table 4 Eigenvalues and contribution rates

函数	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	36.197	70.8	70.8
2	14.429	28.2	28.2
3	0.526	1	100

将各类的均值向量代入式(17)、(18),得到的函数值为2个典则判别函数在各类别的中心值,如表5所示。

表5 判别函数中心值

Table 5 Medians of canonical discriminant functions

级别	中心值		级别	中心值	
	函数1	函数2		函数1	函数2
Q_1	−10.015	0.177	Q_3	4.869	−0.794
Q_2	2.184	−4.886	Q_4	2.963	5.504

将插值法得到的所有样本利用回判估计法代入建立好的模型进行检验,经检验该模型的判断正确率达到97.5%。只有第41、42组(原本属于 Q_3 级别)在归类时被划分到 Q_2 级别,与规定级别不符。这是因为这2个误判样本位于 Q_2 和 Q_3 的交界处,比较容易发生误判。

2.4 实验研究

利用本文所提的方法对光伏并网系统的稳态电能质量进行综合评估。采用Fluke 435Ⅱ型电能质量分析仪为测量设备,对天津大学动模实验室光伏并网耦合点的电能质量进行观测并记录,以探究光伏

并网系统的电能质量等级，确定光伏并网可行性，加强对电能质量治理工作的指导。该测量实验持续 2 周，以 24 h 所得数据为一组，每 3 s 进行数据监测并记录。对于得到的大量数据，采用科学的统计方法，以 10 min 为时间单元，求取 1 d 内所测数据的 95% 概率大值作为数据典型值，最终形成的各指标代表性数据如表 6 所示。

表 6 测量指标数据的偏差值

Table 6 Deviations of measured data

天数	偏差值					
	x_1/Hz	x_2/%	x_3/%	x_4	x_5/%	x_6/%
第 1 天	0.021	1.640	0.207	0.498	9.600	0.406
第 2 天	0.013	1.580	0.183	0.741	9.800	0.297
第 3 天	0.017	1.640	0.196	0.512	9.600	0.302
第 4 天	0.015	1.610	0.199	0.525	10.600	0.377
第 5 天	0.011	1.330	0.193	0.523	10.800	0.313
第 6 天	0.014	1.650	0.192	0.293	8.300	0.364
第 7 天	0.014	1.770	0.132	0.204	8.100	0.403

为得出该并网光伏系统所属的电能质量等级，同样利用 2.3.1 节的方法对表 6 的测量数据进行标准化，然后进行判别。将处理后的数据代入式(17)和式(18)，则判别函数计算值如表 7 所示。然后根据判别原理，求取判别函数计算值与判别函数 1 和判别函数 2 中心的欧氏距离，选取距离最小的一组并将该组数据划分到该组里面。结果如表 8 所示。

表 7 待判数据的判别函数计算值

Table 7 Calculative values of canonical discriminant functions

天数	判别函数计算值		天数	判别函数计算值	
	函数 1	函数 2		函数 1	函数 2
第 1 天	70.2877	−62.2776	第 5 天	76.7652	−66.1176
第 2 天	113.3085	−92.8970	第 6 天	42.6466	−43.5579
第 3 天	75.1820	−66.0775	第 7 天	31.8254	−37.1135
第 4 天	79.7310	−69.4254			

表 8 判别分析结果

Table 8 Results of discriminant analysis

天数	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
第 1 天	101.7305	89.0613	89.7766	95.5351
第 2 天	154.5039	141.7554	142.2747	147.8475
第 3 天	107.9268	95.2529	95.9471	101.6833
第 4 天	113.5731	100.8904	101.5608	107.2741
第 5 天	109.2052	96.4970	97.1403	102.8417
第 6 天	68.4543	55.9709	57.0605	63.1020
第 7 天	56.0464	43.7861	45.2300	51.4712

通过表 8 可看出，在运用本文所建立的 Fisher 判别模型对该光伏并网系统进行判别后，第 1 天到第 7 天所测量数据都与 Q_2 级别的距离最为接近。由 Fisher 判别理论，可以得出该光伏系统属于第 2 等级的结论，符合我国国家光伏并网要求，对当地电网电能质量的影响不大。这与文献[14]应用改进主成分法得出的结论是一致的，表明应用该方法评估光伏并网系统稳态电能质量是有效的。

3 结论

本文所提出的 Fisher 判别分析法基于数学理论，可以有效提高判别精度，同时得出以下结论：

a. 本文首次将 Fisher 判别分析理论应用于光伏并网系统的稳态电能质量综合评估中，该评价方法客观合理，适用于电能质量的综合评估；

b. 文中的学习样本采用线性插值的方法创建，每一等级状态有 20 个学习样本参与构造判别模型，具有较高的准确率；

c. 该方法不需要考虑不同指标之间的权重问题，从而避免了确定指标权重时由于方法选取不同而造成的评估结果差异；

d. 实际算例表明，利用所建立的模型对光伏并网系统稳态电能质量评估是合理可行的；

e. 不同应用场合下可以选取任意多的电能质量评估指标进行学习和模型建立，故该方法应用性广泛，适用性强，具有一定的推广价值。

参考文献：

[1] SAL ARVAND A，MIRZAEIAN B，MOALLEM M. Obtaining a quantitative index for power quality evaluation in competitive electricity market[J]. IET Generation，Transmission and Distribution，2010，4(7)：810-823.

[2] MAMO X，JAVERZAC J. Power quality indicators[C]//2001 IEEE Porto Power Technology Proceedings. Porto，Portugal：IEEE，2001：1-4.

[3] 曾正，杨欢，赵荣祥. 基于突变决策的分布式发电系统电能质量综合评估[J]. 电力系统自动化，2011，35(21)：52-57.
ZENG Zheng，YANG Huan，ZHAO Rongxiang. A catastrophe decision theory based power quality comprehensive evaluation method for distributed generation system[J]. Automation of Electric Power Systems，2011，35(21)：52-57.

[4] 杨家豪，欧阳森，石怡理，等. 一种组合隶属度函数及其在电能质量模糊评价中的应用[J]. 电工电能新技术，2014，33(2)：63-69.
YANG Jiahao，OUYANG Sen，SHI Yili，et al. Combined menbership function and its application on fuzzy evaluation of power quality[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy，2014，33(2)：63-69.

[5] 付学谦，陈皓勇，刘国特，等. 分布式电源电能质量综合评估方法[J]. 中国电机工程学报，2014，34(25)：4270-4276.
FU Xueqian，CHEN Haoyong，LIU Guote，et al. Power quality comprehensive evaluation method for distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE，2014，34(25)：4270-4276.

[6] 付学谦，陈皓勇. 基于加权秩和比法的电能质量综合评估[J]. 电力自动化设备，2015，35(1)：128-132.
FU Xueqian，CHEN Haoyong. Comprehensive power quality evaluation based on weighted rank sum ration method[J]. Electric Power Automation Equipment，2015，35(1)：128-132.

[7] 刘自发，韦涛，李梦渔，等. 基于改进层次分析法的交、直流微电网综合评估[J]. 电力自动化设备，2016，36(3)：60-66.

LIU Zifa,WEI Tao,LI Mengyu,et al. Comprehensive evaluation based on improved analysis hierarchy process for AC/DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(3):60-66.

[8] 陈红江,李夕兵,刘爱华,等. 用Fisher判别法确定矿井突水水源[J]. 中南大学学报(自然科学版),2009,40(4):1114-1120.
CHEN Hongjiang,LI Xibing,LIU Aihua,et al. Identifying of mine water inrush sources by Fisher discriminant analysis method[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2009,40(4):1114-1120.

[9] JIANG Benben,ZHU Xiaoxiang,HUANG Dexian,et al. A combined Canonical Variate Analysis and Fisher Discriminant Analysis (CVA-FDA) approach for fault diagnosis[J]. Computer and Chemical Engineering,2015,77:1-9.

[10] WANG Haixian,LU Xuesong,HU Zilan,et al. Fisher discriminant analysis with L1-Norm[J]. IEEE Transactions on Cybernetics,2014,44(6):828-842.

[11] 中华国家标准化管理委员会. 电能质量-供电电压偏差:GB/T 12325—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

[12] 中华国家标准化管理委员会. 电能质量-电力系统频率偏差:GB/T 15945—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

[13] 中华国家标准化管理委员会. 电能质量-三相电压不平衡:GB/T 15543—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

[14] 中华国家标准化管理委员会. 电能质量-公用电网谐波:GB/T 14549—1993[S]. 北京:中国标准出版社,1993.

[15] 中华国家标准化管理委员会. 电能质量-电压波动和闪变:GB/T 12326—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

[16] WANG Jidong,WANG Lipeng,PANG Xipin. Steady state power quality evaluation of grid-connected photovoltaic system based on improved principal component analysis method[J]. Recent Patents on Electrical and Electronic Engineering,2013,6(3):217-223.

[17] 周林,栗秋华,刘华勇,等. 用模糊神经网络模型评估电能质量[J]. 高电压技术,2007,33(9):66-69.
ZHOU Lin,LI Qiuhua,LIU Huayong,et al. Evaluation of power quality by fuzzy artificial neutral network[J]. High Voltage Engineering,2007,33(9):66-69.

作者简介:

王继东

王继东(1977—),男,山东邹城人,副教授,博士,从事电能质量、分布式发电和微电网、智能用电等方面的研究(**E-mail**:jidongwang@tju.edu.cn);

庞文杰(1991—),男,山西晋中人,硕士研究生,主要研究方向为电能质量(**E-mail**:pangwenjie@tju.edu.cn)。

Application of Fisher discriminant analysis in steady-state power quality evaluation of grid-connected photovoltaic system

WANG Jidong,PANG Wenjie

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education,Tianjin University,Tianjin 300072,China)

Abstract: Aiming at the complexity of steady-state power quality evaluation and the limitation of single comprehensive power quality index,Fisher discriminant analysis is proposed to evaluate the steady-state power quality of grid-connected photovoltaic system for checking its grid-connection feasibility. A discriminant model is established based on the samples constructed according to China's national standard of power quality,which is checked by the back-substitution estimation method and applied to a practical system. Experimental result shows that,the proposed method has small misjudgment rate and excellent discriminating performance.

Key words: power quality; Fisher discriminant analysis; photovoltaic system; multi-index; comprehensive evaluation; steady-state

(上接第49页 continued from page 49)

Cable conductor temperature calculation and emergency capability assessment for smart distribution network

GAO Shengyu[1],LI Chaoqun[2],WANG Chunning[1],XU Honghua[1],MA Hongzhong[2]

(1. State Grid Nanjing Power Supply Company,Nanjing 210019,China;
2. College of Energy and Electrical Engineering,Hohai University,Nanjing 211100,China)

Abstract: Based on the transient thermal circuit model of power cable and by the dispersed processing of continuous system,a real-time method is proposed to calculate the power cable conductor temperature according to its load current and outside surface temperature. A dynamic ampacity assessment method is also given,which divide the transient temperature rise caused by the step current into the steady state component and four transient components with different time constants. Data fitting is applied to obtain the parameters of transient components and a step temperature rise expression is thus achieved,based on which, the emergency capability of power cable line can be assessed,i.e. the time required to reach the stable limit of temperature rise under different conditions. The feasibility and accuracy of the proposed methods are verified by experiments,and simple quantitative analysis and error analysis are also carried out.

Key words: smart distribution system; electric cables; conductor temperature; real-time calculation; transient temperature rise; data fitting