

基于ARMA模型的GIS局部放电发展趋势预测

何金¹, 徐轩², 曹梦¹, 满玉岩¹, 陈荣¹, 张春晖¹,
王檬², 王靖瑞³

(1. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300041; 2. 国网天津市电力培训中心, 天津 300181; 3. 华北电力大学
电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)设备局部放电存在安全隐患, 不容忽视。文中采用特高频法研究GIS中典型局部放电过程, 建立局部放电缺陷模型, 进行大量试验获得数据。提取数据得到局部放电特征量, 并采用局部放电特征谱图研究局部放电的特征。对特征量进行筛选、分类, 选取不同类型特征量代入自回归移动平均模型中对GIS局部放电发展趋势的预测情况进行分析研究。结果表明:①对于局部放电线性参量, ARMA预测模型可以对其发展趋势进行准确预测, 整体预测误差值均在10%以下;②对于局部放电阶跃参量, ARMA预测模型可以对其发展趋势进行预测, 但难以较为精确地预测其具体数值;③对于局部放电非线性参量, ARMA预测模型难以对其发展趋势进行预测, 但所预测参量的极值和峰值有一定的参考价值。

关键词: 局部放电; 特征谱图; ARMA模型; 发展趋势预测

Prediction of GIS Partial Discharge Development Trend Based on ARMA Model

HE Jin¹, XU Xuan², CAO Meng¹, MAN Yuyan¹, CHEN Rong¹, ZHANG Chunhui¹,
WANG Meng², WANG Jingrui³

(1. Research Institute of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300041, China; 2. Electric Power Training Center of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300181, China; 3. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The partial discharge of GIS equipment has potential safety hazard, which can not be ignored. The UHF method is used to study the typical partial discharge process in GIS, and some partial discharge defect models are established to conduct a large number of experiments. The characteristic parameters of partial discharge are obtained via the experimental data, and the characteristics of partial discharge are studied by using the characteristic spectrum of partial discharge. The characteristic quantities are selected and classified, and different types of characteristic quantities are chosen to be substituted into the auto-regressive and moving average (ARMA) model to analyze the development trend prediction of partial discharge in GIS. The results show that: 1) for the linear parameters of partial discharge, the ARMA model can accurately predict partial discharge development trend, and the overall prediction error is less than 10%; 2) for the step parameters of partial discharge, the ARMA model can predict partial discharge development trend, but is difficult to give accurate prediction; and 3) for the non-linear parameters of partial discharge, the ARMA model cannot predict partial discharge development trend, but can give extremes and peaks of the parameters for reference.

Key words: partial discharge; characteristic spectrum; ARMA model; development trend prediction

收稿日期:2020-03-09; 修回日期:2020-05-21

基金项目:国家电网公司科技项目资助(SGTJPX00PGJS1800052)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(SGTJPX00PGJS1800052).

0 引言

六氟化硫气体绝缘组合电器(GIS)具有绝缘性能好、占地空间小、运行安全可靠、安装和维修方便等优点,在电力系统中得到广泛应用^[1-2]。

中国统计数据显示,GIS故障中绝缘故障占比达到38.1%。绝缘故障的主要表现形式有:金属异物放电,绝缘内部气隙,尖端放电,绝缘子部件由于受潮或脏污导致内部放电或沿面闪络等^[3-6]。国内外研究表明,局部放电特高频法对GIS内局部放电的检测十分灵敏^[7-9]。GIS设备现场实际运行中会面对很多干扰,GIS放电缺陷从局部放电逐渐发展到绝缘闪络击穿是一个影响因素众多的过程^[10-12]。通过状态监测数据准确把握局部放电发展的过程并对发展趋势进行预测,从而提高状态检修的高效性和实时性,是目前GIS设备故障研究亟待解决的难题^[13-15]。

文中搭建GIS局部放电典型缺陷模型,采用特高频法建立局部放电演化过程的数据库。结合局部放电相位统计谱图PRPD和局部放电脉冲序列分布谱图PRPS对特征量进行筛选分类,并引入ARMA模型^[16-18],对GIS中绝缘缺陷导致的局部放电演化情况进行短期预测。比较了不同类型特征量对GIS局部放电短期发展趋势的预测情况,结果显示采用具有线性性质的特征量进行短期预测具有最高的准确率。

1 建立GIS局部放电数据库

为了研究GIS局部放电过程,首先需要搭建缺陷模型。悬浮放电模型见图1,正常情况下GIS中屏蔽电极和母线良好接触,当两者接触不良时会形成悬浮电位。绝缘子金属异物模型见图2,将金属微粒放置于外壳与盆式绝缘子交界处进行模拟。绝缘子沿面放电模型见图3,采用5 cm长金属丝附着在盆式绝缘子上进行模拟。



图1 悬浮放电模型
Fig. 1 Floating discharge model

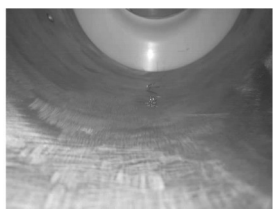


图2 绝缘子金属异物模型
Fig. 2 Insulator metal particle model

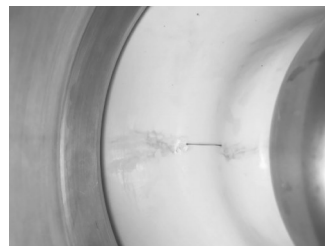
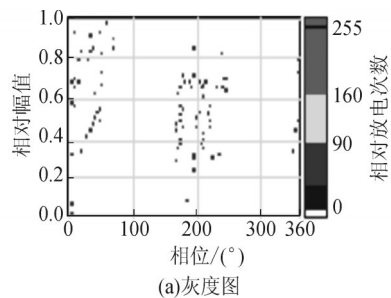


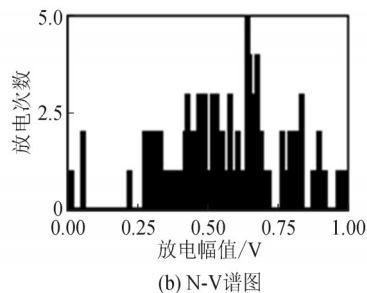
图3 绝缘子沿面放电模型

Fig. 3 Insulation surface discharge model

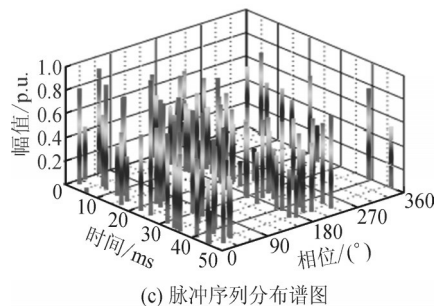
施加电压至出现较稳定的局部放电信号后开始记录,每次升压后稳定1 h,其中悬浮放电试验步长为5 kV,绝缘子金属异物试验步长为7.5 kV,绝缘子沿面放电试验步长为10 kV。文中通过特高频法研究上述3种缺陷的局部放电发展过程,从处理后的试验数据中提取不同放电类型的特征量,并制成相关统计谱图。针对前面提出的3种GIS局部放电缺陷,每种缺陷的相关谱图见图4-6。



(a) 灰度图



(b) N-V谱图



(c) 脉冲序列分布谱图

图4 悬浮类放电谱图

Fig. 4 Spectrogram of floating discharge

利用局部放电短时间内放电状态比较稳定的特点,结合局部放电的特征量信息,可以对GIS内局部放电情况进行短时预测。对上述缺陷的特征量提取结果表明,悬浮放电模型每分钟平均放电次数是线性变化的特征参量;对绝缘子上存在金属异物的局部放电数据分析发现,放电归一化幅值是阶跃

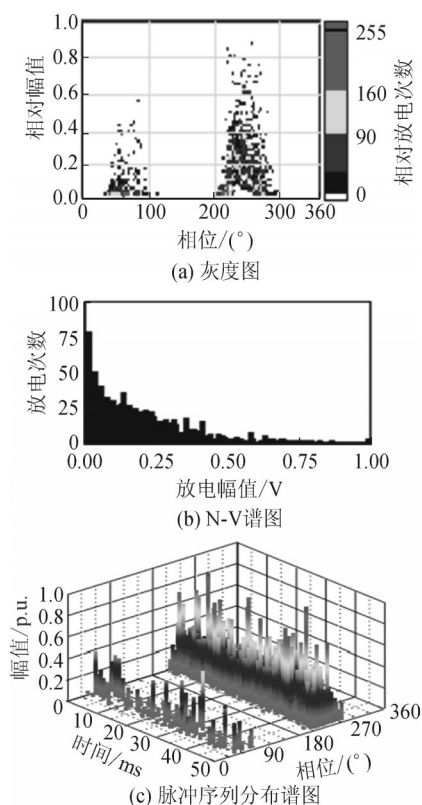


图5 绝缘子金属异物放电谱图

Fig. 5 Spectrogram of insulator metal particle discharge

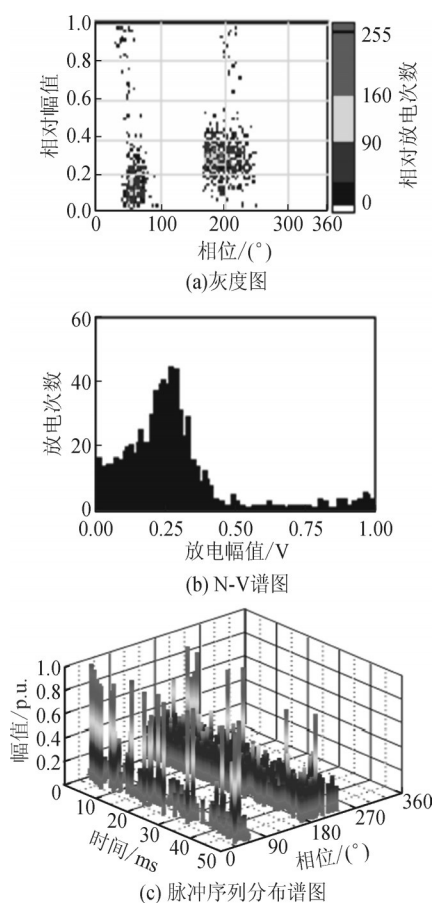


图6 绝缘子沿面放电谱图

Fig. 6 Spectrogram of insulation surface discharge

变化的特征参量;对绝缘子沿面放电数据分析发现,放电幅值信息熵是非线性变化的特征参量。分别以线性、阶跃和非线性特征量对局部放电短期发展趋势进行预测,比较它们对局部放电趋势的预测准确率情况。

2 ARMA模型与建模方法

2.1 ARMA模型

自回归滑动平均模型(auto-regressive and moving average model, ARMA模型)是一类常用的随机时间序列模型,ARMA模型中当前观察值与前面观察值和进入系统的扰动有关。

ARMA模型的数学式为

$$y_t = \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \cdots + \phi_p y_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \cdots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (1)$$

式(1)中: y_t 为平稳时间序列; q 为模型的阶数; θ_j ($j=1, 2, \dots, q$) 为模型的待定系数; ε_t 为误差。

找到最优预测模型并代入相关特征量,可以对局部放电趋势进行短期预测。

2.2 ARMA建模

ARMA建模的基本步骤如下:

1)判断时间序列数据的平稳性。对非平稳的数据需要进行预处理,使数据平稳化。可以采用差分的方法进行处理,注意不要过度差分。可以使用自相关系数图检验数据是否平稳。

2)求出该序列ACF和PACF的值。

样本自相关系数(ACF)

$$\hat{\rho}_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2} \quad (2)$$

样本偏自相关系数(PACF)

$$\hat{\phi}_{kk} = \frac{\hat{D}_k}{\hat{D}} \quad (3)$$

式(3)中: $\hat{D} = \begin{bmatrix} 1 & \hat{\rho}_1 & \cdots & \hat{\rho}_{k-1} \\ \hat{\rho}_1 & 1 & \cdots & \hat{\rho}_{k-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{\rho}_{k-1} & \hat{\rho}_{k-2} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$;

$$\hat{D}_k = \begin{bmatrix} 1 & \hat{\rho}_1 & \cdots & \hat{\rho}_1 \\ \hat{\rho}_1 & 1 & \cdots & \hat{\rho}_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{\rho}_{k-1} & \hat{\rho}_{k-2} & \cdots & \hat{\rho}_k \end{bmatrix}。$$

3)通过序列相关系数的特点,结合AIC准则,对模型进行定阶。AIC准则指均衡地考虑模型的准确度和参数估计的准确度,寻求最优模型。

AIC准则可以表示为

$$AIC(p) = 2p - 2 \ln(L) \quad (4)$$

式(4)中: p 为参数数量; L 为似然函数。令 N 为观察数, σ_a^2 为残差平方和,则式(4)变为

$$AIC(p) = N \ln(\sigma_a^2/N) + 2p \quad (5)$$

最优的自回归模型阶数指的是使 $AIC(p)$ 取值最小时的 p 值。

4)估计模型中未知参数的值。

确定模型阶数后,找出样本的似然函数,并求使得该函数达到最大的参数值。记 $\tilde{x} = (x_1, \dots, x_n)'$, $\tilde{\beta} = (\phi_1, \dots, \phi_p, \theta_1, \dots, \theta_q)'$ 。

假设 $\tilde{x}$ 服从多元正态分布 $MVN(0, \Omega\sigma_e^2)$;则似然函数为

$$L(\tilde{\beta}; \tilde{x}) = (2\pi)^{-\frac{n}{2}} (\sigma_e^2)^{-\frac{n}{2}} |\Omega|^{-\frac{1}{2}} \exp\{-\tilde{x}'/(2\sigma_e^2)\} \quad (6)$$

对式(6)求最大值得 $\tilde{\beta}_{MLE}$ 。

5)检验模型的有效性。如果模型充分从数据中提取信息,残差为白噪声序列,则模型是有效的。如果拟合模型不满足条件,重新选择模型再拟合。

6)将相关数据代入并预测序列走势。

ARMA时序建模的流程见图7。

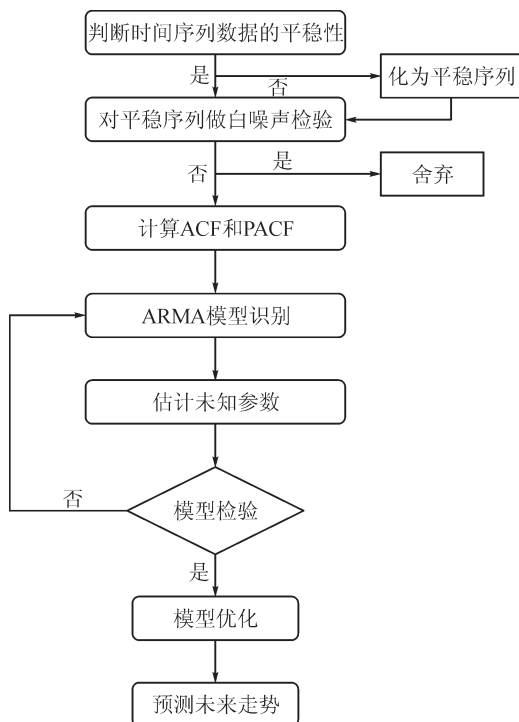


图7 ARMA建模流程

Fig. 7 ARMA modeling process

3 局部放电特征参量发展预测

3.1 局部放电线性特征参量发展趋势预测

由于悬浮放电模型每分钟平均放电次数是线性变化的特征参量,因此从局部放电数据库中选取悬浮放电模型的平均放电次数参量,其变化趋势见

图8。以0~200 min的试验数据建立 ARMA 预测模型,预测200~600 min的数据。将预测数据与试验数据进行对比,检验预测模型对线性特征参量预测的有效性和准确性。

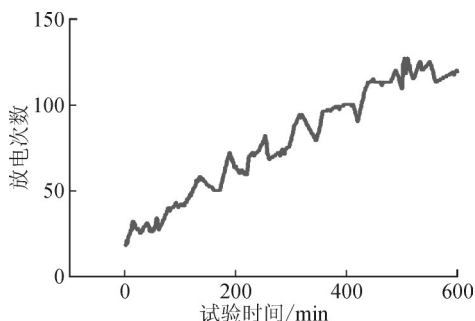


图8 悬浮放电模型每分钟平均放电次数变化曲线

Fig. 8 The change curve of floating discharge average discharge times

不同预测时间内的预测曲线见图9,在前50 min内预测值与实测值是基本一致的,后350 min预测值与实测值的之间的差值也较小。预测误差变化曲线见图10,从整体来看,除个别时间点外预测误差均在10%以内,且预测误差不随时间的增加而扩大。因此,ARMA预测模型可以对局部放电线性参量的变化状态进行预测,并得到较好效果。

3.2 局部放电阶跃特征量发展趋势预测

绝缘子金属异物放电归一化幅值为阶跃变化的特征参量,因此从局部放电数据库中选取绝缘子金属异物放电归一化幅值参量,其变化趋势见图11。以0~180 min的试验数据建立 ARMA 预测模型,预测180~270 min的数据。并将预测数据与试验数据进行对比,检验预测模型对阶跃特征参量的有效性和准确性。

不同预测时间内的预测曲线见图12,在前30 min内预测值与实测值是基本一致的,但在后续预测时间内预测误差逐渐变大,但变化的整体趋势与实测值相符。预测误差变化曲线见图13,从整体来看,发生阶跃变化前预测误差较小,发生阶跃变化后预测误差发生了显著变化,但保持在30%以内。因此,ARMA预测模型可以对局部放电阶跃参量变化状态进行预测,但难以对其进行准确的数值预测。

3.3 局部放电非线性特征量发展趋势预测

绝缘子沿面放电幅值信息熵为阶跃变化的特征参量,因此从局部放电数据库中选取绝缘子沿面放电幅值信息熵参量,其变化趋势见图14。以0~250 min的试验数据建立 ARMA 预测模型,预测250~330 min的数据。并将预测数据与试验数据进行对比,检验预测模型对非线性特征参量的有效性和准确性。

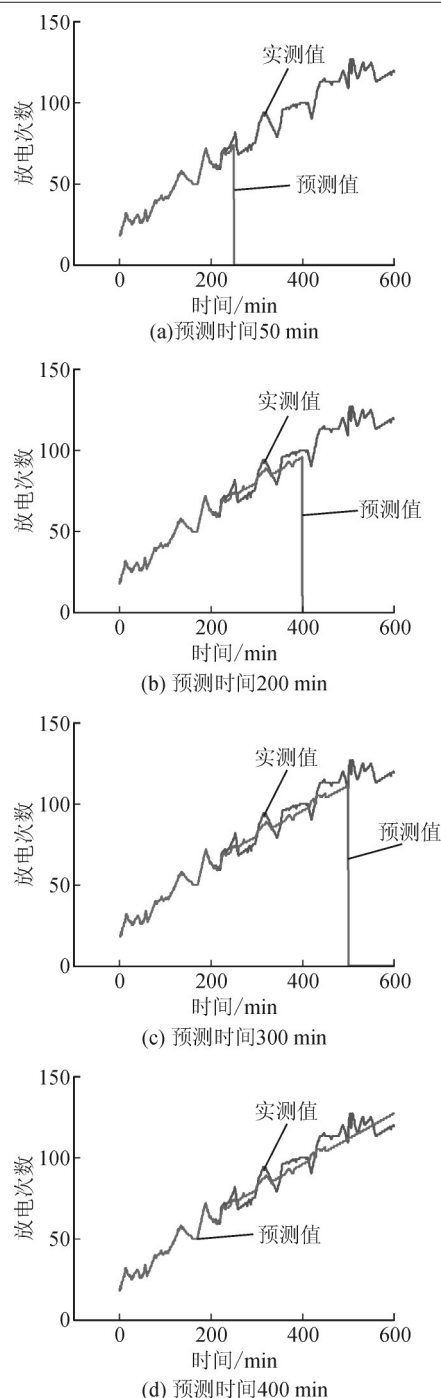


图9 不同预测时间内的预测曲线

Fig. 9 Predicted curves in different prediction time

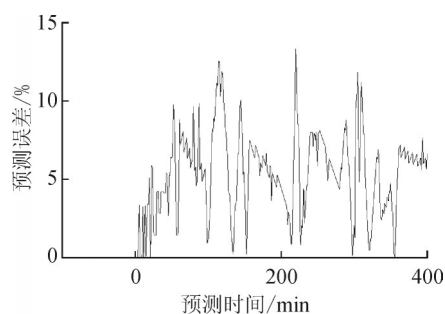


图10 预测误差变化曲线

Fig. 10 The changing curve of predicted error

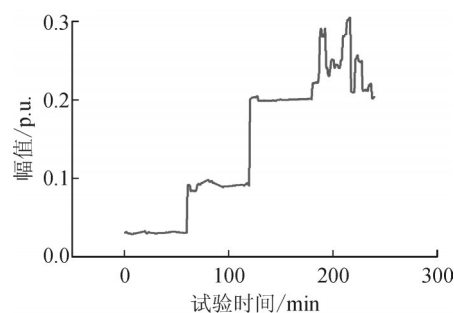


图11 绝缘子金属异物放电归一化幅值变化曲线

Fig. 11 The change curve of insulator metal particle discharge normalized amplitude

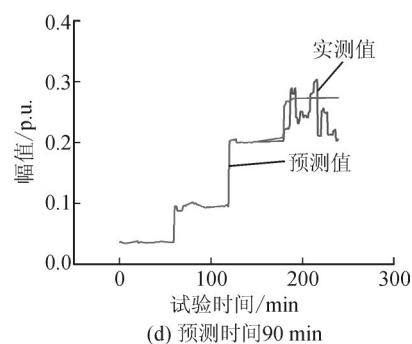
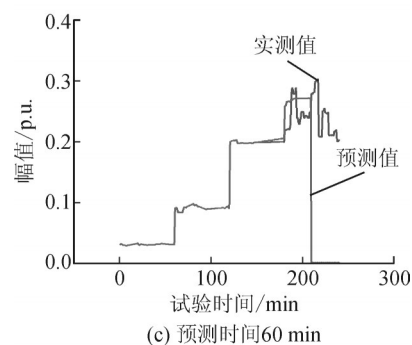
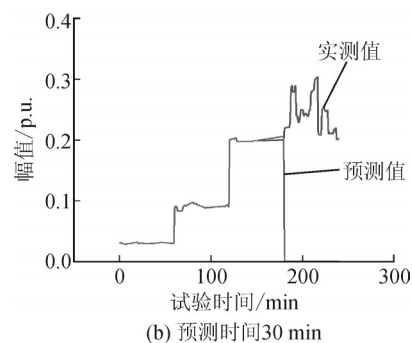
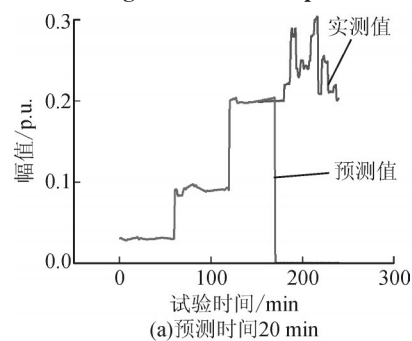


图12 不同预测时间内的预测曲线

Fig. 12 Predicted curves in different prediction time

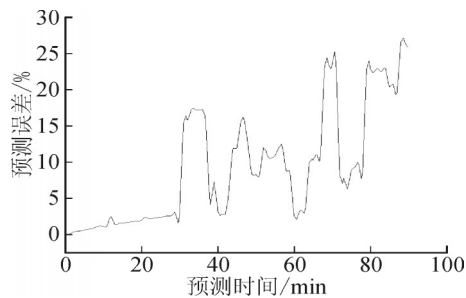


图 13 预测误差变化曲线

Fig. 13 The changing curve of predicted error

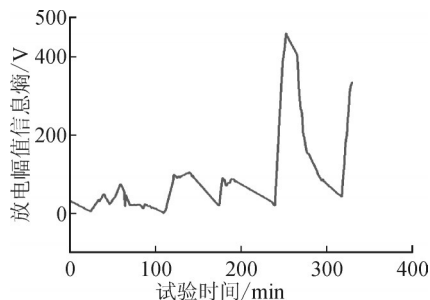


图 14 绝缘子沿面放电幅值信息熵变化曲线

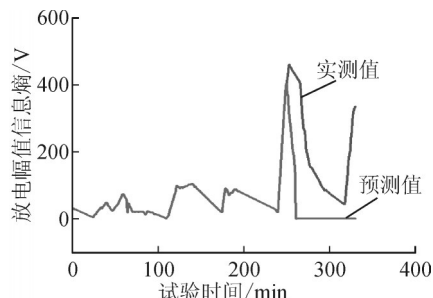
Fig. 14 The change curve of insulation surface discharge amplitude information entropy

不同预测时间内的预测曲线见图 15。从图 15 中可以看出,在预测时间内预测误差逐渐增大,误差显著,预测模型已经难以反映非线性变化参数的变化趋势,但预测模型中得到的参量极值与实测值相差不大。因此,ARMA 预测模型难以对局部放电非线性参数的变化状态进行预测,但其预测极值和峰值有一定的参考价值。

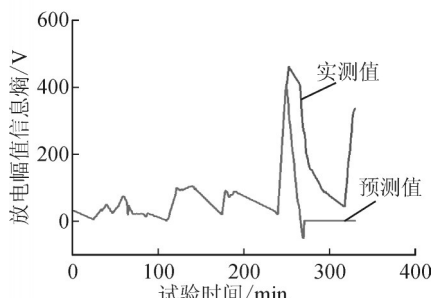
4 结论

1)GIS 设备的局部放电现象是十分危险的,文中通过特高频法进行大量局部放电试验,对数据提取特征量,并将特征量分为线性、阶跃变化和非线性。介绍 ARMA 模型搭建过程,对局部放电趋势短期预测。

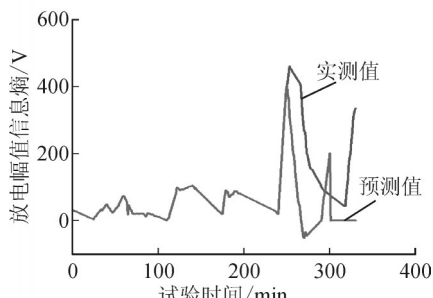
2)预测结果表明:对于局部放电线性参量,ARMA 预测模型可以对其发展趋势进行准确预测,得到较好效果,整体预测误差值均在 10%以下;对于局部放电阶跃参量,ARMA 预测模型可以对其发展趋势进行预测,但难以较为精确地预测其具体数值;对于局部放电非线性参量,ARMA 预测模型难以对其发展趋势进行预测,但所预测参量的极值和峰值有一定的参考价值。



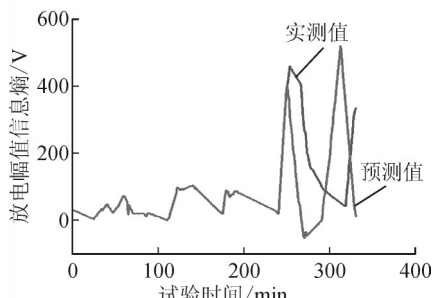
(a) 预测时间 20 min



(b) 预测时间 30 min



(c) 预测时间 60 min



(d) 预测时间 80 min

图 15 不同预测时间内的预测曲线

Fig. 15 Predicted curves in different prediction time

参考文献:

- [1] 李庆民,王 健,李伯涛,等. GIS/GIL 中金属微粒污染问题研究进展[J]. 高电压技术,2016,42(3):849-860.
LI Qingmin, WANG Jian, LI Botao, et al. Review on metal particle contamination in GIS/GIL[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 849-860.
- [2] 罗学琛. SF₆ 气体绝缘全封闭组合电器(GIS)[M]. 北京:中国电力出版社,1999.
LUO Xuechen. SF₆ gas insulated fully enclosed combined

- electric appliance(GIS)[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [3] GAO Wensheng, DING Dengwei, LIU Weidong. Research on the typical partial discharge using the UHF detection method for GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2621-2629.
- [4] GAO Wensheng, DING Dengwei, LIU Weidong, et al. Investigation of the evaluation of the PD severity and verification of the sensitivity of partial - discharge detection using the UHF method in GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 38-47.
- [5] UETA G, WADA J, OKABE S, et al. Insulation performance of three types of micro-defects in inner epoxy insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(3): 947-954.
- [6] QI Bo, LI Chengrong, XING Zhaoliang, et al. Partial discharge initiated by free moving metallic particles on GIS insulator surface: Severity diagnosis and assessment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(2): 766-774.
- [7] 丁登伟, 高文胜, 刘卫东. GIS局部放电特高频检测灵敏度的检验方案细化研究[J]. 高压电器, 2014, 50(8): 14-18. DING Dengwei, GAO Wensheng, LIU Weidong. Investigation of improvement of sensitivity verification of Partial discharge detection using UHF method in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(8): 14-18.
- [8] 丁登伟, 高文胜, 刘卫东. GIS中局部放电特高频信号与放电严重程度的关联分析[J]. 高压电器, 2014, 50(9): 6-11. DING Dengwei, GAO Wensheng, LIU Weidong. Investigation of correlation between UHF signal and PD severity in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(9): 6-11.
- [9] 雷汉坤, 贾志杰. 检测GIS固体绝缘内部放电缺陷的特高频和X射线数字成像联合方法研究[J]. 高压电器, 2017, 53(12): 253-257. LEI Hankun, JIA Zhijie. Combined ultra - high frequency and X - ray digital imaging method for detecting discharge defects in GIS solid insulation[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(12): 253-257.
- [10] 李兴旺, 刘 军, 刘梦娜. 一起气体绝缘金属封闭开关设备悬浮放电缺陷分析[J]. 高压电器, 2015, 51(10): 205- 208. LI Xingwang, LIU Jun, LIU Mengna. Analysis on a floating discharge defect in GIS disconnecting switch[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10): 205- 208.
- [11] 黄兴泉, 康书英, 李泓志, 等. GIS局部放电超高频电磁波的传播特性研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(10): 32-35. HUANG Xingquan, KANG Shuying, LI Hongzhi, et al. Simulation study on the characteristics of ultra-high frequency electromagnetic wave in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(10): 32-35.
- [12] 田 妍, 张锐健, 董志雯, 等. GIS局部放电缺陷定位分析[J]. 高压电器, 2017, 53(6): 182-185. TIAN Yan, ZHANG Ruijian, DONG Zhiwen, et al. Localization of partial discharge defects in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(6): 182-185.
- [13] 张晓星, 舒 娜, 徐晓刚, 等. 基于三维谱图混沌特征的GIS局部放电识别[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 249-254. ZHANG Xiaoxing, SHU Na, XU Xiaogang, et al. GIS partial discharge recognition based on chaos features of the three-dimensional spectra[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 249-254.
- [14] 司文荣, 李军浩, 黎大健, 等. 基于宽带检测的局放脉冲波形快速特征提取技术[J]. 电工电能新技术, 2008, 27(2): 21-25. SI Wenrong, LI Junhao, LI Dajian, et al. Fast feature extraction technique for PD pulse shape based on wideband detection[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2008, 27(2): 21-25.
- [15] 刘君华, 徐敏骅, 黄成军, 等. 局部放电电磁波在GIS中的衰减特性[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 52-58. LIU Junhua, XU Minhua, HUANG Chengjun, et al. Investigation on the attenuation characteristics of electromagnetic waves in GIS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 52-58.
- [16] 李 乐, 刘天琪, 王福军, 等. 一种风电功率简易预测模型[J]. 电测与仪表, 2016, 53(16): 35-38. LI Le, LIU Tianqi, WANG Fujun, et al. A simple model for wind power forecasting[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(16): 35-38.
- [17] 周洪煜, 赵 乾, 王照阳, 等. 风电机组输出功率超短期预测的组合模型研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(3): 457-461. ZHOU Hongyu, ZHAO Qian, WANG Zhaoyang, et al. Study on combined model of ultra-short term prediction of wind turbine output power[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2014, 35(3): 457-461.
- [18] 刘蓉晖, 赵才涛. 基于数据挖掘技术的气温敏感负荷短期预测研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(11): 32-38. LIU Ronghui, ZHAO Caitao. Study of the short-term forecasting of the temperature sensitive load based on data mining technology[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2017, 33(11): 32-38.
- 何 金(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事高电压与绝缘技术研究。
- 王靖瑞(1996—), 男, 博士研究生, 主要从事GIL设备气体放电理论及其应用技术研究工作(通讯作者)(E-mail: wang_jingrui@ncepu.edu.cn)。