

DOI:10.16356/j.1005-2615.2017.04.007

# 基于数据预测的静电除尘器闪络故障恢复策略

刘宇芳<sup>1</sup> 姜斌<sup>1</sup> 易辉<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016;

2. 南京工业大学电气工程与控制科学学院, 南京, 211816)

**摘要:** 静电除尘器除尘效率极大地取决于电场电压输出, 其控制关键在于电场发生闪络故障后的电压恢复策略。经典闪络故障恢复方法, 如三线法、二线法, 大多通过设定较长的低电压运行区间或设定输出电压上限实现电压输出控制, 前者平均电压输出过低, 而后者对电场特性的变换适应能力不足。为克服上述方法的不足, 本文提出一种基于支持向量回归数据预测的方法, 通过对临近故障电压的分析, 推测出当前电场可能的闪络故障电压, 并以此为基础, 对二线法进行改进。4 组不同工况的对比实验结果证明, 本文方法不仅保留了三线法的环境自动适应能力, 而且提高了系统的平均电压输出, 其优越性得到验证。

**关键词:** 数据预测; 故障恢复; 智能控制; 静电除尘器

中图分类号: TP181; TP277

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2017)04-0496-08

## Recovery Strategy for Flashover Fault of Electrostatic Precipitators Using Data Prediction

LIU Yufang<sup>1</sup>, JIANG Bin<sup>1</sup>, YI Hui<sup>2</sup>

(1. College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. College of Electronic Engineering and Control Science, Nanjing Tech University, Nanjing, 211816, China)

**Abstract:** The dust removing efficiency of electrostatic precipitators (ESPs) greatly depends on the voltage output of power supplies, and the fault recovery strategy when flashover fault happens plays an important role to ensure the efficiency. In classical recovery methods, such as three-line method and the two-line method, the output voltage of ESP power supplies has to operate in low value areas for a long time or to be given a limited up bond. Thus, the average output voltage is low. Moreover, for approach such as the two-line method, the adaptive capacity to environment is also poor when the electric field changes. For overcoming above deficiencies, this paper presents a new fault recovery strategy based on support vector regression (SVR). The strategy firstly predicts the voltage at which the soon-coming spark is likely to occur by analyzing near fault voltages. And then on this basis, it optimizes the process and parameters of two-line method to strengthen its adaptive capacity to environmental change and increase the average output voltage. Four groups of comparative experiments are made in the paper. Among all the experiments, the proposed strategy not only has the adaptability of the three-line method to the environmental change, but also yields a higher average output voltage than the traditional methods. Thus, the superiority of the proposed method is validated.

**Key words:** data prediction; fault recovery; intelligent control; electrostatic precipitators (ESPs)

**基金项目:** 国家自然科学基金(61401215, 61503181) 资助项目; 江苏省自然科学基金(BK20140953, BK20141416) 资助项目。

**收稿日期:** 2016-06-08; **修订日期:** 2017-05-09

**通信作者:** 姜斌, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: binjiang@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 刘宇芳, 姜斌, 易辉. 基于数据预测的静电除尘器闪络故障恢复策略[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(4): 496-503. LIU Yufang, JIANG Bin, YI Hui. Recovery strategy for flashover fault of electrostatic precipitators using data prediction[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(4): 496-503.

静电除尘器 (Electrostatic precipitators, ESPs) 常用于火电厂的烟气排放除尘, 是治理雾霾、净化空气的重要手段<sup>[1]</sup>。该装置通过高压电下气体的电场力和电晕放电现象将粉尘从废气中分离出来, 进而达到粉尘过滤的效果。

通常说来, 静电除尘器的除尘效率与其电场电压密切相关<sup>[2-3]</sup>, 电场电压值越高, 除尘效率也越高。然而, 当电压值过大时, 除尘器内部极板间的介质会被高电压击穿, 产生放电通道, 形成火花放电, 即发生闪络故障。该故障的发生不仅会极大降低设备的除尘效率, 浪费大量能源, 同时会对电气设备造成损坏。ESPs 的控制难点在于如何将电场电压控制在临界闪络电压附近<sup>[4]</sup>。静电除尘器通常采用最佳火花率法进行控制, 其思路是让电场在具有适当火花放电频率的条件下运行。电场稳定运行并偶尔发生闪络, 意味着电场电压必然处于介质击穿的临界点附近<sup>[5]</sup>。

采用该类方法进行电压控制, 电场中火花放电不可避免, 而对闪络故障的恢复策略, 将直接影响到除尘器除尘效率。当前除尘器闪络故障恢复策略主要有两种<sup>[5]</sup>: (1) 三线式恢复策略, 如阿尔斯通; (2) 二线式恢复策略, 如国电环保。前者在恢复过程中主要考虑如何减少闪络故障, 控制策略过于保守, 电场长时间处于没有必要的低电压区间。而后者则通过设定电压上限值实现对火花率的控制, 通过人工方式确定参数设置, 且对外部扰动变化不灵敏, 无法自适应电场特性。

本文在现有二线式恢复策略的基础上, 采用支持向量回归方法 (Support vector regression, SVR)<sup>[6]</sup> 设计一种具有短暂记忆能力的电压智能控制方法, 该方法通过对临近闪络故障的学习, 动态地给出电场电压的“安全域”, 并根据其区间范围, 设置闪络故障恢复时的关键参数。该方法不仅能够实时地更新参数设置, 确保电源稳定运行, 更能够提高电场的平均电压值, 实现增稳提效。

## 1 常见的闪络恢复策略

### 1.1 三线法

该方法将电压的恢复分为 3 个阶段, 如图 1 所示, 用 3 段不同斜率的折线描述 3 个阶段的电压提升方式。在 AB 阶段, 电压提升平缓, 且电压值较低, 该阶段的主要作用在于确保电场能够在较长时间 (9 s) 内无闪络故障, 确保电场中介质的有效恢复, 并降低火花率。在 BD 阶段使得电压恢复到闪络前电压值附近, 提高电场电压值。而在第 3 折线阶段, 电压快速提升, 用于寻求电场实际可承受电压的上限。其中,  $U_{\max}$  为电场高限,  $t_1$  为 AB 段耗

时,  $t_2$  为 BC 段耗时。若 CD 段不发生故障, 则系统在 CD 段继续工作  $t_2$  时间段后, 进入第 3 阶段。

采用该方法, 除尘器在大多数情况下不会发生闪络故障而稳定运行, 火花率可控制在 10 次/min 以内, 同时能够根据外界运行状况实现自我调节。但其控制策略过于保守, 实质在于通过设置长时间低电压的运行, 确保工作的稳定性。

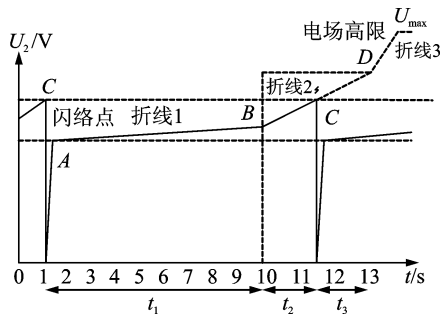


图 1 三线式故障电压恢复方式

Fig. 1 Voltage recovery strategy for flashover using three-line approach

### 1.2 二线法

二线式方法在 AB 阶段以较低速度提升电压值, 当达到 B 处电压设定值后, 以一个固定的速度快速提升电压值, 直至达到给定的电压输入上限值或发生闪络故障, 如图 2 所示。

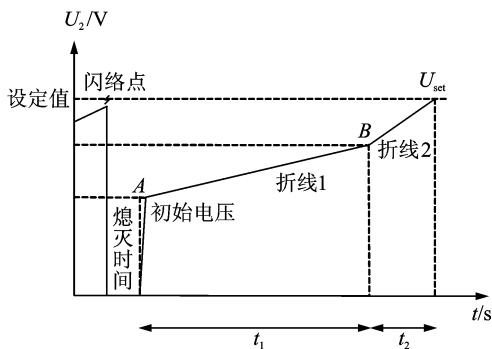


图 2 二线式故障电压恢复方式

Fig. 2 Voltage recover strategy for flashover using two-line approach

由图 2 可见 A 处电压取值一般取为前次闪络故障电压值的一半, B 的取值为前次闪络故障电压值的 70%。

二线法在电压提升速度上远超于三线法, 因此可获得更高的平均电场电压。而快速的电压提升必然带来火花故障发生的可能性。为使得总体火花发生概率可控, 该方法为电场设定了电压上限值  $U_{\text{set}}$ , 并通过电场上限值的设定来确保火花率在可承受范围之内。

二线法将电场控制极力简化, 仅需上限值  $U_{\text{set}}$  这 1 个参数即可实现火花率的控制。但该方法的

性能极大地取决于参数设置,而该参数的设置需要专业人士的现场调试。同时,二线法不具备现场的自我适应能力,当现场环境发生变化时,需人为调节电压上限值。

## 2 支持向量回归方法

支持向量回归是一种经典的函数拟合方法,该方法以统计学习理论为基础,对训练样本进行学习,拟合出给定样本满足的分布函数,如图3所示。

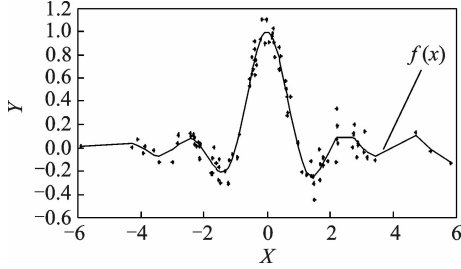


图3 支持向量回归示意图

Fig. 3 Illustration for support vector regression

给定一组训练样本  $\{(x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)\}$ , 该样本集包含正常运行条件下的  $N$  个样本数据, 其中  $x_i$  为系统的输入,  $y_i$  为输出。支持向量回归通过 Lagrangian 式拟合函数为

$$\begin{aligned} \min: L(\alpha) = & \frac{1}{2}(\omega, \omega) + C \sum_{i=1}^N (\xi_i + \xi_i^*) - \\ & \sum_{i=1}^N \alpha_i (y_i - (\omega, x_i) - b + \epsilon + \xi_i) - \\ & \sum_{i=1}^N \alpha_i^* (-y_i + (\omega, x_i) + b + \epsilon + \xi_i^*) - \\ & \sum_{i=1}^N (\beta_i \xi_i + \beta_i^* \xi_i^*) \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $\alpha_i, \beta_i \geq 0$  为拉格朗日乘子;  $C$  为风险函数的惩罚因子;  $\epsilon$  为不敏感系数;  $\xi_i$  为松弛因子;  $\omega$  为自变量权重系数;  $b$  为偏置量。通过特定算法,如 Active set 方法等<sup>[7]</sup>, 可对式(1)进行求解, 得到数据满足的分布函数  $f(x) = \omega \cdot x + b$ 。

同时, 为降低运算, 核函数方法被引入 SVR 求解过程<sup>[6]</sup>, 函数表达式最终可写为

$$f(x) = \sum_{i=1}^N (\alpha_i^* - \alpha_i) K(x_i, x) + b \quad (2)$$

式中  $K(\cdot)$  为算法所选核函数, 一般可采用 RBF 核, 如式(3)所示。

$$K(x_i, x) = \exp\left(-\frac{x - x_i^2}{\sigma^2}\right) \quad (3)$$

式中  $\sigma$  为该核函数的核宽参数。面对未知输入数据  $x_i$  时, 可将其代入式(2), 借助函数值  $f(x_i)$  预测其输出。工程中常采用该方法对历史数据进行分析, 以及对数据输出进行预测<sup>[8-14]</sup>。

## 3 基于 SVR 数据预测的故障电压恢复策略

本文在二线法的基础上提出一种具有短暂记忆与预测功能的新型闪络故障恢复策略, 如图4所示。该方法首先通过支持向量回归方法预测下次可能的故障闪络电压, 并将其设为电压恢复在第1阶段的终值  $y_{\text{上限}}$ ; 同时通过对历史数据的统计分析给出第一阶段的起始电压  $y_{\text{下限}}$ ; 该方法在第1阶段, 以耗时  $t_1$  为基准, 对电压进行缓慢提升。当到达  $y_{\text{上限}}$  后, 以双倍速度进行电压提升, 直至电场发生火花闪络。该方法较二线法而言, 最大的区别在于: (1) 第1阶段的起始电压与最终电压不再是固定值, 而是由算法计算给出; (2) 无需设定电压上限值  $U_{\text{set}}$ 。

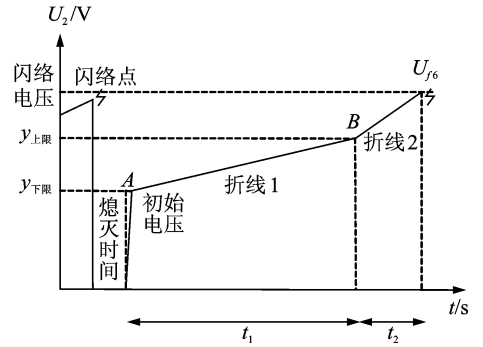


图4 基于 SVR 数据预测的故障电压恢复方式

Fig. 4 Voltage recover strategy for flashover using SVR-based approach

### 3.1 基于支持向量回归的故障恢复参数生成

本文所提故障恢复策略的核心是通过函数预测, 给出动态变化的参数值  $y_{\text{上限}}$  和  $y_{\text{下限}}$ 。其实现过程如下:

**步骤1 初始数据采集:** 设定  $t_1 = 1$  s, 系统采用二线法方式运行, 采集前5次的闪络故障电压, 生成故障电压样本集  $y_m = \{U_{f_1}, U_{f_2}, U_{f_3}, U_{f_4}, U_{f_5}\}$ 。

**步骤2 函数拟合:** 在电压提升时, 第一折线部分耗时固定为 1 s, 而第二折线部分耗时通常较小, 因此可近似认为  $y_m$  中各采样点间隔相等,  $y_m$  对应采样时间点  $T = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5\} = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ 。

采用支持向量回归方法拟合出电场故障电压与时间之间函数关系为

$$U'_f(t) = \sum_{i=1}^N (\alpha_i^* - \alpha_i) K(t_i, t) + b \quad (4)$$

式中:  $U'_f(t)$  为第  $t$  次故障的预测值;  $\alpha_i^*, \alpha_i$  与  $b$  可通过式(1, 2)进行求解。

**步骤 3**  $y_{\text{上限}}$  求解:令  $t=6$  代入函数,得到下次故障电压的预测值为

$$y_{\text{上限}} = U'_f(6) \quad (5)$$

**步骤 4**  $y_{\text{下限}}$  求解:通过对闪络故障数据的统计学分析,给出电场闪络故障电压的下限值  $y_{\text{下限}}$  为

$$\bar{U}_f = \frac{\sum_{i=1}^5 U_{f_i}(i)}{5} \quad (6)$$

$$s = 0.5 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (U_{f_i}(i) - \bar{U}_f)^2}{5}} \quad (7)$$

$$y_{\text{下限}} = \min(y_m) - s \quad (8)$$

式(8)在设计电场恢复的起始电压时,将电场特性的稳定性考虑在内,若电场稳定,则其故障电压方差较小,此时电压值可设置较高。反之,若电场稳定性较差, $y_m$  方差较大,则应该给予较小的起始电压,确保电场有效运行。

**步骤 5** 故障电压样本集  $y_m$  的更新:以  $y_{\text{下限}}$  为起始电压, $y_{\text{上限}}$  为第 1 折线的终止电压进行电压提升,在 1 s 内通过 50 次升压将电压由  $y_{\text{下限}}$  升至  $y_{\text{上限}}$ 。在第 2 折线阶段以 2 倍速率对电压进行提升,直至发生火花闪络,记录下闪络故障电压  $U_{f6}$ 。更新训练集  $y_m$ ,  $t=7$  时故障样本集应为

$$y_m = \{U_{f2}, U_{f3}, U_{f4}, U_{f5}, U_{f6}\} \quad (9)$$

类似的,对于第  $t$  次 ( $t \geq 6$ ) 闪络故障电压预测,其训练样本集有

$$y_m = \{U_{f(t-5)}, U_{f(t-4)}, U_{f(t-3)}, U_{f(t-2)}, U_{f(t-1)}\} \quad (10)$$

**步骤 6** 电场电压提升步长为

$$\Delta U_1 = \frac{y_{\text{上限}} - y_{\text{下限}}}{50} \quad (11)$$

式中  $\Delta U_1$  为第 1 折线阶段电压提升步长,通过 50 次提升,电压由  $y_{\text{下限}}$  上升至  $y_{\text{上限}}$ 。第 2 折线阶段电压提升步长  $\Delta U_2 = 2\Delta U_1$ 。本文方法关键参数生成如图 5 所示。

### 3.2 闪络故障电压恢复流程

本文所提闪络故障电压恢复策略详细流程如图 6 所示。当检测到电场发现火花闪络后,首先令电源停止供电 30 ms,以便熄灭电火花及被击穿介质产生的放电通道;与此同时,控制程序采用 2.1 节所述方法通过  $y_m$  计算故障恢复的关键参数  $y_{\text{上限}}$ ,  $y_{\text{下限}}$ ,  $\Delta U_1$  和  $\Delta U_2$ 。

电火花熄灭及电场介质特性恢复后,开始进行电压的提升。如图 4 所示,电压的提升分 2 阶段进行,第 1 阶段以  $y_{\text{下限}}$  为起始电压,以  $\Delta U_1$  为步长,缓慢提升(若无闪络,持续提升 1 s 后进入第 2 阶

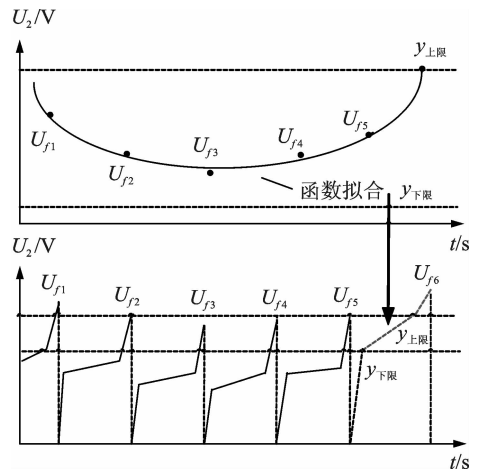


图 5 所提方法关键参数生成

Fig. 5 Parameter generation for proposed approach

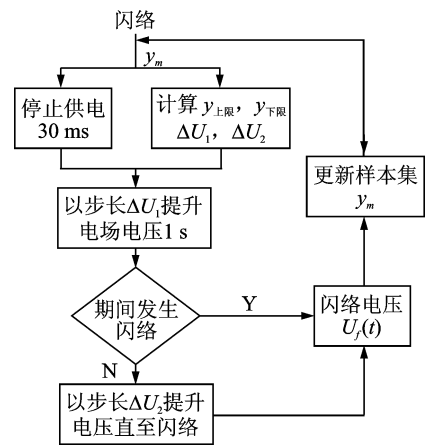


图 6 所提故障恢复方法流程图

Fig. 6 Flowchart for proposed fault recommendation

段);第 2 阶段电压以  $\Delta U_2$  为步长快速提升,直至发生闪络;得到此时闪络电压  $U_f(t)$ ,并根据式(10)对  $y_m$  进行更新。当再次发生闪络时,采用新生成的  $y_m$ ,重复上述步骤,对新的火花闪络进行故障恢复。

所提方法相比传统三线法、二线法而言,无需设置电场极限值,其电压恢复过程关键参数设置可自动完成;不仅能够有效提高电压的平均输出,同时保留了设备对电场特性的自我适应能力,使得故障恢复策略可根据外界环境的变化而不断调节自身参数。

## 4 实验验证

为验证所提方法的有效性,本文在 4 种模拟工况下对所提方法和现有方法进行仿真对比实验:(1)电场工况稳定;(2)电场特性发生缓变;(3)电场特性发生突变;(4)电场特性发生周期性变化。实验中设电场最高承受电压为  $U_{\text{max}}$ ,电火花熄灭时间均为 20 ms,每秒升压 50 次,函数  $U_f(t)$  为电场

中介质被击穿所需的最低电压值,该函数值与电场特性密切相关,在本实验中用于模仿不同电场特性。

实验中,二线法中电场设定值  $U_{set}=0.7U_{max}$ ; SVR 的函数拟合性能受参数组  $\{C, \epsilon, \sigma\}$  影响<sup>[15]</sup>,本实验中令惩罚因子  $C=10$ ,不敏感因子  $\epsilon=0.1$ ,核宽参数  $\delta=0.1$  即可保证学习性能与泛化能力<sup>[16-17]</sup>。

#### 4.1 电场特性稳定

令  $U_f(t)$  为定值用于模仿电场工况稳定情况,当  $U_{set}=0.7U_{max}$  时,  $U_f(t)$  实际值可能大于设定值或小于等于设定值。因此本实验分别在  $U_f(t)=0.8U_{max}$  和  $U_f(t)=0.6U_{max}$  情况下对3种方法进行仿真和对比。

当  $U_f(t)=0.8U_{max}$  时,电场实际环境要优于人为设定值。电场稳定情况下3种方法性能对比如图所示。在图7(a)中可以看到,二线法电压值攀升到  $U_{set}=0.7U_{max}$  后就不再发生变化。三线法在  $0.4U_{max} \sim 0.56U_{max}$  区间持续较长时间后,逐步攀升至  $0.8U_{max}$ 。而所提方法在前21 s与二线法无异,在21 s后所提方法快速将电压上限提升至  $0.8U_{max}$ ,同时逐步提升电压恢复的起始电压,显著

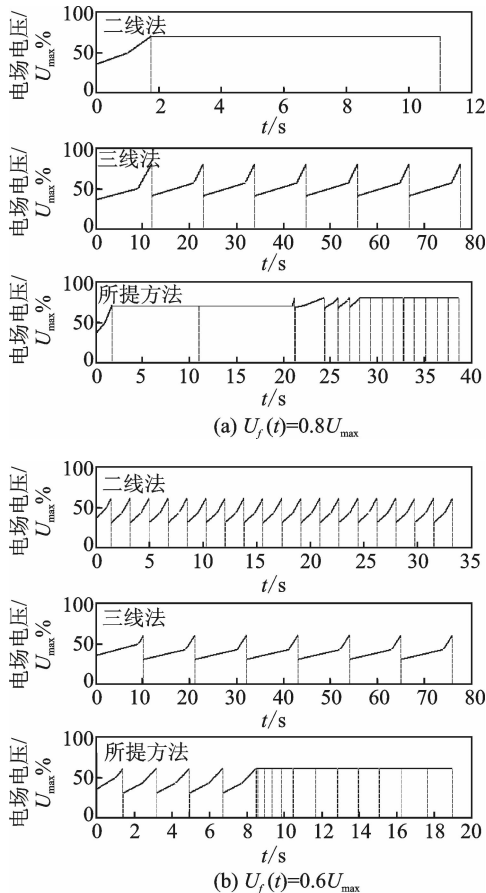


图7 电场特性稳定情况下3种方法性能对比

Fig. 7 Performance comparison of three methods with stable electric field characteristics

地提升了电压输出。前30 s内,二线法的平均输出电压为  $0.688U_{max}$ ,三线法的平均输出电压为  $0.488U_{max}$ ,所提方法的平均输出电压为  $0.702U_{max}$ 。在图7(b)中,电场闪络故障发生的电压  $U_f(t)=0.6U_{max}$ ,小于设定值,故障频率较大,3种方法的电压上限值相同,但所提方法在第9 s开始,电压输出逐渐趋向于一条直线,显著优于传统两种方法。前30 s中,二线法平均电压为  $0.428U_{max}$ ,三线法平均电压为  $0.395U_{max}$ ,而所提方法平均电压为  $0.553U_{max}$ 。

#### 4.2 电场特性缓变

电场介质击穿电压受环境影响往往会发生缓变。 $U_f(t)=U_{max} \times (50 + \frac{50t}{t+15})\%$ ,  $U_f(t)=U_{max} \times (100 - \frac{50t}{t+4})\%$  被用于模拟电场特性逐渐变好和逐渐变差,如图8所示。

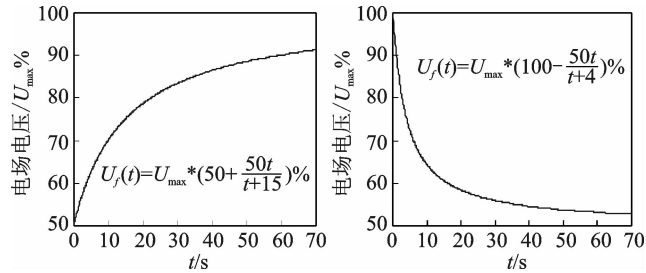
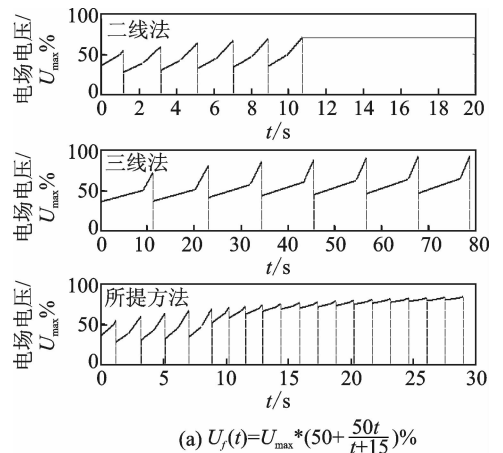


图8 电场特性缓变情况模拟

Fig. 8 Simulation of electric field characteristics slowly changing

电场特性缓变情况下3种方法性能对比如图9所示。 $U_f(t)=U_{max} \times (50 + \frac{50t}{t+15})\%$  时,如图9(a)所示,二线法的电压上限值随着电场特性的变化而逐步提升,当  $U_f > U_{set}$  时,输出电压固定于  $U_{set}$ 。三线法与所提方法均能跟随电场的变化而逐步提升电压输出的上限。前20 s内,二线法平均输出电压为  $0.569U_{max}$ ,三线法平均输出电压为  $0.443U_{max}$ ,所提方法平均输出电压为  $0.58U_{max}$ 。



(a)  $U_f(t)=U_{max} \times (50 + \frac{50t}{t+15})\%$

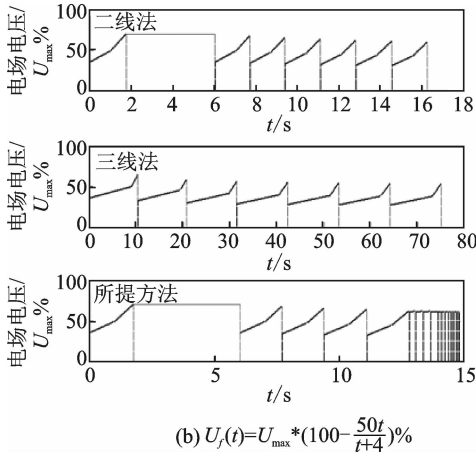


图 9 电场特性缓变情况下 3 种方法性能对比  
Fig. 9 Performance comparison of three methods when electric field characteristics slowly changing

令  $U_f(t) = U_{\max} \times (100 - \frac{50t}{t+4})\%$  模拟电场特性逐步恶化,图 9(b)所示,3 种方法均实现了输出电压上限的自动调整。对照图 8,电场特性在 15 s 前变化快速,15 s 后变化缓慢,3 种方法中显然所提方法更贴切环境变化情况,显示出更强的环境适应能力。同时,前 20 s 内,二线法平均输出电压为  $0.502U_{\max}$ ,三线法平均输出电压为  $0.416U_{\max}$ ,所提方法平均输出电压为  $0.563U_{\max}$ 。

### 4.3 电场特性周期性变化

本实验令  $U_f(t) = U_{\max} \times (70 + 30\sin(t))\%$  模仿电场特性发生周期性变换,3 种方法性能对比如图 10 所示,二线法取值上限为 70,三线法在大多数时间取值小于 50,所提方法在 15 s 过后具备了对环境的适应能力,输出电压基本能够跟随环境变化而变化。前 20 s 中,二线法平均输出电压为  $0.52U_{\max}$ ,三线法平均输出电压为  $0.304U_{\max}$ ,所提

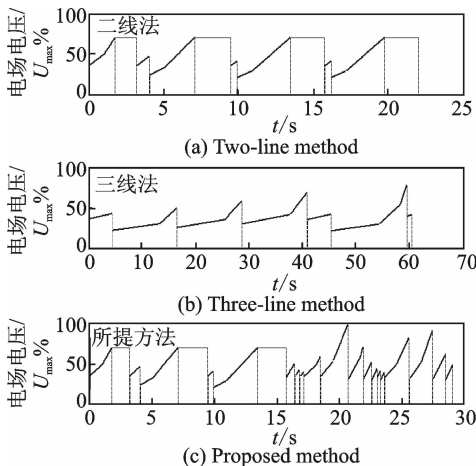


图 10 电场特性周期变换情况下 3 种方法性能对比  
Fig. 10 Performance comparison of three methods when electric field characteristics periodically changing

方法平均输出电压为  $0.523U_{\max}$ 。

### 4.4 电场特性突变

本实验分别令  $U_f(t) = \begin{cases} 0.6U_{\max}, & t \leq 8 \text{ s} \\ 0.8U_{\max}, & t > 8 \text{ s} \end{cases}$  和  $U_f(t) = \begin{cases} 0.8U_{\max}, & t \leq 8 \text{ s} \\ 0.6U_{\max}, & t > 8 \text{ s} \end{cases}$  模拟电场特性在第 8 s 时突然提升和突然恶化情形,3 种方法性能对比如图 11 所示。

当  $U_f(t) = \begin{cases} 0.6U_{\max}, & t \leq 8 \text{ s} \\ 0.8U_{\max}, & t > 8 \text{ s} \end{cases}$  时,如图 11(a) 所示,二线法在第 8 s 时开始攀升,电压输出最终固定在设定值  $0.7U_{\max}$ 。三线法输出电压上限达到  $0.8U_{\max}$ ,但绝大多数时间电压输出介于  $0.4U_{\max} \sim 0.56U_{\max}$ 。所提方法在前 8 s 表现与二线法一致,但自第 15 s 开始逐步提升电压输出,平均输出电压得到提升。前 30 s 中,二线法平均输出电压为  $0.624U_{\max}$ ,三线法平均输出电压为  $0.488U_{\max}$ ,所提方法平均输出电压为  $0.632U_{\max}$ 。

当  $U_f(t) = \begin{cases} 0.8U_{\max}, & t \leq 8 \text{ s} \\ 0.6U_{\max}, & t > 8 \text{ s} \end{cases}$  时,如图 11(b) 所示,电场特性突然恶化,闪络故障发生所需电压

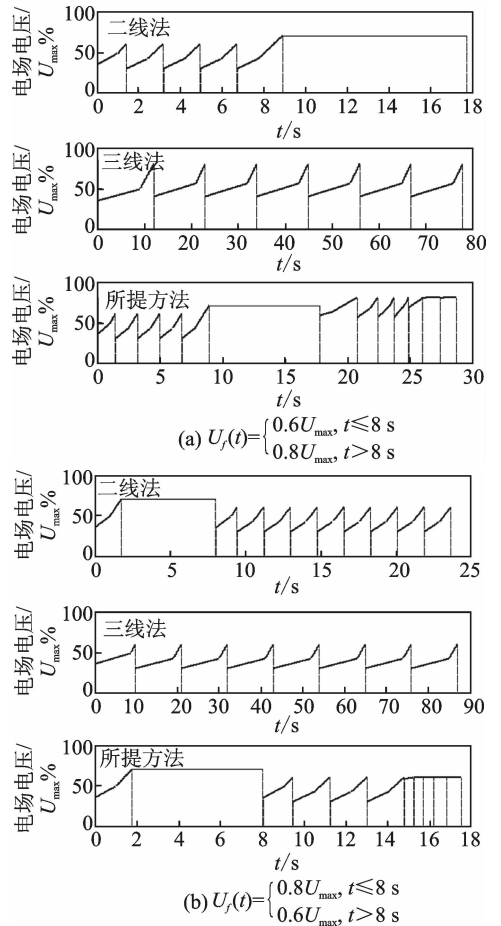


图 11 电场特性突变情况下 3 种方法性能对比  
Fig. 11 Performance comparison of three methods when electric field characteristics abruptly changing

值突发下降。自 8 s 起,二线法、三线法两者除电压提升步幅有所区别外,电压输出初始值均固定于  $0.3U_{\max}$ , 上限值均固定于  $0.6U_{\max}$ 。而所提方法虽然输出上限值与前两者相同,但电压输出起始电压逐步提升。前 30 s 中,二线法平均输出电压为  $0.489U_{\max}$ , 三线法平均输出电压为  $0.395U_{\max}$ , 所提方法平均输出电压为  $0.578U_{\max}$ 。

为更清晰地对各方法性能做出对比,表 1 给出了 3 种方法在 4 种条件下前 30 s 的平均输出电压。

通过图 7~11 及表 1 可发现,所提方法不仅保留了现有方法的电场环境适应能力,更进一步提高了电场的平均输出电压;所提方法的优越性存在于多数工况,因此具备更好的工程运用前景。

表 1 不同工况下 3 种方法的平均输出电压

Tab. 1 Average output voltage of three methods under different conditions V

工 况	二线法	三线法	所提方法	
电场特性稳定	设定值过低	68.81	48.80	70.17
	设定值过高	42.78	39.50	55.33
电场特性缓变	环境提升	61.25	46.80	64.72
	环境恶化	47.07	39.90	57.35
电场特性周期性变化		51.80	32.24	51.47
电场特性突变	环境提升	62.47	48.80	63.19
	环境恶化	48.87	39.50	57.79

## 5 结 论

电除尘器的除尘效率很大程度取决于其供电电源的二次电压,通常要求最大化其输出电压,然而电压过大会击穿电场介质,导致闪络故障,因此需采用特定方法实现最佳火花率控制。常规方法通过低电压长期运行,或固定电压输出上限实现火花控制,但多存在电压输出较低、电场环境适应能力较弱,性能受参数设定影响大等问题。

本文提出 SVR-Based 故障恢复策略,可根据临近时间段的故障电压,推算出当前电场闪络故障发生所需电压  $U_f$ , 然后令输出电压在 1 s 内缓慢升至该电压值,在确保低火花率的基础上,以较快速率提升电压,使其达到电场闪络故障发生的实际电压值。所提方法相较传统方法而言,具备如下特

点:(1) 确保了故障恢复方法对电场环境的自我调节和适应能力,无需人工设定参数;(2) 平均输出电压亦高于传统方法。最后,将所提方法用于 7 组不同工况下的闪络故障实验。实验中所提方法表现优秀,其优越性得到验证。

## 参考文献:

- [1] VUKOSAVIĆ S, POPOV N, DESPOTOVIĆ Ž. Power electronics solution to dust emissions from thermal power plants[J]. Serbian Journal of Electrical Engineering, 2010, 7(2): 231-252.
- [2] VUKOSAVIĆ S N, PERIĆ L S, SUSIĆ S D. A novel power converter topology for electrostatic precipitators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 152-164.
- [3] GUO T, ZHANG C, CHANG L, et al. Large-signal modeling of LCC resonant converter operating in discontinuous current mode applied to electrostatic precipitators[C]// Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE. [S.l.]: IEEE, 2013: 2629-2635.
- [4] 弭寒光, 袁海文, 郭鑫, 等. 独立电源系统有源滤波器测控系统自动定制技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(7): 64-69.  
MI Hanguang, YUAN Haiwen, GUO Xin, et al. Automatic customization of detection-control system for active power filter in isolate power grid[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43(7): 64-69.
- [5] 曹显奇, 赵明, 刘海江. 应用 FPGA 的静电除尘电源控制器设计[J]. 高压技术, 2008, 34(3): 525-528.  
CAO Xianqi, ZHAO Ming, LIU Haijiang. Application of FPGA to the electrostatic precipitator power controller[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 525-528.
- [6] SMOLA A J, SCHÖLKOPF B. A tutorial on support vector regression[J]. Statistics and Computing, 2004, 14(3): 199-222.
- [7] BUNCH J R, KAUFMAN L C. A computational method of indefinite quadratic programming problem [J]. Linear Algebra and Its Applications, 1980, 34: 341-370.
- [8] KAYTEZ F, TAPLAMACIOĞLU M C, CAME E, et al. Forecasting electricity consumption: a comparison of regression analysis, neural networks and least squares support vector machines [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 67: 431-438.
- [9] 杨金芳, 翟永杰, 王东风, 等. 基于支持向量回归的时间序列预测[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 110-114.

- YANG Jinfang, ZHAI Yongjie, WANF Dongfeng, et al. Time series prediction based on support vector regression [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17):110-114.
- [10] 胡友涛, 胡昌华. 一种基于GA优化小波LS-SVR的实时寿命预测方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(S1):203-206.
- HU Youtao, HU Changhua. Real-time lifetime prediction method based on wavelet LS-SVR optimized by GA [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43(S1):203-206.
- [11] CHEN K, YU J. Short-term wind speed prediction using an unscented Kalman filter based state-space support vector regression approach[J]. Applied Energy, 2014, 113: 690-705.
- [12] 易辉, 梅磊, 李丽娟, 等. 基于多分类相关向量机的水电机组振动故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(17):2843-2850.
- YI Hui, MEI Lei, LI Lijuan, et al. Vibration fault diagnosis for hydroelectric generating unit using multi-class relevance vector machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(17):2843-2850.
- [13] ZHAO W, Tao T, DING Z S, et al. A dynamic particle filter-support vector regression method for reliability prediction[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2013, 119: 109-116.
- [14] ZHANG L, ZHOU W D, CHANG P C, et al. Iterated time series prediction with multiple support vector regression models[J]. Neurocomputing, 2013, 99: 411-422.
- [15] 易辉, 宋晓峰, 姜斌, 等. 柔性支持向量回归及其在故障检测中的应用[J]. 自动化学报, 2013, 39(3): 272-284.
- YI Hui, SONG Xiaofeng, JIANG Bin, et al. Flexible support vector regression and its application to fault detection[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(3):272-284.
- [16] SHAMSHIRBAND S, PETKOVIĆ D, AMINI A, et al. Support vector regression methodology for wind turbine reaction torque prediction with power-split hydrostatic continuous variable transmission[J]. Energy, 2014, 67: 623-630.
- [17] CHONGWATPOL J, PHURITHITITANAPONG T. Applying analytics in the energy industry: A case study of heat rate and opacity prediction in a coal-fired power plant[J]. Energy, 2014, 75: 463-473.