

DOI: 10.7667/PSPC171779

LMS 自适应滤波器在雁淮特高压直流工程交流滤波器保护系统中的应用研究

刘威鹏, 曾丽丽, 张爱玲, 张健, 罗磊

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 以雁淮直流输电工程交流滤波器保护系统的不平衡电流校正为研究对象, 介绍了 C1 高压电容器组的结构和不平衡保护的原理。阐明了不平衡电流校正的重要性和意义, 指出传统方法所使用的初始不平衡电流不充分考虑其相位和幅值的波动, 将其作为恒定值是不合理的。针对初始不平衡电流的随机性, 介绍了 LMS 自适应滤波器的原理和特性, 并将其在 HCM3000 平台中进行了实现。研究并给出了滤波器关键参数, 阐述了在具体工程应用中的使用方法。工程数据验证了设计的合理性和性能的优越性。

关键词: C1 电容器; 不平衡保护; 初始不平衡电流; LMS 自适应滤波器; HCM3000

Application and study of LMS adaptive filter in AC filter protection of Yan Huai UHVDC power transmission project

LIU Weipeng, ZENG Lili, ZHANG Ailing, ZHANG Jian, LUO Lei

(XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: Taking the unbalanced current correction of AC filter protection system in Yan Huai HVDC project as the object of study, the structure of the high-voltage capacitor bank and the principle of unbalanced protection are introduced. The importance and significance of unbalanced current correction are clarified. It is unreasonable to point out that the initial unbalanced current used in the traditional method does not fully take into account the fluctuation of its phase and amplitude. In view of the randomness of the initial unbalanced current, the principle and characteristics of LMS adaptive filter are introduced, and its implementation in HCM3000 platform are given. The key parameters of filter are researched and given, and the method of application in specific engineering is expounded. The engineering data verify the rationality of the design and the superiority of the performance.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600) "Operation Control and Protection of Large-scale AC/DC Hybrid-connected Power Grid"

Key words: C1 capacitor; unbalance protection; initial unbalanced current; LMS adaptive filter; HCM3000

0 引言

2017 年 6 月 24 日, ± 800 kV 雁淮特高压直流输电工程正式投运。该工程起于山西朔州, 止于江苏淮安, 是国家大气污染防治行动计划 12 条重点输电通道之一, 直流线路长度约 1 119 km, 额定电压 ± 800 kV, 直流输电容量 8 000 MW, 直流额定电流 5 000 A, 相当于在江苏新建 8 座百万千瓦电厂。该

工程的控制保护系统采用许继集团的 HCM3000 平台实现。

交流滤波器系统在整个直流输电工程的造价中具有重要分量, 一般占到换流站总成本的 10%, 故需要配置交流滤波器保护装置予以实时保护^[1]。C1 电容器是交流滤波器系统的重要组成部分, 其工作的可靠性对直流输电系统的安全稳定具有直接和重要的影响^[2-8]。及时对电容器组内部的元件进行损坏检测并给出分段处理是交流滤波器保护的重要工作之一^[9], 不平衡保护可以很好地解决该问题。因电容器制造和工艺的原因, C1 电容器存在初始不平衡

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900600)
“大型交直流混联电网运行控制和保护”

电流,在进行保护判断时,应去除该初始值的影响以提高保护动作精度,目前,关于实现初始不平衡电流提取和计算的研究并不多,工程中常规方法是认为初始不平衡电流为固定值,即在初次上电或更换电容器后稳态时的某个时刻对不平衡电流进行计算,以所得的不平衡电流有效值作为初始不平衡电流,显然这是不尽合理的。本文基于工程实际,提出了一种基于 LMS 算法的改进型自适应滤波器,能很好地实现对电容器状态的实时跟随并得到动态的初始不平衡电流以参与保护决策,工程应用效果好。

1 不平衡保护原理介绍

不平衡保护是交流滤波器保护中的一项重要内容。2017年7月19日8时,雁淮直流淮安站5643交流滤波器出现多电容击穿故障,不平衡保护及时发现了故障并予以跳闸保护。

1.1 C1 电容器结构及故障分析

雁淮直流 C1 电容器采用 H 型接线方式,如图 1 所示,由上下四个桥臂组成。每个桥臂完全相同,由很多个单只电容器单元通过串并联形式构成。由于 H 桥的对称特性,中间的不平衡支路上流过的电流 I_{ubc} 理论上应该是 0。但如果桥臂中的某个电容元件发生击穿或熔丝熔断等故障时,内部的平衡状态将被打破,同一组内其他完好元件所承受的电压将会升高,有可能会引起新的元件击穿,导致其余元件上的电压继续升高,产生雪崩效应,最终导致一只电容器组贯穿性短路^[10]。如何高分辨率地检测电容器的损坏情况,并在电容器的工作状态恶化超过整定值前及时切除故障电容器组是交流滤波器保护的重要内容。然而由于无法实现在系统运行中对电容值的精确测量,所以工程中都不采用在线检测电容值的方法,而是采用不平衡保护的方法实现对故障的检测。

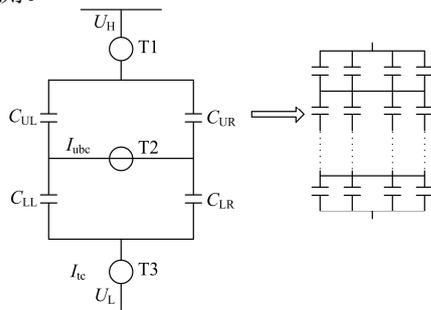


图 1 交流滤波器 C1 电容器组
Fig. 1 C1 capacitor of AC filter

1.2 C1 电容器不平衡保护研究

如图 1 所示,一般在 H 桥的不平衡支路上安装

不平衡电流检测 CT(T2),当 H 桥某桥臂内部发生电容器故障时,T2 将会检测到不平衡电流的产生。随着故障程度的不同,不平衡电流 I_{ubc} 也将会不同。雁淮直流采用比值不平衡法实现不平衡保护,即检测不平衡电流 I_{ubc} 和穿越电流 I_{ic} 的比值,当大于保护定值时,切除故障电容器组^[11-12]。

在图 1 中,由电路学知识计算可得:

$$\frac{I_{ubc}}{I_{ic}} = \frac{C_{UL}}{C_{UL} + C_{UR}} - \frac{C_{LL}}{C_{LL} + C_{LR}} \quad (1)$$

由公式(1)可知:当某桥臂出现电容器故障时,不平衡电流与穿越电流的比值仅与桥臂电容的变化情况和电容器组内部元器件的串并联方式有关^[13],而与系统电压的波动和交直流系统状态的改变无关^[14],因此,其具有很好的抗干扰性和可靠性。

1.3 初始不平衡电流的影响与问题

事实上,由于电容器制造工艺的影响,C1 电容器 H 桥四个桥臂的电容值是不可能完全相同的,这就造成即使是在无故障状态下正常运行,桥间不平衡支路上也存在一定程度的不平衡电流,这就是电容器组的初始不平衡电流^[15]。

初始不平衡电流的存在会影响保护精度,即使对现场电容进行严格配平,桥臂间电容偏差依然存在,并且臂间偏差会随着外界温度场、分布电容的改变而变化,为保证不平衡保护的可靠性和灵敏度,必须在保护策略中充分考虑不平衡电流的影响。

传统的保护装置中,一般在电容器首次充电时记录某个时刻初始不平衡电流的有效值,保护逻辑取实时检测到的不平衡电流有效值和存储的初始不平衡电流有效值之差作为校正后的数据参与运算和保护的决策。此种方法存在的明显不足之处如下:

1) 它假定了初始不平衡电流和实时检测到的不平衡电流是永远同相位的且初始不平衡电流有效值是固定不变的,而事实上初始不平衡电流的幅值和相位会随着外界温度场、分布电容等的变化而变化。

2) 交流场波动时会出现穿越电流增大,而实际并无电容故障的问题,由公式(1)可知,此时初始不平衡电流必然也会增大。

因此,单纯的以某一特定时刻的初始不平衡电流有效值参与保护逻辑,会降低系统的灵敏度和可靠性,甚至会出现不平衡保护的频繁误动作,影响 C1 电容器组的正常运行。

2 LMS 自适应滤波器在 HCM3000 中的设计

自适应滤波器能实现对不确定特征输入信号的滤波处理,通过对信号一定程度的跟踪,不断调整滤波器的结构和权系数,进而达到更优的滤波效果^[16]。其被广泛应用于系统辨识、自适应均衡、噪

声对消等领域^[17]。自适应算法主要有最小均方误差 (Least Mean Squares, LMS) 算法和递推最小二乘 (Recursive Least Square, RLS) 算法两种, 其中 LMS 算法具有计算量小、易实现等优点而被广泛应用, HCM3000 即采用了此方法进行实现和使用。

2.1 LMS 自适应滤波器算法介绍

图 2 为自适应滤波器的基本结构图。由图可知自适应滤波器由三部分组成: 自适应滤波器、误差信号综合器、自适应算法。自适应滤波器实现对输入信号按期望信号的特征进行滤波输出; 误差信号综合器实现对实时滤波输出信号与期望输出信号之间误差的计算, 并将其传递给自适应算法模块; 自适应算法模块根据得到的 $e(k)$ 信号去动态实时调整滤波器结构和系数, 使得下周期的滤波输出更逼近期望信号 $d(k)$ 。

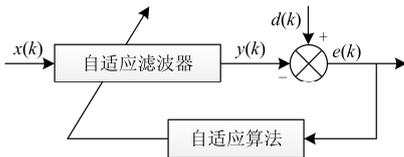


图 2 自适应滤波器基本结构图

Fig. 2 Basic structure of the adaptive filter

LMS 自适应滤波器基于最陡下降算法, 沿着性能曲面的负梯度方向不断调整权系数, 搜索性能曲面的极小值, 即通过迭代使得均方误差 $E[d^2(k)]$ 最小^[18-20]。基于最陡下降算法的 LMS 自适应滤波器算法流程如式(2)。

$$\begin{cases} y(k) = \sum_{i=0}^N w_i(k)x_i(k) \\ e(k) = d(k) - y(k) \\ w(k+1) = w(k) + 2\mu e(k)x(k) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $x(k)$ 为输入信号; $y(k)$ 为滤波器输出; $d(k)$ 为期望信号; $e(k)$ 为误差信号, $w(k)$ 为滤波器权系数; N 为滤波器阶数, μ 为迭代步长, 当满足条件 $0 < \mu < 1/\lambda_{\max}$ 时算法收敛, 其中 λ_{\max} 为 $x(k)$ 自相关矩阵的最大特征值^[21]。由公式可知:

1) 权系数 $w(k)$ 的更新依赖于输入信号 $x(k)$, 因此要求两者是非相关的。

2) 误差信号的计算依赖于期望信号, 即要求在自适应调整权系数的过程中必须有期望信号。

2.2 LMS 自适应滤波器在 HCM3000 中的实现

HCM3000 是高端直流输电控制保护通用平台。通过灵活配置主处理器板卡和多种功能插件可以满足不同应用的需求; 通过 CFC 图形化的方式为工程人员提供二次编程和在线调试的功能^[22-24]。LMS 自适应滤波器在 HCM3000 中的实现需要在主处理器

卡中开发相应的算法程序, 并在图形化编程工具中设计功能块从而为应用人员提供使用接口, 这样用户可以将更多的精力放在控制保护的逻辑上, 而无需关注算法的具体底层实现。

LMS 自适应滤波器在 HCM3000 主处理器中具体实现的算法流程如图 3 所示, 具体步骤如下:

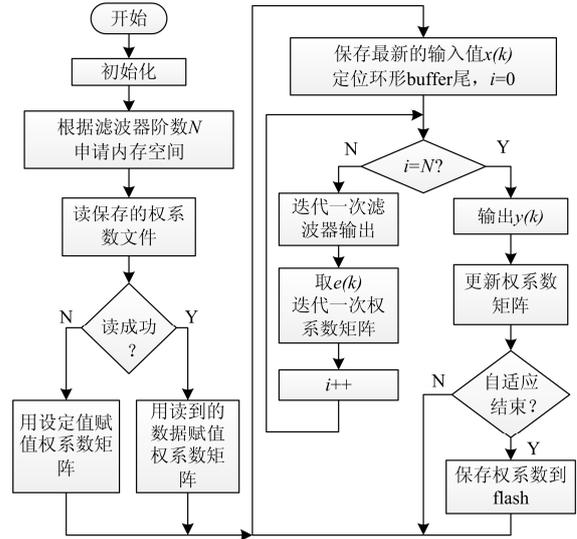


图 3 HCM3000 中 LMS 自适应滤波器算法流程图

Fig. 3 Algorithm flow chart of LMS adaptive filter in HCM3000

1) 初始化模式下根据滤波器阶数申请两段内存空间, 构建滤波权系数 $w(k)$ 矩阵和历史输入 $x(k)$ 矩阵。为保证算法效率, 缓存输入值的 buffer 采用环形结构。内存空间申请成功后尝试去读 flash 中保存的滤波权系数文件并以此赋值权系数矩阵 $w(k)$; 若无该文件则赋值为 0。

2) 保存当前的输入值, 更新输入 $x(k)$ 矩阵, 并重新定位环形 buffer 的尾部。

3) 将权系数 $w(k)$ 和输入值 $x(k)$ 矩阵中对应的分量(同一时刻点)相乘后求和, 以获得当前的滤波输出 $y(k)$ 。

4) 取期望值与当前输出比较后的误差 $e(k)$ 。

5) 根据设定的迭代步长 μ 、误差 $e(k)$ 和当前输入去迭代更新滤波权系数矩阵 $w(k)$ 的每个分量。

6) 判断迭代步长 μ 是否为 0, 为 0 时表示自适应过程完成, 启动保存, 将滤波系数以文件形式保存到 flash 中, 以便下次上电时读取。

3 算法在不平衡电流校正中的应用

C1 电容器充电后, 在正常运行状态下, 初始不平衡电流并非稳定不变, 其幅值和相位会随着外界温度场、分布电容等的影响而实时波动, 自适应滤

波器在经过足够多次的迭代后, 算法收敛, 之后就可以从输入信号中准确地得到实时的初始不平衡电流。

3.1 算法在工程应用中的具体方法

雁淮直流不平衡保护的逻辑中, 考虑到电容器穿越电流与不平衡电流的相关性, 取电容器组实时穿越电流 I_c 作为 LMS 自适应滤波器的滤波输入 $x(k)$; 将电容器充电后稳定运行状态下实时检测到的不平衡电流 I_{ubc} 作为期望信号 $d(k)$, 并取其滤波器的实时输出之差作为误差 $e(k)$ 用于更新滤波器权系数。

在 C1 电容器首次充电或者更换电容器之后, 换流站工作人员通过 SCADA 系统下发校正命令, LMS 自适应滤波器将使用合适的迭代步长 μ 开始参数自适应的过程。在稳态误差足够合理之后, 滤波器外部逻辑将切换迭代步长 μ 的输入为 0, 自适应过程结束, LMS 滤波器功能块内部将启动参数保存功能, 把最终得到的滤波权系数 $w(k)$ 以文件的形式保存在 flash 中, 方便下次重新上电时直接使用。之后滤波器开始对电容器状态和穿越电流进行实时跟踪, 并输出实时的初始不平衡电流。实时采集的 H 桥不平衡电流与滤波器输出作差之后再求有效值, 这就是校正后的不平衡电流, 用于参与比值不平衡的判断逻辑。

3.2 算法关键参数的选取

由 LMS 的滤波器特性可知, 滤波器阶数 N 越大, 算法的收敛速度和收敛精度就越高, 但由此所带来的问题是算法的迭代次数和运算复杂度将会提高。雁淮直流交流滤波器保护系统配置为每周波 32 点采样, 因此在保护程序中设置滤波器阶数为 32。

迭代步长 μ 的选择对收敛速度和收敛精度有重要的影响^[25]。图 4 所示为 32 阶滤波器在 3 个不同迭代步长情况下的仿真结果, 由此可知: 在满足迭代步长小于 $1/\lambda_{\max}$ 的前提下, 大的迭代步长能提高对时变系统的跟踪速度, 获得好的收敛能力, 但与此同时, 稳态误差会比较大; 小的迭代步长能提高对时变系统的跟踪精度, 获得好的稳态误差, 但却会使收敛速度降低。因此 μ 的选择需要权衡系统对收敛速度和精度的要求。文献[26]提到了多种变系数的 LMS 自适应滤波算法, 主要思路是在自适应阶段根据误差信号的大小选择合适的迭代步长。考虑到交流滤波器不平衡保护的逻辑中, 初始不平衡电流的参数自适应过程仅在电容器第一次充电或者更换电容器后进行, 对算法的收敛速度没有苛刻要求, 但要求收敛精度足够高, 因此确定了三段式的

变步长方式, 即有:

$$\mu_i = \begin{cases} \mu_1 & (t_i \leq t < t_j) \\ \mu_2 & (t_j \leq t < t_k) \\ 0 & (0 < t < t_i, t \geq t_k) \end{cases} \quad (3)$$

在经过大量工程参数仿真的情况下, 设定 μ_1 为 0.02, μ_2 为 0.005。具体使用方法是: 在接收到后台下发的校正命令后, 保护逻辑选取 μ_1 作为迭代步长输入, 并启动计时; 40 s 之后切换步长输入为 μ_2 , 并重新计时; 20 s 之后置迭代步长输入为 0, 即停止自适应参数校正, 开始正常的滤波输出阶段。

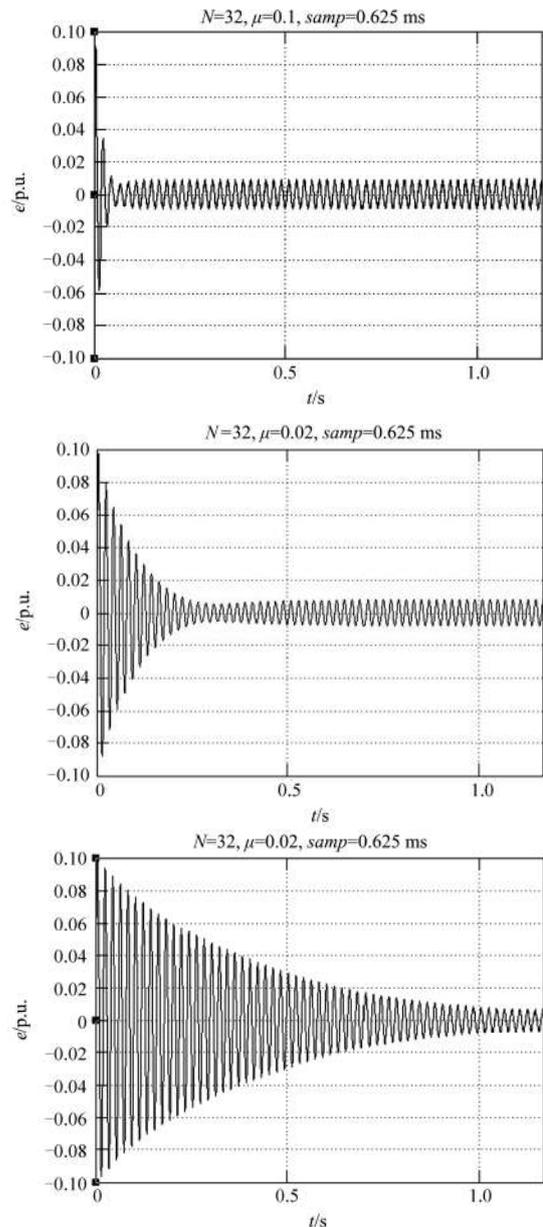


图 4 不同迭代步长时滤波器仿真输出

Fig. 4 Simulation output of filter at different iteration steps

4 算法的验证与工程应用

在完成算法的设计和迭代步长的仿真与性能分析之后, 需要基于 HCM3000 平台搭建实验系统予以验证。

4.1 算法的验证

搭建实验系统的主要方法是: 利用信号源产生幅值为 1 p.u. 的标准工频正弦波作为期望信号(5 V 对应 1 p.u.), 在此之上叠加幅值分别为 0.2 p.u.、0.3 p.u.、0.4 p.u.、0.6 p.u. 的 11 次、13 次、23 次以及 25 次谐波, 通过平台中的模拟量输入模块将输入信号送至主处理板卡, 主处理板卡运行 LMS 自适应滤波器算法程序, 滤波输出通过模拟量输出模块送至示波器进行观测。相应的波形如图 5 所示, 结果表明所设计的 LMS 自适应滤波器很好地再现了期望信号。

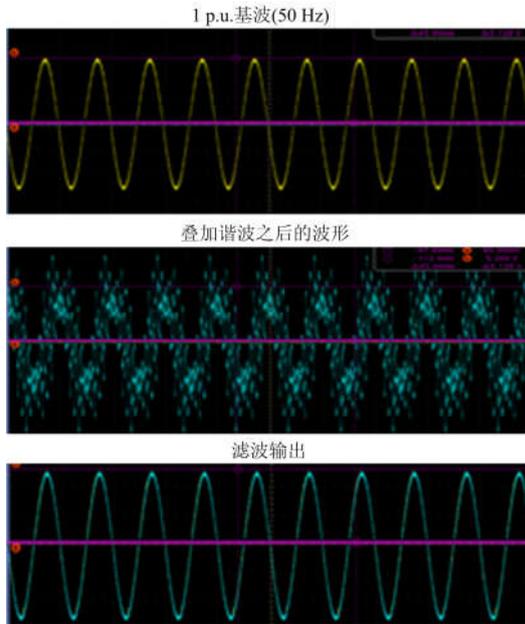


图 5 滤波器功能验证结果

Fig. 5 Filter function verification results

4.2 算法的工程应用

雁淮直流的交流滤波器采用 4 大组, 16 小组设计, 使用的交流滤波器保护系统由 HCM3000 实现, 其中配置了 18 组不平衡保护。不平衡电流校正的主体功能通过调用基于算法设计的功能块 ADALMS 实现。运维人员在交流场初次带电或更换电容时下发命令启动三段式变步长自适应参数迭代过程, 之后滤波器就能实现对初始不平衡电流的实时输出。图 6 所示为 2017 年 2 月 25 日雁淮直流淮安站交流场带电时交流滤波器第 1 大组第 2 小组 A 相不平衡电流有效值在校正前和校正后的录波数据对比。由

此可知, 使用了 LMS 自适应滤波器之后, 不平衡电流得到了有效校正, 表明滤波器输出很好地跟随了系统的变化。这大大提高了保护的可靠性和精度。

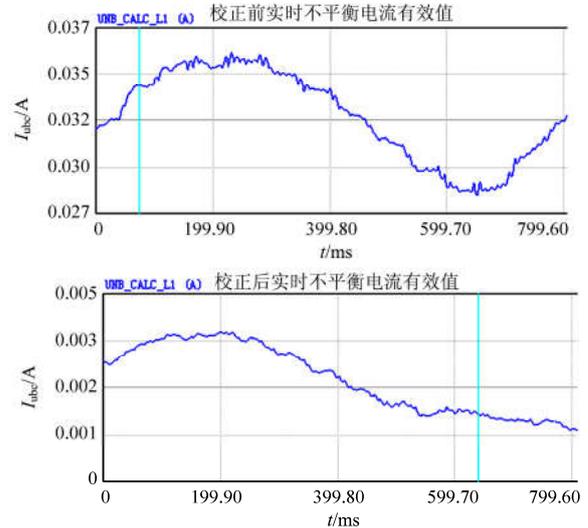


图 6 工程应用中滤波器使用效果

Fig. 6 Filter effects in engineering applications

5 结论

不平衡保护是交流滤波器保护系统中的一项重要内容, 需要充分考虑初始不平衡电流的影响。把初始不平衡电流当作一个固定值参与保护决策是不合理的, 自适应滤波器可以实现对不确定特征信号的滤波输出, 这与从已知电容器电流中提取出初始不平衡电流的要求是一致的。本文基于此情况提出了一种基于 HCM3000 平台的 LMS 自适应滤波器的设计和实现; 并结合直流输电工程实际使用要求, 分析研究了滤波器关键参数的整定方法; 提出了一种易于工程使用的三段式变步长使用方法, 兼顾了算法的收敛速度和精度。本设计和方法已经用于 ± 800 kV 雁淮特高压直流输电工程, 提高了保护系统的可靠性和稳定性。

参考文献

- [1] 段涛, 张智勇, 李德建, 等. ± 500 kV 换流站交流滤波器组不平衡电流调整新策略[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 135-139.
DUAN Tao, ZHANG Zhiyong, LI Dejian, et al. The new unbalanced current adjusting strategy of AC filter in ± 500 kV converter station[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 135-139.
- [2] 裴昂, 吕思颖, 秦昕, 等. 特高压直流输电系统换流站故障过电压研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 149-154.
PEI Chan, LÜ Siying, QIN Xin, et al. Study on fault

- overvoltage of converter station of UHVDC power transmission system[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(12): 149-154.
- [3] 周孝法, 魏向向, 王宾, 等. 一起交流滤波器用断路器击穿事故分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(20): 38-42.
ZHOU Xiaofa, WEI Xiangxiang, WANG Bin, et al. An accident analysis of circuit breaker explosion in AC filter branch in substation[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(20): 38-42.
- [4] YAO Zhiqing, ZHANG Qun, CHEN Peng, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC Systems[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(1): 71-77. DOI: 10.1186/s41601-016-0022-0.
- [5] 隋新世, 李妮. 一起变电站内电容器组不平衡动作的分析与处理[J]. *供用电*, 2017, 34(12): 71-74.
SUI Xinshi, LI Ni. Analysis and treatment of an unbalanced action of capacitor banks in power substation [J]. *Distribution & Utilization*, 2017, 34(12): 71-74.
- [6] 杨燕, 林勇, 徐蔚, 等. 乌东德多端直流输电对广东电网安全稳定的影响[J]. *广东电力*, 2017, 30(11): 44-50.
YANG Yan, LIN Yong, XU Wei, et al. Influence of wudongde multi-terminal HVDC on security and stability of guangdong power grid[J]. *Guangdong Electric Power*, 2017, 30(11): 44-50.
- [7] 郭卫明, 黄华, 蔡国准, 等. 一起交流滤波器保护误动引起直流极闭锁的故障分析[J]. *广东电力*, 2017, 30(1): 121-125.
GUO Weiming, HUANG Hua, CAI Guozhun, et al. Fault analysis on DC bipolar blocking caused by ac filter protection malfunction[J]. *Guangdong Electric Power*, 2017, 30(1): 121-125.
- [8] 尤石, 宋鹏翔. 丹麦区域能源互联网发展综述[J]. *供用电*, 2017, 34(12): 2-7.
YOU Shi, SONG Pengxiang. A review of development of integrated district energy system in Denmark[J]. *Distribution & Utilization*, 2017, 34(12): 2-7.
- [9] 李建勋, 吴贻志, 李豹. 交流滤波器 C1 电容器保护配合策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(4): 139-144.
LI Jianxun, WU Yizhi, LI Bao. Study on the coordination strategy of the C1 capacitor protection of AC filter[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(4): 139-144.
- [10] 张杰, 刘相枪, 张耀山, 等. 桥差保护电容器组初始不平衡电流调整方法研究[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2014, 35(5): 40-43.
ZHANG Jie, LIU Xiangqiang, ZHANG Yaoshan, et al. Research on adjustment method of initial unbalanced current of h type protection power capacitor bank[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2014, 35(5): 40-43.
- [11] 郑伟, 郭乾晋, 周全. 兴安直流 C1 不平衡保护采用计数方式的研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(1): 139-144.
ZHENG Wei, WU Qianjin, ZHOU Quan. Research on the use of counting scheme in C1 unbalance protection in Xing-an HVDC project[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(1): 139-144.
- [12] 肖遥, 张晋寅, 杨晓峰, 等. 高压滤波电容器不平衡保护的试验研究[J]. *智能电网*, 2016, 4(3): 301-306.
XIAO Yao, ZHANG Jinyin, YANG Xiaofeng, et al. Test research on unbalance protection for HVDC filter capacitor bank[J]. *Smart Grid*, 2016, 4(3): 301-306.
- [13] 余江, 周红阳, 赵曼勇. 高压电容器不平衡保护的相关问题[J]. *电力系统自动化*, 2006, 30(13): 85-89.
YU Jiang, ZHOU Hongyang, ZHAO Manyong. Related problems of unbalance protection for high voltage capacitor[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(13): 85-89.
- [14] 肖遥, 张晋寅, 黎建平, 等. H 型接线高压电容器组不平衡电流保护判据及定值[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(18): 120-128.
XIAO Yao, ZHANG Jinyin, LI Jianping, et al. Criterion and settings of unbalanced current protection for filter capacitor bank of H configuration[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(18): 120-128.
- [15] 吴娅妮, 吕鹏飞, 王德林, 等. 交流滤波器高压电容器不平衡保护新原理[J]. *电力系统自动化*, 2008, 32(24): 56-59.
WU Yani, LÜ Pengfei, WANG Delin, et al. New principle of unbalance current protection for capacitor of AC filter[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(24): 56-59.
- [16] 李杨, 韩鹏, 檀虎. 几种变步长 LMS 算法的性能分析与比较[J]. *国外电子测量技术*, 2012, 31(10): 28-30.
LI Yang, HAN Peng, TAN Hu. Performance analysis and comparison of variable step-size LMS algorithms[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2012, 31(10): 28-30.
- [17] 刘建成, 赵宏志, 全厚德, 等. 迭代变步长 LMS 算法及性能分析[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(7): 1674-1680.
LIU Jiancheng, ZHAO Hongzhi, QUAN Houde, et al. Iteration based variable step-size LMS algorithm and its performance analysis[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(7): 1674-1680.
- [18] 张红梅, 韩万刚. 一种新的变步长 LMS 自适应滤波算法研究及其应用[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(8):

- 1822-1830.
ZHANG Hongmei, HAN Wangang. A new variable step LMS algorithm and its application[J]. Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(8): 1822-1830.
- [19] 曾德良. 火电厂负荷分配的多目标优化算法[J]. 热力发电, 2017, 46(5): 98-104.
ZENG Deliang. Multi-objective optimization algorithm for load distribution in thermal power plants[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(5): 98-104.
- [20] 金秀章, 刘潇. 基于在线自适应的鲁棒最小二乘支持向量机及其应用[J]. 热力发电, 2017, 46(7): 79-85.
JIN Xiuzhang, LIU Xiao. Robust least squares support vector machine based on online adaptive and its application[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(7): 79-85.
- [21] 高鹰, 谢胜利. 一种变步长 LMS 自适应滤波器算法及分析[J]. 电子学报, 2001, 29(8): 1094-1097.
GAO Ying, XIE Shengli. A variable step size LMS adaptive filtering algorithm and its analysis[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(8): 1094-1097.
- [22] 曾丽丽, 姚致清, 李延龙, 等. HCM3000 平台内置故障录波功能设计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 114-117.
ZENG Lili, YAO Zhiqing, LI Yanlong, et al. Internal fault recording function design of HCM3000[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 114-117.
- [23] 岳亚菲, 胡欢, 沈开奎, 等. 高压直流输电控制保护系统测控装置联锁图形化二次编程功能研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 123-128.
YUE Yafei, HU Huan, SHEN Kaikui, et al. Research on interlock schematic second programmable function in measurement & control device of control and protection system for HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 123-128.
- [24] 于海, 曾丽丽, 杨亚璞, 等. 基于图论的特高压直流工程最后断路器自适应判断策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 121-126.
YU Hai, ZENG Lili, YANG Yapu, et al. Adaptive strategy for the last breaker in UHVDC project based on graph theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 121-126.
- [25] 徐凯, 纪红, 乐光新. 一种变步长自适应滤波器 LMS 算法[J]. 电路与系统学报, 2004, 9(4): 115-117.
XU Kai, JI Hong, YUE Guangxin. A LMS algorithm for variable step size adaptive filters[J]. Journal of Circuits and Systems, 2004, 9(4): 115-117.
- [26] 罗小东, 贾振红, 王强. 一种新的变步长 LMS 自适应滤波算法[J]. 电子学报, 2006, 34(6): 1123-1126.
LUO Xiaodong, JIA Zhenhong, WANG Qiang. A new variable step size LMS adaptive filtering algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(6): 1123-1126.

收稿日期: 2017-12-07; 修回日期: 2018-03-09

作者简介:

刘威鹏(1985—), 男, 硕士, 工程师, 从事高压直流输电控制保护系统研发; E-mail: liuweipeng_xjgc@163.com

曾丽丽(1975—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事高压直流输电控制保护系统研发;

张爱玲(1968—), 女, 教授级高工, 长期从事高压直流输电控制保护系统的设备开发和工程管理工作。

(编辑 葛艳娜)