

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230511

# 基于半桥 MMC 特征信号注入的柔性直流线路频变参数辨识

聂铭<sup>1</sup>, 和敬涵<sup>1</sup>, 李猛<sup>1</sup>, 张慧媛<sup>1</sup>, 陈可傲<sup>1</sup>, 李艳<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044; 2. 国网山西省电力公司经济技术研究院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 柔性直流电网故障电流上升速度快与电力电子器件过流能力弱形成突出矛盾, 线路保护需要在数毫秒级完成故障判别, 输电线路精确参数的获取对于提升继电保护的性能至关重要。然而直流系统中缺乏稳定基频, 导致输电线路相关参数难以获取、保护实现较为困难。针对柔性直流线路频变参数难以获取的问题, 提出基于半桥模块化多电平换流器(half bridge modular multilevel converter, HB-MMC)特征信号注入的柔性直流线路频变参数辨识方法。首先通过换流器控制在线路中注入特定频率信号, 然后利用快速傅里叶分解提取不同频率的信号并计算指定频率下的线路参数, 最后依据不同线路参数的频变特性拟合出对应的幅频特性曲线。仿真表明, 所提参数辨识方法可以准确拟合保护所需直流线路频变参数, 参数辨识频段内相对误差小于 1.5%。

**关键词:** 半桥模块化多电平换流器; 特征信号注入; 线路参数计算; 频变参数

## Flexible DC line frequency-dependent parameter identification based on characteristic signal injection with HB-MMC

NIE Ming<sup>1</sup>, HE Jinghan<sup>1</sup>, LI Meng<sup>1</sup>, ZHANG Huiyuan<sup>1</sup>, CHEN Keao<sup>1</sup>, LI Yan<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Economic and Electric Research Institute of State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** The rapid rise of fault current in a flexible DC grid has a prominent contradiction with the weak overcurrent capability of power electronics elements. The DC line protection needs to complete the fault identification in a few milliseconds. Accurate parameter identification of transmission lines is very important in improving the performance of relay protection. However, the lack of a stable fundamental frequency in the DC system makes it difficult to obtain the relevant parameters of the transmission line and to realize the protection principle. There is difficulty in obtaining the frequency-dependent parameters of flexible DC lines. Thus a flexible DC line parameter identification method based on characteristic signal injection with a half-bridge modular multilevel converter (HB-MMC) is presented. By changing the control strategy of the converter, a characteristic signal is injected into the transmission line. Then the signal of different frequencies is extracted by fast Fourier transform and the line parameters at the specified frequencies are calculated. Finally, the corresponding amplitude-frequency characteristic curves are fitted according to the frequency-dependent characteristics of different line parameters. The simulation results show that the proposed parameter identification method can accurately fit the DC transmission line frequency-dependent parameters, and the relative error of the whole parameter identification is less than 1.5%.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52007003).

**Key words:** half bridge modular multilevel converter (HB-MMC); characteristic signal injection; transmission line parameter calculation; frequency-dependent parameter

## 0 引言

基于模块化多电平换流器的柔性直流输电技术

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(52007003); 国家电网有限公司科技项目资助(5200-202256081A-1-1-ZN)

用于直流电网、新能源并网及输送等众多场景, 是构建新型电力系统的重要支撑技术<sup>[1-3]</sup>。然而柔性直流电网故障电流上升速度快, 电力电子过流能力弱, 单一故障处理不当可能导致整个直流系统停运, 因此继电保护是保障系统安全运行的关键<sup>[4-7]</sup>。

目前柔性直流电网工程线路保护配置行波保

护<sup>[8-9]</sup>、电压突变量保护、低电压保护和纵联差动保护<sup>[10]</sup>。但是，现有柔性直流工程中已应用的继电保护方案性能难以相互协调。为了提升保护性能，文献<sup>[11]</sup>提出行波差动保护，考虑行波的衰减常数来解决线路分布电容带来的问题，但是线路精确的衰减常数对保护性能影响较为明显。文献<sup>[12]</sup>提出基于数字孪生的柔性直流线路保护原理，将数字孪生的思路引入到继电保护的研究中，对于解决当前保护“四性”之间的矛盾提供了新的思路，但是数字孪生模型参数获取较为困难。因此，柔性直流输电线路精确频变参数的获取对于提升继电保护的性至关重要。

目前对于线路参数辨识可以分为离线测量法和在线测量计算法<sup>[13-14]</sup>。离线测量法针对被测线路进行适当连接，通过测量电压、电流等基本量计算线路参数<sup>[15]</sup>，其实用性强、易于操作，但是须在试验现场搭建独立的测量电路或者附加电源，操作步骤较多误差偏差较为明显。文献<sup>[16]</sup>利用线路的短路阻抗与开路阻抗测量结果，求解线路的分布参数和等值 $\pi$ 电路参数。离线测量法的主要缺点是线路需要转为停电检修状态，影响系统正常运行。

在线测量计算法是目前国内外学者研究较多的方法。卡森公式(Carson)经典理论方法通过杆塔、导线、地线等几何结构对线路参数进行计算，但是计算过程依赖于各种近似简化，随着电网结构的愈加复杂，其计算精度已无法满足工程需求<sup>[17]</sup>。为了能够有效且快速地进行线路参数辨识，利用 SCADA 数据和 PMU 实测数据的在线测量方法成为近几年的研究重点<sup>[18-20]</sup>。文献<sup>[21]</sup>提出一种基于 WAMS/SCADA 混合量测的非线性电网参数辨识方法，原理较为简单，但是线路模型使用的 $\pi$ 型等效模型，精度略显不足。文献<sup>[22]</sup>提出了一种基于改进无迹卡尔曼滤波的参数辨识方法，引入了量测误差修正量可以进一步提高参数辨识精度，但仅适用于短线路。除利用 PMU 量测之外，有学者提出可利用保护装置故障录波数据进行参数辨识<sup>[23]</sup>。目前针对输电线路参数辨识场景主要集中在交流线路，而在直流线路中研究极少，主要原因是直流系统中缺乏稳定的基频，稳态运行时难以进行参数辨识。

基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)注入特征信号进行直流故障性质判断是目前的一个研究热点<sup>[24-26]</sup>。其基本原理是利用 MMC 的可控特性，通过改变控制策略调整子模块投入数量，产生特定频率的脉冲信号，根据行波反射理论判断故障性质。基于 MMC 注入特征信号研究也为柔性直流线路参数辨识提供了新的思路。

本文提出了基于 MMC 特征信号注入的柔性直流线路参数辨识方法，将 MMC 特征信号主动注入的思路融入直流线路参数辨识研究，获取精确的直流线路频变参数，提升继电保护的性能。首先，利用半桥 MMC(half bridge MMC, HB-MMC)控制特性注入不同频率的特征信号；其次，通过提取不同频率的特征信号来计算相应的线路参数；最后，根据不同频率点的线路参数拟合出继电保护原理需要的频变线路精确参数。本方法利用半桥 MMC 冗余子模块进行特征信号注入，解决了直流系统中没有稳定的基频而导致参数获取困难的问题，提出的柔性直流线路频变参数辨识方法可精确辨识柔性直流线路频变参数，提升继电保护性能。

### 1 HB-MMC 特征信号注入方法

#### 1.1 HB-MMC 拓扑与控制原理

HB-MMC 结构如图 1 所示，其由 6 个桥臂组成，上、下桥臂组合成为一个相单元，每个桥臂中由  $N$  个结构相同的半桥子模块(half bridge sub module, HBSM)和桥臂电感  $L_{arm}$  串联而成。

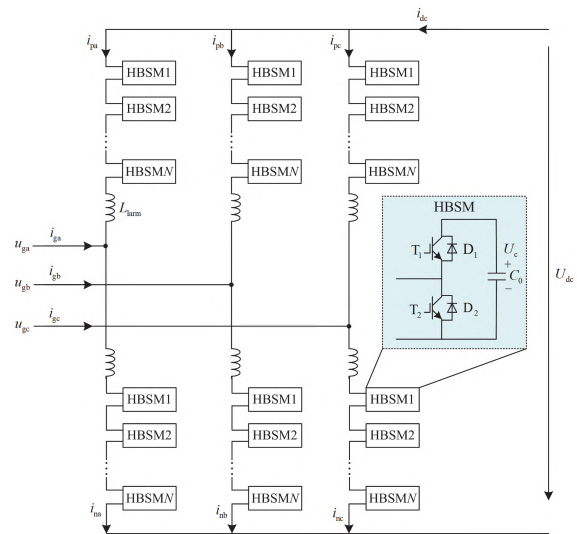


图 1 HB-MMC 拓扑图

Fig. 1 Topology of HB-MMC

HBSM 有闭锁、投入、切除 3 种工作状态，可输出  $U_c$  和 0 两种电压。图 1 中： $i_{dc}$  为直流电流； $U_{dc}$  为直流电压； $i_{p\varphi}$  和  $i_{n\varphi}$  分别为上、下桥臂三相电流； $u_{g\varphi}$  和  $i_{g\varphi}$  分别为换流器交流侧三相电压和电流 ( $\varphi = a, b, c$ )。经典的 HB-MMC 控制策略如图 2 所示。在正常运行状态下，MMC 采用传统的双闭环控制策略，外环定有功功率和定无功功率控制，内环定电流控制，通过一半的子模块电容来维持直流侧电压。

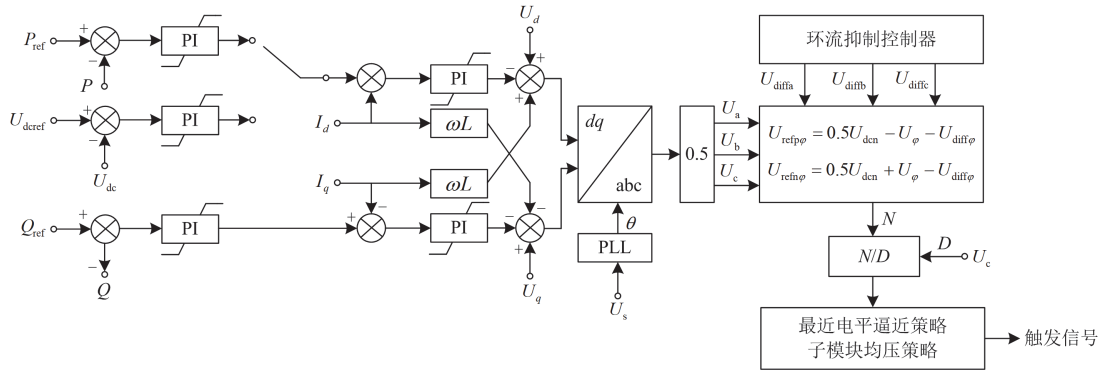


图 2 MMC 控制策略

Fig. 2 MMC control strategy

### 1.2 特征信号产生的原理

若不考虑换流站冗余子模块, 桥臂子模块串联数  $N$ , 直流电压  $U_{dc}$  和额定电容电压  $U_{cN}$  关系为

$$N = U_{dc} / U_{cN} \quad (1)$$

MMC 设计时须考虑调制比  $m = 1$  的运行工况<sup>[27]</sup>, 此时上下桥臂输出的电压变化范围为  $[0, U_{dc}]$ , 相应地每个桥臂投入子模块数量为  $[0, N]$ 。工程设计时针对子模块数量还须考虑一定的裕度, 即为冗余子模块, 其数目记为  $N_{dc}$ 。但是在 MMC 实际运行时, 大多数情况调制比  $m < 1$ , 可计算得出此时每个桥臂需要投入的最大子模块个数  $N_{op}$  为

$$N_{op} = \frac{1+m}{2} N \quad (2)$$

由上述分析可知, 在调制比  $m < 1$  的运行方式下, 桥臂子模块不会被完全利用, 至少有  $N - N_{op}$  个子模块处于闲置状态, 称其为运行冗余子模块  $\Delta N_{op}$ 。因此, 在 MMC 正常运行时, 子模块投入情况如图 3 所示, 冗余子模块总数  $N_{rc}$  为

$$N_{rc} = N_{dc} + \Delta N_{op} \quad (3)$$

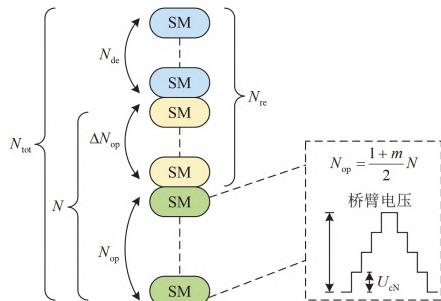


图 3 子模块投入情况示意图

Fig. 3 Sub-module input diagram

工程中, MMC 通常采用最近电平逼近调制策略, 理论上, MMC 输出的电压与调制波电压差控

制在  $(\pm U_c / 2)$  以内。定义直流电压参考值为  $U_{dref}$ , 上、下桥臂需要投入子模块数  $N_{p\phi}(t)$ 、 $N_{n\phi}(t)$  分别为

$$\begin{cases} N_{p\phi}(t) = \frac{N_{op}}{2} - \text{round}\left(\frac{u_{v\phi}^*}{U_{cN}}\right) \\ N_{n\phi}(t) = \frac{N_{op}}{2} + \text{round}\left(\frac{u_{v\phi}^*}{U_{cN}}\right) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\text{round}(x)$  为取与  $x$  最接近的整数函数;  $u_{v\phi}^*$  表示三相的调制波瞬时值。

本文通过控制冗余子模块数量进行特征信号的主动注入, 即控制  $N_{op}$  数量改变桥臂对外等效投入 HBSM 的个数和状态。当每相的上下桥臂同时增加或减少子模块投入数量时, 不会影响最近电平逼近策略对于交流参考波的跟踪, MMC 的交流侧波形将含有特征信号频率的谐波。桥臂中所有子模块利用动态冗余均压策略进行充放电和均压, 若  $N_{op}$  突然增加投入数量  $\Delta N$ , 换流器出口处直流电压表现为电压骤增; 若  $N_{op}$  突然减少投入数量  $\Delta N$ , 换流器出口处直流电压表现为电压骤减。因此通过控制  $N_{op}$  数量即可实现对于直流线路的电压特征信号注入。具体附加控制策略如图 4 所示。

## 2 特征信号的选取

### 2.1 特征信号频率选取

特征信号频率的选取须考虑采样装置、换流器子模块投切控制周期以及工程现场实际的限制。首先, 为减小信号提取的误差, 须将频谱泄露控制在最小, 因此注入特征信号的周期要保证是采样周期的整数倍, 同时注入的特征信号频率要能够反映出线路特征阻抗和衰减系数的变化规律; 其次, 通过控制冗余子模块投切产生的方波频率应当小于保护

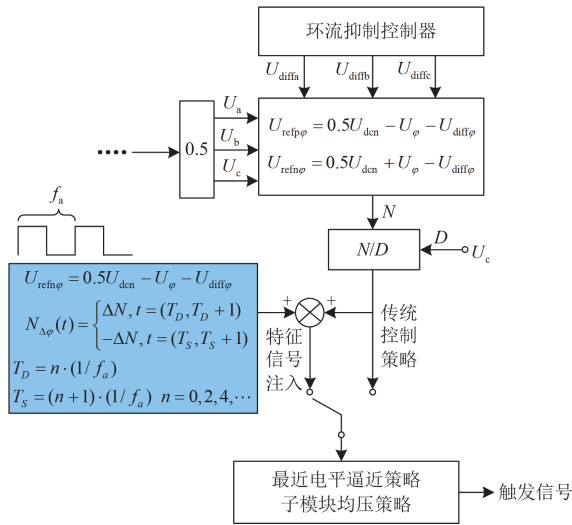


图 4 特征信号注入的附加控制策略示意图

Fig. 4 Additional control strategy of signal injection

的采样频率，并受到子模块投切速度的限制。实际直流工程中，保护采样频率为 10~50 kHz，常见的 MMC 子模块投切控制周期通常为 100 μs。以 10 kHz 采样频率为例，根据香农采样定理，保护装置能够正确分辨的最高信号频率为 5000 Hz，为了便于后续分析，本文将 [0,100] Hz 划分为低频段，将 [100, 5000] Hz 划分为高频段。

### 2.2 特征信号幅值选取

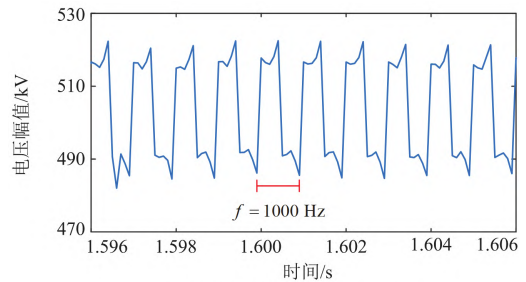
注入特征信号幅值受冗余子模块比例的限制，应该兼顾检测装置、电力系统冲击和换流站中电力电子器件耐受能力的要求，因此对特征信号幅值有严格限制。同时为了满足后文参数辨识精度的需求，线路注入特征信号的幅值相对越大，越利于特征信号的检测提取与频谱分析。35 kV 及以上电网电压的允许偏差范围是额定电压的 ±10%，考虑到换流器中桥臂冗余子模块数通常是普通子模块的 10%~20%，本文在后续仿真中注入特征信号的幅值设定为直流额定电压的 5%。

### 2.3 特征信号识别

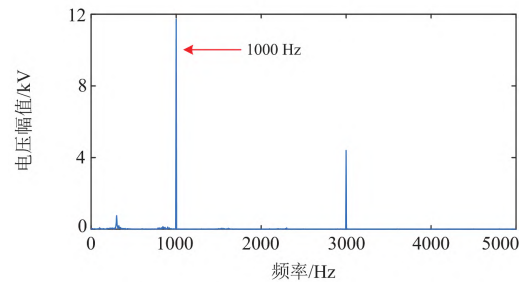
为了提取特征信号的幅值与相位，目前有小波变换、Prony 算法、离散傅里叶变换(discrete fourier transform, DFT)和快速傅里叶变换(fast fourier transform, FFT)等多种信号提取方法。其中，小波变换可以反映信号的时变特性，但是不能提供相位信息；Prony 算法可以描述信号的瞬态特性，包括幅值和相位，但是其受噪声干扰及精确模型阶数影响较为严重；离散傅里叶变换将时域信号的采样变换为在离散时间傅里叶变换频域的采样，其可以较准确地描述信号的幅值和相位，但是运算量较大，

占用计算资源较多；快速傅里叶变换根据 DFT 的奇、偶、虚、实等特性对其进行改善，减少了数字系统中乘法及加法的次数，具有计算速度快、复杂度低的优势。

本文利用 FFT 算法从线路两侧的量测数据中提取特征信号的幅值和相位，进行后续的线路参数辨识。若采样频率为  $f_s$ ，采样间隔为  $t_s$ ，FFT 算法需要的采样点数为  $N$ ，则  $N \cdot t_s$  为加窗傅里叶的窗长，频率分辨率  $\Delta f = f_s / N$ 。窗长如果足够短，则可以不考虑子模块电容充放电带来的影响，认为特征频率信号幅值恒定不衰减；窗长如果足够长，频率分辨率越精确。为了抑制频谱泄露的现象，特征信号频率必须为频率分辨率的整数倍，即窗长为可变窗长。以 1000 Hz 特征信号注入为例，得到线路两侧测量数据频谱分析信息，如图 5 所示。因直流侧滤波电感，使得特征信号发生畸变，但是从频谱分析图 5(b)中可以看出特征信号频段幅值较高，易于提取，不会对后续计算造成影响。



(a) 特征信号注入后线路电压波形



(b) 特征信号注入后线路电压频谱分析图

图 5 特征信号注入后的线路电压及频谱分析图

Fig. 5 Line voltage and spectrum analysis after characteristic signal injection

## 3 柔性直流线路参数辨识方法

柔性直流线路缺少稳定的基频，常规的交流输电线路参数辨识方法难以适用。本章通过分析不同线路模型参数计算方法的精确程度以及适用范围，最后提出适用于柔性直流线路的频变参数辨识方法。

### 3.1 均匀传输线分布参数模型

均匀传输线指线路的几何尺寸及媒质的电磁性能是均匀的, 反映传输线电磁过程的电路参数都是均匀分布于传输线上。在某一微元上的电路模型如图 6<sup>[28]</sup>所示。其中:  $U(0,t)$ 、 $U(l,t)$ 、 $I(0,t)$ 、 $I(l,t)$  分别为线路两端的电压和电流;  $U(x,t)$ 、 $U(x+\Delta x,t)$ 、 $I(x,t)$ 、 $I(x+\Delta x,t)$  分别为线路中一微元长度线路两侧的电压和电流,  $x$  为线路上观测点位置;  $\Delta x$  为一微元长度线路;  $L$  为输电线路全长;  $R_0$ 、 $L_0$ 、 $G_0$ 、 $C_0$  分别为单位长度线路的电阻、电感、电导和电容。电压、电流行波在传输线上的表达式可以用电报方程来表示。

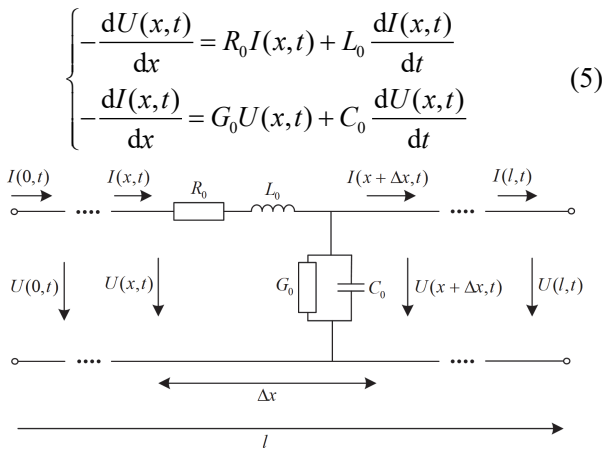


图 6 均匀传输线电路模型

Fig. 6 Circuit model of uniform transmission lines

根据不同的初始条件和边界条件, 通过式(5)可以确定唯一的电压和电流, 但是时域求解较为困难, 因此利用拉普拉斯变换将式(5)转化为频域求解。

$$\begin{cases} -\frac{dU(x,s)}{dx} = (R_0 + sL_0)I(x,s) \\ -\frac{dI(x,s)}{dx} = (G_0 + sC_0)U(x,s) \end{cases} \quad (6)$$

通过对式(6)中变量  $x$  求解二阶导数, 并将线路边界条件代入, 可得均匀传输线分布参数模型。

$$\begin{bmatrix} U(0,s) \\ I(0,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_c \sinh(\gamma l) \\ \frac{\sinh(\gamma l)}{Z_c} & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U(l,s) \\ I(l,s) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $Z_c$  为线路特征阻抗,  $Z_c = \sqrt{(R_0 + sL_0)/(G_0 + sC_0)}$ ;  $\gamma$  为线路传播常数,  $\gamma = \sqrt{(R_0 + sL_0) \cdot (G_0 + sC_0)}$ ;  $s$  为负数变量,  $s = j\omega$ ;  $l$  为传输线路全长。

### 3.2 含修正系数的分布参数简化模型

分布参数输电线路数学模型符合对称二端口网

络特点, 可以看成对称无源二端口, 因此可用  $\pi$  型等值电路来进行简化<sup>[29]</sup>, 如图 7 所示。

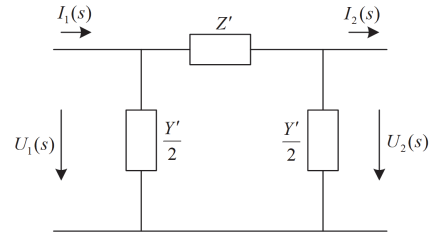


图 7  $\pi$  型等值电路

Fig. 7 The  $\pi$  equivalent circuit

设线路两侧的电压和电流分别为  $U_1(s)$ 、 $U_2(s)$  和  $I_1(s)$ 、 $I_2(s)$ , 线路阻抗和容抗分别为  $Z'$  和  $Y'$ , 端口电压方程表示为

$$U_1(s) = (Z' \frac{Y'}{2} + 1)U_2(s) + Z'I_2(s) \quad (8)$$

将式(7)与式(8)对比可得

$$Z' = Z_c \sinh(\gamma l) = \frac{\sinh(\gamma l)}{\gamma l} \cdot (R_0 + sL_0)l \quad (9)$$

$$Y' = \frac{2(\cosh(\gamma l) - 1)}{Z_c \sinh(\gamma l)} = \frac{\tanh(\gamma l / 2)}{\gamma l / 2} \cdot (G_0 + sC_0)l \quad (10)$$

对式(9)、式(10)中的双曲函数进行泰勒展开, 为了方便计算, 将线路的电导  $G_0$  计为 0, 电容  $C_0$  计为固定值, 可得含修正系数的分布参数简化模型。

$$U_1(s) - U_2(s) = \left( I_1(s) - U_1(s) \frac{sk_c C_0}{2} \right) (k_r R_0 + sk_l L_0) \quad (11)$$

$$I_1(s) - I_2(s) = U_1(s) \frac{sk_c C_0}{2} + U_2(s) \frac{sk_c C_0}{2} \quad (12)$$

式中,  $k_r$ 、 $k_l$ 、 $k_c$  分别为  $R_0$ 、 $L_0$ 、 $C_0$  的修正系数。

通过计算式(11)和式(12), 可求解出考虑修正系数的线路分布参数简化模型的单位长度电阻和电感。

### 3.3 柔性直流线路频变参数辨识方法

含修正系数的分布参数简化模型利用  $\pi$  型等值电路对传统分布参数模型进行简化, 通过增加修正系数校准电阻和电感值。当线路频率较低时, 经过修正后的电阻和电感值具有较高精度, 分布电容影响较小; 但是随着频率升高, 含修正系数的分布参数简化模型因忽略了线路分布电容的影响, 所以造成较大参数辨识误差。因此提出一种考虑分布电容影响的输电线路参数辨识方法, 不会受到高频信号的影响, 从而进行柔性直流线路频变参数辨识。

对式(7)进行变形, 可以得到

$$\begin{bmatrix} U(l,s) \\ I(l,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & -Z_c \sinh(\gamma l) \\ -\frac{\sinh(\gamma l)}{Z_c} & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U(0,s) \\ I(0,s) \end{bmatrix} \quad (13)$$

联立式(7)和式(13), 可得

$$U_1(s) - U_2(s) = (U_2(s) - U_1(s)) \cosh(\gamma l) + Z_c \sinh(\gamma l) (I_2(s) + I_1(s)) \quad (14)$$

$$I_1(s) - I_2(s) = (I_2(s) - I_1(s)) \cosh(\gamma l) + \frac{U_2(s) + U_1(s)}{Z_c} \sinh(\gamma l) \quad (15)$$

$$U_1(s) + U_2(s) \frac{I_2(s)}{I_1(s)} = \left( U_2(s) + U_1(s) \frac{I_2(s)}{I_1(s)} \right) \cosh(\gamma l) \quad (16)$$

对式(14)一式(16)进行消元, 可得出特定频率下的特征阻抗  $Z_c(s)$ 、传播常数  $\gamma(s)$  与衰减常数  $A(s)$  为

$$Z_c(s) = \sqrt{\frac{(U_1(s) + U_2(s))(U_1(s) - U_2(s))}{(I_1(s) + I_2(s))(I_1(s) - I_2(s))}} \quad (17)$$

$$\gamma(s) = \operatorname{arccosh} \left( \frac{U_1(s)I_1(s) + U_2(s)I_2(s)}{U_2(s)I_1(s) + U_1(s)I_2(s)} \right) / l \quad (18)$$

$$A(s) = e^{-\gamma l} \quad (19)$$

提取特定频率下线路两端电压、电流信号, 通过式(17)一式(19)可以计算出精确的特征阻抗、传播常数和衰减常数。由于输电线路和大地在交变电磁场作用下会产生高频集肤效应, 线路分布参数会随频率变化, 特征阻抗与传播常数成为频变参数。

选择一个线性网络使其具有  $Z_c(s)$  的频率特性属于网络综合问题, 用部分分式和的形式来表示特征阻抗, 就可以通过 RLC 元件来表达  $Z_c(s)$ 。

$$Z_c(s) = H \frac{(s + z_1)(s + z_2) \cdots (s + z_r)}{(s + p_1)(s + p_2) \cdots (s + p_i)} \quad (20)$$

式中,  $H$  为频率取无穷大时特征阻抗的值,  $H = \sqrt{L_0 / C_0}$ 。将式(20)改写为部分分式和的形式, 如式(21)所示。

$$Z_c(s) = k_0 + \frac{k_1}{s + p_1} + \cdots + \frac{k_i}{s + p_i} \quad (21)$$

式中: 常数项  $k_0 = \lim_{s \rightarrow \infty} Z_{eq}(s) = H$ ;  $k_i$  为第  $i$  项的留数;  $p_i$  为第  $i$  项的极点。常数项  $k_0$  直接对应于电阻  $R_{s0}$ , 其余各项均是并联阻容回路的复频域函数, 则第  $i$  个回路可以表示为

$$\frac{k_i}{s + p_i} \Rightarrow \frac{R_{si} \cdot \frac{1}{sC_{si}}}{R_{si} + \frac{1}{sC_{si}}} = \frac{1}{s + \frac{1}{R_{si}C_{si}}} \quad (22)$$

式中,  $R_{si}$  和  $C_{si}$  分别为组成部分分式中各项的电阻、电容元件。其含义表示为

$$\begin{cases} R_{si} = \frac{1}{p_i \cdot C_{si}} = \frac{k_i}{p_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \\ C_{si} = \frac{1}{k_i} \end{cases} \quad (23)$$

特征阻抗可以通过电阻和电容表示为如图 8 所示的等值网络, 该等值网络可以满足特征阻抗的边界条件: 当频率接近 0 时, 电容近似为开路, 特征阻抗体现为所有电阻的串联; 当频率接近无穷大时, 电容近似于短路, 特征阻抗约等于  $R_{s0}$ 。

$$\begin{cases} Z_c(0) = R_{s0} + R_{s1} + R_{s2} + \cdots + R_{si} \\ Z_c(s)|_{s \rightarrow \infty} = R_{s0} \end{cases} \quad (24)$$

式中:  $Z_c(0)$  为频率为 0 时的特征阻抗值;  $Z_c(s)|_{s \rightarrow \infty}$  为频率接近无穷大时的特征阻抗值。

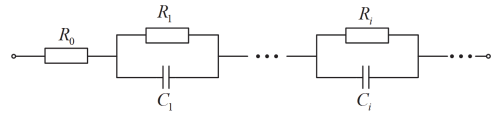


图 8 特征阻抗等值网络图

Fig. 8 Characteristic impedance equivalent network

从上述分析可知, 特征阻抗值随频率升高呈现单调减小的趋势。因此, 通过多次注入不同频率的特征信号计算出不同频率下的特征阻抗, 利用线性插值方法拟合出全频域下的特征阻抗。传播常数的分析方法同特征阻抗。柔性直流线路频变参数辨识方法流程如图 9 所示。

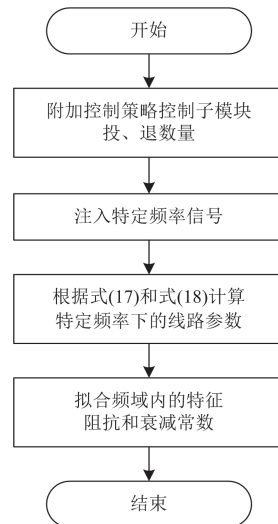


图 9 基于主动注入的柔性直流线路参数辨识流程图

Fig. 9 Flow chart of flexible DC line parameter identification based on active injection

### 4 仿真验证

在仿真软件 PSCAD 中搭建如图 10 所示的两端真双极柔性直流输电系统, 换流器均为 HB-MMC 模型, 直流线路为频变参数模型, 采样频率为 10 kHz。每个桥臂的子模块总数为 200 个, 系统参数见表 1。

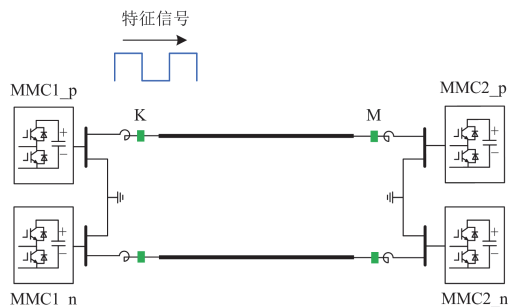


图 10 两端真双极柔性直流输电系统仿真示意图

Fig. 10 Simulation schematic diagram of two-terminal bipolar flexible HVDC transmission system

表 1 柔性直流输电系统主要参数

Table 1 Main parameters of flexible HVDC system

元件参数名称	参数值
MMC 额定容量/MVA	1500
线路长度/km	200
交流系统电压/kV	525
直流系统电压/kV	±500
桥臂子模块数量/个	200
桥臂电抗值/mH	100
子模块电容值/mF	10
子模块投切周期/ $\mu$ s	100

#### 4.1 柔性直流线路频变参数辨识方法

通过调整 MMC1\_p 和 MMC1\_n 的控制策略, 向线路 KM 注入特定频率的特征信号, 根据本文所提参数辨识策略计算不同频率下的特征阻抗值。

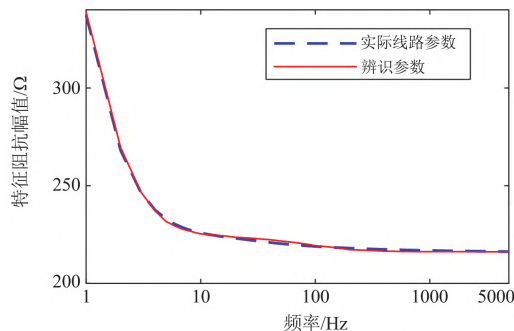
不同频率下的特征阻抗辨识结果和实际值对比如表 2 所示。针对特征阻抗的计算, 本文所提参数辨识方法从低频段到高频段均具有较好的精度。

表 2 不同频率特征阻抗辨识结果

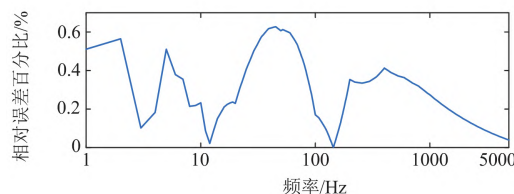
Table 2 Characteristic impedance identification results of different frequencies

频率/Hz	辨识对象	实际幅值/ $\Omega$	辨识幅值/ $\Omega$	误差/%
10	线模	225.9	225.4	0.2
	地模	436.7	431.7	1.1
100	线模	219.0	219.3	0.2
	地模	399.1	402.8	0.9
1000	线模	216.9	216.3	0.3
	地模	383.8	381.6	0.6
2000	线模	216.6	216.3	0.2
	地模	378.8	378.6	0.1

线模和地模的全频域特征信号拟合结果如图 11、图 12 所示。可以看出, 无论是线模特征阻抗拟合还是地模特征阻抗拟合, 利用本文所提参数辨识方法得到的特征阻抗幅频特性曲线与实际线路真实



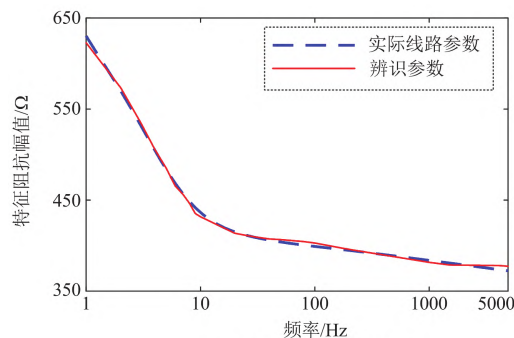
(a) 幅频特性曲线对比图



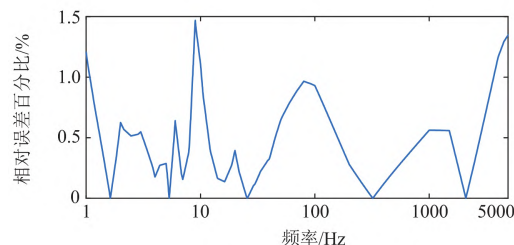
(b) 相对误差频率分布图

图 11 线模特征阻抗参数辨识结果

Fig. 11 Parameter identification results of line mode characteristic impedance



(a) 幅频特性曲线对比图



(b) 相对误差频率分布图

图 12 地模特征阻抗参数辨识结果

Fig. 12 Parameter identification results of ground mode characteristic impedance

值基本一致，曲线趋势相同，各个频段的参数相对误差低于 1.5%，拟合精度较好。

#### 4.2 衰减常数辨识精度分析

通过调整 MMC1\_p 和 MMC1\_n 的控制策略，向线路 KM 注入特定频率的特征信号，根据本文所提参数辨识策略计算不同频率下的衰减常数值。

不同频率的部分衰减常数辨识结果和实际值对比如表 3 所示。针对衰减常数的计算，本文所提参数辨识方法从低频段到高频段均具有较好的精度。

表 3 不同频率衰减常数辨识结果

Table 3 Attenuation constants identification results of different frequencies

频率/Hz	辨识对象	实际幅值/ $\Omega$	辨识幅值/ $\Omega$	误差/%
10	线模	0.995	0.994	0.1
	地模	0.990	0.989	0.2
100	线模	0.991	0.992	0.1
	地模	0.979	0.980	0.1
1000	线模	0.978	0.977	0.2
	地模	0.868	0.869	0.1
2000	线模	0.970	0.970	0.1
	地模	0.757	0.754	0.3

线模和地模的全频域衰减常数拟合结果如图 13、图 14 所示。可以看出，无论是线模衰减常数拟合还是地模衰减常数拟合，利用本文所提参数辨识方法得到的衰减常数幅频特性曲线与实际线路真实值基本一致，曲线趋势相同，各个频段的参数相对误差低于 1.5%，拟合精度较好。

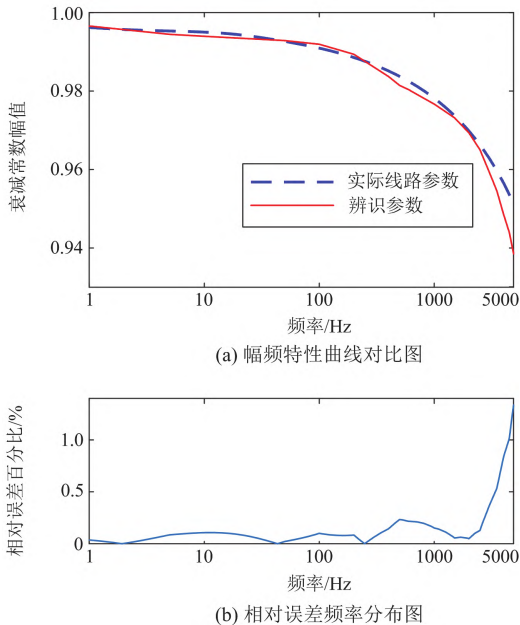


图 13 线模衰减常数参数辨识结果

Fig. 13 Parameter identification results of line mode attenuation constants

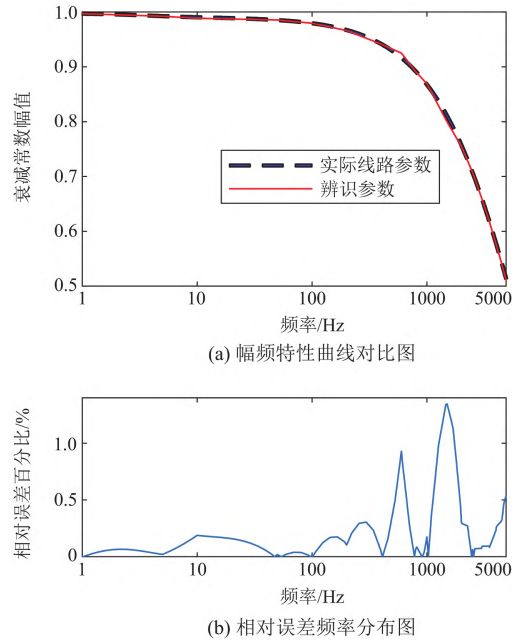


图 14 地模衰减常数参数辨识结果

Fig. 14 Parameter identification results of ground mode attenuation constants

#### 4.3 本文所提参数辨识方法与现有方法对比分析

使用本文所提参数辨识策略与含修正系数的分布参数简化模型辨识方法，计算不同频率下的特征阻抗与衰减常数值，两种参数辨识方法的计算精度结果如图 15—图 18 所示。

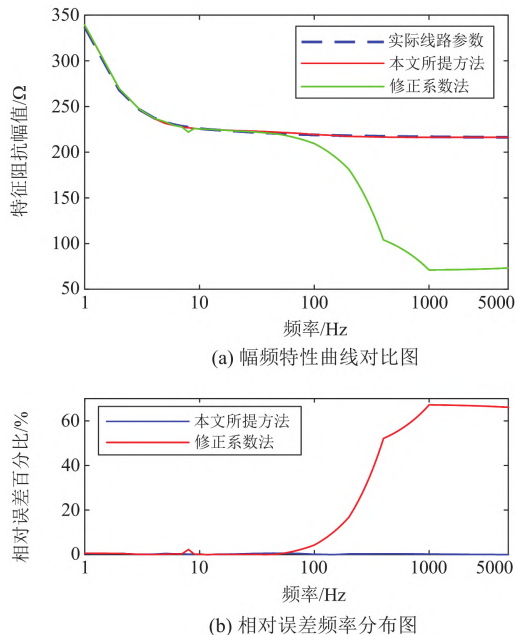
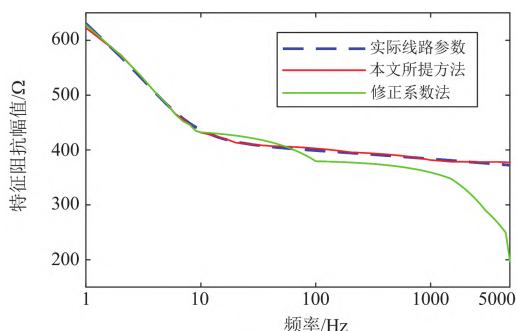


图 15 线模特征阻抗对比结果

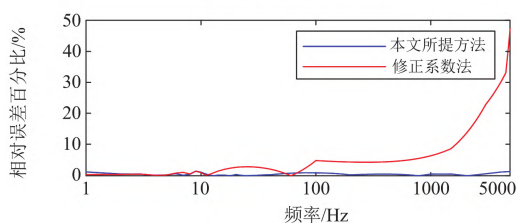
Fig. 15 Comparison results of line mode characteristic impedance



可以看出, 对于特征阻抗的拟合, 现有含修正系数的分布参数简化模型辨识方法在低频阶段尚有一定的精度, 随着频率逐渐升高相对误差逐步增大, 误差最高可达 60%。对于衰减常数的拟合, 含修正系数的分布参数简化模型辨识方法在整个频段范围内辨识精度均不高, 误差最大可到 60%。



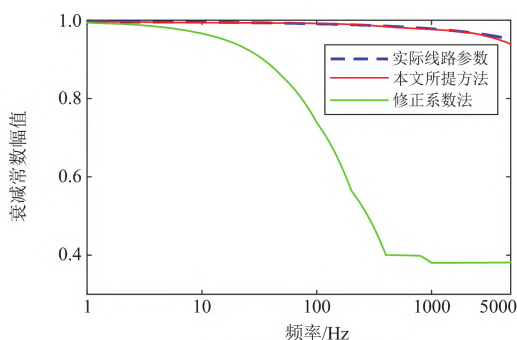
(a) 幅频特性曲线对比图



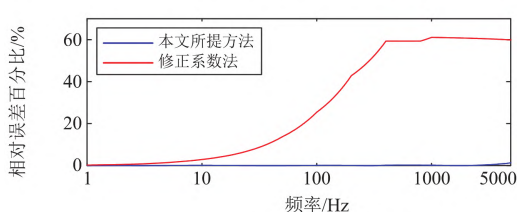
(b) 相对误差频率分布图

图 16 地模特征阻抗对比结果

Fig. 16 Comparison results of ground mode characteristic impedance



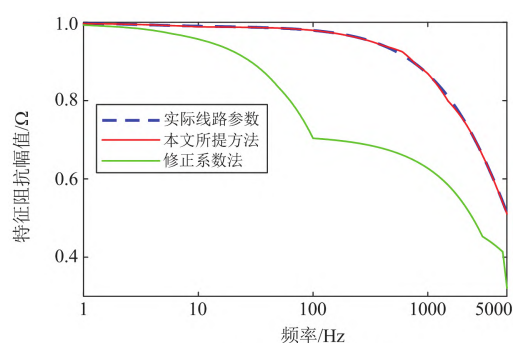
(a) 幅频特性曲线对比图



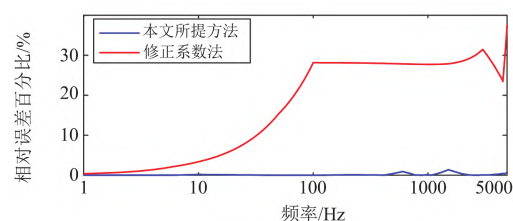
(b) 相对误差频率分布图

图 17 线模衰减常数对比结果

Fig. 17 Comparison results of line mode attenuation constants



(a) 幅频特性曲线对比图



(b) 相对误差频率分布图

图 18 地模衰减常数对比结果

Fig. 18 Comparison results of ground mode attenuation constants

本文所提基于 MMC 特征信号注入的柔性直流线路参数辨识方法对于特征阻抗和衰减常数的辨识均具有较高精度。无论是低频段还是高频段, 本文所提方法计算的线路参数与实际线路参数之间的相对误差均小于 1.5%。

## 5 结论

针对直流系统中缺乏稳定基频, 刻画输电线路物理特性的相关参数难以获取且保护难以实现等问题, 将 MMC 主动注入的思路引入到参数辨识研究中, 提出了基于半桥 MMC 特征信号注入的柔性直流线路频变参数辨识方法。所提参数辨识方法优点包括: 本文所提基于半桥 MMC 进行特征信号注入方法, 相较于现有全桥 MMC 和混合型 MMC 的特征信号注入法, 节省了大量的电力电子器件成本, 更易于工程实现; 可准确拟合出直流线路模态下特征阻抗与衰减常数幅频特性曲线, 经仿真验证, 整个参数辨识频段内相对误差均小于 1.5%, 具有较高的精度。

## 参考文献

- [1] 罗炜, 谢超, 陈培龙. 柔直系统直流电压测量值偏高影响分析及对策研究[J]. 高压电器, 2022, 58(3): 133-139. LUO Wei, XIE Chao, CHEN Peilong. Analysis of the influence factors of high DC voltage measurement value in flexible HVDC system and their countermeasures[J].

- High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 133-139.
- [2] 余潇, 卜广全, 王姗姗. 风电经柔直孤岛送出交流暂态过电压抑制策略研究[J]. 发电技术, 2022, 43(4): 618-625.  
YU Xiao, BU Guangquan, WANG Shanshan. Research on transient AC overvoltage suppression strategy of islanded wind power transmission via VSC-HVDC[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(4): 618-625.
- [3] 张烜一, 江修波, 郑文迪, 等. 基于电阻耗能支路的MMC-HVDC 线路故障清除与重启恢复策略[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(6): 67-76.  
ZHANG Xuanyi, JIANG Xiubo, ZHENG Wendi, et al. MMC-HVDC line fault clearing and restart recovery strategy based on the resistance energy-consuming branch[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(6): 67-76.
- [4] 吴嘉玲, 卢铁兵. 柔性直流电网结构对单极接地故障过电压的影响[J]. 中国电力, 2021, 54(10): 20-27.  
WU Jialing, LU Tiebing. Influence of the VSC-HVDC system structure on the overvoltage of single-pole grounding fault[J]. Electric Power, 2021, 54(10): 20-27.
- [5] 高飘, 郑晓冬, 晁晨翔, 等. 基于控制特征量响应的多端柔性直流输电线路保护[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(5): 122-136.  
GAO Piao, ZHENG Xiaodong, CHAO Chenxu, et al. Protection for multi-terminal flexible DC transmission lines based on response of control characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(5): 122-136.
- [6] 刘晓明, 谭祖颀, 袁振华, 等. 柔性直流接入海上风电并网选址综合优化[J]. 发电技术, 2022, 43(6): 892-900.  
LIU Xiaoming, TAN Zukuang, YUAN Zhenhua, et al. Comprehensive optimization of access point selection for offshore wind farm integrated with voltage source converter high voltage direct current[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(6): 892-900.
- [7] 朱占春, 闻生学, 唐金锐, 等. 计及配电线路参数影响的有源消弧算法分析与改进[J]. 中国电力, 2021, 54(3): 149-158.  
ZHU Zhanchun, WEN Shengxue, TANG Jinrui, et al. Analysis and improvement of active arc suppression algorithm considering effect of distribution line parameters[J]. Electric Power, 2021, 54(3): 149-158.
- [8] 李斌, 毛琦扬, 何佳伟, 等. 基于重合直流断路器残余电流开关的柔性直流电网故障测距[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 140-148.  
LI Bin, MAO Qiyang, HE Jiawei, et al. Fault location for flexible DC grid based on reclosing residual current breaker of DC circuit breaker[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 140-148.
- [9] 陈田田, 李银红. 基于电压折射波幅值正负差异的柔性直流电网两段式行波保护[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(3): 129-136.  
CHEN Tiantian, LI Yinhong. Two-section traveling wave protection for flexible DC grid based on positive and negative difference of voltage refractive wave amplitude[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 129-136.
- [10] 宋国兵, 陶然, 李斌, 等. 含大规模电力电子装备的电力系统故障分析与保护综述[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 2-12.  
SONG Guobing, TAO Ran, LI Bin, et al. Survey of fault analysis and protection for power system with large scale power electronic equipments[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 2-12.
- [11] LI Botong, LÜ Mingrui, LI Bin, et al. Research on an improved protection principle based on differential voltage traveling wave for VSC-HVDC transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(5): 2319-2328.
- [12] 李猛, 聂铭, 和敬涵, 等. 基于数字孪生的柔性直流电网纵联保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1773-1783.  
LI Meng, NIE Ming, HE Jinghan, et al. Pilot protection of flexible DC grid based on digital twin[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1773-1783.
- [13] 梁志瑞, 牛胜锁, 靳楠. 交流输电线路参数测量现状及发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 181-191.  
LIANG Zhirui, NIU Shengsuo, JIN Nan. Current status and development trend of AC transmission line parameter measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 181-191.
- [14] 潘雪. 输电线路参数在线计算方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.  
PAN Xue. Transmission line parameter online calculating method research[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [15] 梁志瑞, 杨子强. 电网输电线路工频参数测量系统的研究[J]. 电网技术, 2001, 25(3): 34-37.  
LIANG Zhirui, YANG Ziqiang. Study parameters power transmission line frequency measurement system[J]. Power System Technology, 2001, 25(3): 34-37.
- [16] 肖遥, 李谢森, 马赛, 等. 输电线路分布参数测量方法的改进[J]. 南方电网技术, 2012, 6(3): 22-27.  
XIAO Yao, LI Shusen, MA Sai, et al. The improvement of distribution parameters measurement of transmission lines[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(3): 22-27.

- [17] HOFMANN L. Series expansions for line series impedances considering different specific resistances, magnetic permeabilities, and dielectric permittivities of conductors, air and ground[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(2): 564-570.
- [18] 丁蓝, 欧智乐, 汤致凯, 等. 输电线路参数辨识的影响因素研究[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1948-1953.  
DING Lan, OU Zhile, TANG Zhikai, et al. Research on factors influencing identification of transmission line parameters[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1948-1953.
- [19] 余高旺, 方陈, 樊占峰, 等. 基于汉宁窗的配电网同步相量测量装置算法及应用[J]. 中国电力, 2022, 55(6): 18-24.  
YU Gaowang, FANG Chen, FAN Zhanfeng, et al. Research and application of algorithm for distribution network synchronous phasor measurement unit based on Hanning window[J]. Electric Power, 2022, 55(6): 18-24.
- [20] 李亚光, 李蒙. 基于深度小世界神经网络的风电机组异常检测[J]. 发电技术, 2021, 42(3): 313-321.  
LI Yaguang, LI Meng. Anomaly detection of wind turbines based on deep small-world neural network[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(3): 313-321.
- [21] 陈晓刚, 易永辉, 江全元, 等. 基于 WAMS/SCADA 混合量测的电网参数辨识与估计[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(5): 1-5.  
CHEN Xiaogang, YI Yonghui, JIANG Quanyuan, et al. Network parameter identification and estimation based on hybrid measurement of WAMS/SCADA[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(5): 1-5.
- [22] 杨韬, 罗萍萍, 龚锦霞, 等. 基于改进无迹卡尔曼滤波的短线路同杆并架双回线参数辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 36-45.  
YANG Tao, LUO Pingping, GONG Jinxia, et al. Parameter identification of short parallel double-lines based on a modified unscented Kalman filter[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 36-45.
- [23] WANG Y, XU W. Algorithms and field experiences for estimating transmission line parameters based on fault record data[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2015, 9(13): 1773-1781.
- [24] 蔡普成, 向往, 周猛, 等. 基于混合型 MMC 主动信号注入的直流故障自适应重合闸方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3867-3878.  
CAI Pucheng, XIANG Wang, ZHOU Meng, et al. Research on adaptive reclosing of DC fault based on active signal injected by hybrid MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3867-3878.
- [25] 陈静, 赵涛, 徐友, 等. 一种适用于少子模块 MMC 的混合调制策略[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 186-192.  
CHEN Jing, ZHAO Tao, XU You, et al. A hybrid modulation strategy suitable for MMC with small quantities of sub-modules[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 186-192.
- [26] 夏长江, 韩民晓, 耿治, 等. MMC 子模块故障后线电压恢复容错控制策略[J]. 电力工程技术, 2021, 40(4): 2-9.  
XIA Changjiang, HAN Minxiao, GENG Zhi, et al. Fault-tolerant control strategy of line voltage recovery after MMC sub-modules fault[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(4): 2-9.
- [27] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [28] 李鹏, 刘玢岩, 习伟, 等. 基于模型参数辨识的串联补偿输电线路纵联保护原理[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 20-28.  
LI Peng, LIU Binyan, XI Wei, et al. Pilot protection principle based on model parameter identification for a series compensated transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 20-28.
- [29] 张江南, 雷江龙, 贺勇, 等. 基于 PMU 误差校正的输电线路参数在线辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 130-137.  
ZHANG Jiangnan, LEI Jianglong, HE Yong, et al. Transmission line parameter identification method based on PMU error correction[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 130-137.

收稿日期: 2023-05-07; 修回日期: 2023-07-19

作者简介:

聂 铭(1996—), 男, 博士研究生, 研究方向为直流电网继电保护技术; E-mail: mingnie@bjtu.edu.cn

和敬涵(1964—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为交直流电网保护; E-mail: jhhe@bjtu.edu.cn

李 猛(1986—), 男, 通信作者, 副教授, 研究方向为直流电网继电保护。E-mail: mengli@bjtu.edu.cn

(编辑 张 颖)