

考虑直流线路参数频变效应的HVDC系统小信号建模

樊玮¹, 周盛宇^{2,3}, 陈德扬¹, 秦颖婕¹, 刘宇¹, 汪娟娟²

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广州 510600; 2. 华南理工大学电力学院, 广州 510641; 3. 广东电网有限责任公司东莞供电局, 广东 东莞 523008)

摘要: 高压直流输电在我国电力资源的协调分配中起到十分关键的作用, 保证其稳定运行意义重大。目前高压直流系统小扰动稳定性的研究热点主要集中在换流器的建模上, 而输电线路的建模仅用集中参数进行等效, 但集中参数模型并不能准确反映输电线路在高频段的谐波传递特性。首先提出了一种考虑频变特性的架空线分布参数模型, 该模型通过消去地线效应和极间耦合效应得到简化, 接着将该模型应用于高压直流系统的交流侧导纳模型中, 最后在PSCAD/EMTDC仿真实验平台上验证了所提架空线频变分布参数模型的正确性和有效性。

关键词: 输电线路模型; 频率特性; 高压直流; 分布参数

Small Signal Modeling of HVDC System Considering the Frequency Dependent Effect of DC Line Parameters

FAN Wei¹, ZHOU Shengyu^{2,3}, CHEN Deyang¹, QIN Yingjie¹, LIU Yu¹, WANG Juanjuan²

(1. Power Dispatching and Control Center, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China; 2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 3. Dongguan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Dongguan, Guangdong 523008, China)

Abstract: High voltage direct current transmission plays a crucial role in the coordinated allocation of power resources in China, and ensuring its stable operation is of great significance. At present, the research hotspot on small disturbance stability of high voltage direct current systems mainly focuses on the modeling of inverters, while the modeling of transmission lines only uses centralized parameters for equivalence. However, centralized parameter models cannot accurately reflect the harmonic transmission characteristics of transmission lines in the high-frequency range. Firstly a distributed parameter model for overhead lines that considers frequency variation characteristics is proposed, which is simplified by eliminating ground wire effects and inter pole coupling effects. Then, the model is applied to the AC side admittance model of high-voltage DC systems. Finally, the correctness and effectiveness of the proposed model is verified on the PSCAD/EMTDC simulation experimental platform.

Key words: transmission line model; frequency characteristic; high voltage direct current; distributed parameters

0 引言

我国经济发展日新月异, 对能源的需求日益增

大, 但负荷中心却与能源产地呈逆向分布^[1]。为了实现电力资源的协调分配, 适用于长距离、大容量输电的高压直流 (high voltage direct current, HVDC) 输电技术脱颖而出, 成为我国电力系统中不可缺少的一环, 确保高压直流输电工程的稳定运行具有重要意义^[2-5]。

研究HVDC系统在小扰动冲击下的稳定性能, 需要建立其准确的小信号模型, 模型的精度对稳定性分析结果有重大影响。HVDC系统主要由换流

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52277102); 中国南方电网有限责任公司科技项目资助(036000KK52220004(GDKJXM20220147))。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52277102); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (036000KK52220004(GDKJXM20220147)).

器、交直流输电线路、滤波器组、平波电抗器以及控制回路等构成。其中滤波器等线性元件的数学模型简单,能够根据电气结构快速获得,研究热点主要集中在换流器的建模上,但输电线路的模型往往被忽视,仅使用集中参数模型进行等效建模。集中参数模型以线路的基频参数为基准,由 R 、 L 、 C 元件构成 π 或 τ 形级联线路,可准确反映线路的基频特性。文献[6-8]在研究常规直流输电系统、柔性直流输电系统以及混合直流输电系统的小扰动稳定性时均使用了集中参数模型。然而,该模型具有局限性:一方面,导体在交流电作用下存在集肤效应和邻近效应,使得其电阻及电感呈现出频率相关特性,因此使用定值研究输电线路在不同频率下的谐波传递特性是不合理的^[9];另一方面,当输电线路的长度足够长时,分布参数特性十分显著^[10]。因此,当需要研究 HVDC 系统的小信号稳定性时,仅使用基频参数计算得到的集中参数模型不足以准确刻画谐波在长距离输电线路中的传播特性,会降低分析结果的准确性^[11]。

分布参数模型中又可分为贝杰龙模型和频变分布参数模型。贝杰龙模型考虑了长距离输电线路的分布参数特性,但是单位长度电气参数仍然使用基频下的定值^[12]。文献[13]改进了贝杰龙模型,使其暂态计算结果与频变模型误差更小,但是仍有一定差距。频变分布参数模型是目前最准确的模拟输电线路的模型。文献[14-15]讨论了单芯电缆频变参数不同计算方法之间的差异以及适用范围,并推广应用到三芯电缆上。文献[16-18]使用电磁暂态仿真软件的计算结果对电阻和电感的频变曲线进行拟合,但是导线型号或者排列分布方式发生变化时原有拟合结果将不再适用,方法的通用性较差。文献[19-20]使用分布参数模型研究了线路本身的暂态特性,并没有关注整个高压直流系统的谐振特性。

本文提出了一种考虑频变特性的架空线分布参数模型,该模型消去了地线效应和极间耦合效应,使模型得到简化;接着,将上述架空线分布参数模型应用于 HVDC 系统交流侧导纳建模中;在 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真平台中对所提架空线频变分布参数模型的正确性进行了验证,并将其与多个 π 形级联线路集中参数模型在描述架空线频率特性准确性方面进行了对比分析,最后将所提分布参数模型应用到某实际直流工程的交流侧导纳模型

中,进一步验证了所提模型的有效性。

1 频变分布参数线路模型

1.1 单位长度参数基本计算原理

对于长距离输电线路而言,建立模型首先需要求解其单位长度参数,即单长电阻 R_0 、单长电感 L_0 以及单长电容 C_0 。在多导体输电线路系统中,由于导体之间存在耦合,线路单长参数呈现为矩阵形式。为了方便表述,记导线的位置坐标及其距离如图 1 所示。

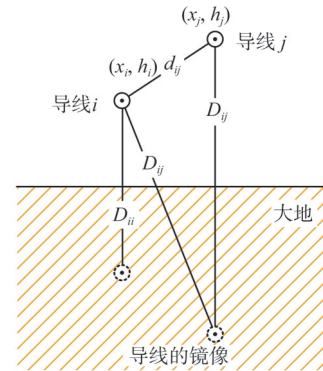


图 1 导线的位置坐标及其距离

Fig. 1 Position coordinates and distance of the wires

图 1 中: $x_{i(j)}$ 为水平坐标; $h_{i(j)}$ 为导线的高度; d_{ij} 为导线间的距离; $D_{ii(jj, ij)}$ 为导线和导线镜像的距离。

导线的对地电位 u_i 和此导线上的线电荷密度 q_i 之间存在以下关系。

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_i \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1i} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ P_{i1} & \cdots & P_{ii} & \cdots & P_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ P_{n1} & \cdots & P_{ni} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_i \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{cases} P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln(D_{ii}/r_i) \\ P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln(D_{ij}/d_{ij}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: ϵ_0 为真空介电常数; u_i 为导线 i 的对地电位, kV; q_i 为导线 i 的线电荷密度, C/km; P_{ii} 为自电位系数, F/km, 表征导线和大地之间的电容效应; P_{ij} 为互电位系数, F/km, 表征导线之间的电容效应; r_i 为导线 i 的半径, m; n 为导线数量。

沿线路方向的压降和电流之间存在以下关系。

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_i \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1i} & \cdots & Z_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{i1} & & Z_{ii} & & Z_{in} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & \cdots & Z_{ni} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_i \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: i_i 为导线 i 的电流; 阻抗矩阵为 n 阶对角阵, 其对角线元素 Z_{ii} 由导体固有阻抗 $Z_{inh,ii}$ 以及大地回路阻抗 $Z_{g,ii}$ 两部分的和构成, 非对角线元素 $Z_{ij} (i \neq j)$ 仅由大地回路阻抗 $Z_{g,ij}$ 构成。

当导线是实芯圆柱形导体, 其固有阻抗 $Z_{inh,ii}$ 的计算方法为:

$$Z_{inh,ii} = R_{inh} + j\omega L_{inh} \quad (4)$$

式中: R_{inh} 为线路的交流电阻; L_{inh} 为线路的频变电感, 可以由线路的直流电阻和内电感乘上修正系数得到^[21], 即:

$$\begin{cases} R_{inh} = m_R R_d = m_R \frac{\rho}{\pi r^2} \\ L_{inh} = m_L L_d = m_L \frac{\mu_0}{8\pi} \\ m_R = \frac{mr \operatorname{ber}(mr) \operatorname{bei}'(mr) - \operatorname{bei}(mr) \operatorname{ber}'(mr)}{2 (\operatorname{ber}'(mr))^2 + (\operatorname{bei}'(mr))^2} \\ m_L = \frac{4 \operatorname{bei}(mr) \operatorname{bei}'(mr) + \operatorname{ber}(mr) \operatorname{ber}'(mr)}{mr (\operatorname{ber}'(mr))^2 + (\operatorname{bei}'(mr))^2} \\ m = \sqrt{\omega \mu / \rho} \end{cases} \quad (5)$$

式中: R_d 为直流电阻; ρ 为导体电阻率; r 为导线半径; L_d 为内电感; μ 和 μ_0 分别为导体磁导率和真空磁导率; m 为计算因子; $\operatorname{ber}(\cdot)$ 第一类开尔文函数, $\operatorname{ber}'(\cdot)$ 为其一阶导数; ω 为角频率; m_R 和 m_L 为修正系数, 与频率相关, 因此 $Z_{inh,ii}$ 具有频变特性。

架空线大地回路阻抗 $Z_{g,ii}$ 和 $Z_{g,ij}$ 的计算方法中最经典的是 1926 年由 J. R. Carson 提出的公式, 但 Carson 公式是无穷积分, 计算较复杂^[22], 本文使用式(6)进行近似替代^[23]。

$$\begin{cases} Z_{g,ii} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{h_i + h_j + 2d_e}{r} \right) \\ Z_{g,ij} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{\sqrt{(h_i + h_j + 2d_e)^2 + (x_i - x_j)^2}}{d_{ij}} \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中 d_e 为复渗透距离, $d_e = \sqrt{\rho / (j\omega \mu)}$ 。

1.2 地线效应消除

高压输电线路一般配置有架空地线防止雷击, 架空地线不可避免的会对输电线路造成影响, 但在进行谐波分析时仅关注输电线路的电气特性, 因此需要结合地线状态方程消去地线影响。

将式(1)按输电线和架空地线进行分块处理如式(7)所示。

$$\begin{bmatrix} U_L \\ U_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{LL} & P_{LG} \\ P_{GL} & P_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_L \\ Q_G \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: U_L 为各输电线电压组成的列向量; Q_L 为各输电线线电荷密度组成的列向量; U_G 为架空地线电压组成的列向量; Q_G 为架空地线线电荷密度组成的列向量; P_{LL} 为输电线自电位矩阵; P_{LG} 和 P_{GL} 为输电线和地线之间的互电位矩阵; P_{GG} 为架空地线自电位矩阵。

架空地线上无大电流通过且杆塔接地电阻较小, 因此认为架空地线对地电压为 0, 将 $U_G=0$ 代入式(7)可得:

$$U_L = \underbrace{(P_{LL} - P_{LG} P_{GG}^{-1} P_{GL})}_{P_{ph}} Q_L \quad (8)$$

最终将矩阵 P_{ph} 求逆可得相电容矩阵 C_{ph} , 即:

$$C_{ph} = P_{ph}^{-1} \quad (9)$$

将式(3)经过同样的处理可得消去地线影响后的串联支路矩阵 Z_{ph} 。

$$Z_{ph} = Z_{LL} - Z_{LG} Z_{GG}^{-1} Z_{GL} \quad (10)$$

1.3 极间耦合消除

以上过程得到的基本参数在不同相间存在耦合, 相间耦合电容和阻抗会大大增加稳定性分析的难度, 本节结合直流双极线路的运行工况进行去耦合处理, 使矩阵结构更简洁。

直流双极线路几何分布具有对称性, 地线效应消除后电容矩阵和串联支路矩阵均为 2 阶方阵, 即:

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_s & C_m \\ C_m & C_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: q_1 为正极线路电荷量; q_2 为负极线路电荷量; u_1 为正极线路电位; u_2 为负极线路电位; C_s 为自电容; C_m 为互电容; i_1 为正极线路电流; i_2 为负极线路电流; Z_s 为自阻抗; Z_m 为互阻抗。

考虑直流线路的运行工况, 直流系统双极运行

时电流主要通过正负极线路形成回路, 大地流过的电流几乎为 0, 且正负极电压互为相反数, 即有:

$$\begin{cases} u_1 + u_2 = 0 \\ i_1 + i_2 = 0 \end{cases} \quad (13)$$

代入式(11)–(12), 得到:

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_s - C_m & 0 \\ 0 & C_s - C_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s - Z_m & 0 \\ 0 & Z_s - Z_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

从式(14)–(15)可知, 双极直流输电线路在正常运行时可以通过自参数和互参数的相减实现解耦计算。因此双极直流线路的单位长度参数为:

$$\begin{cases} C_0 = C_s - C_m \\ R_0 = \text{Real}(Z_s - Z_m) \\ L_0 = \text{Imag}(Z_s - Z_m)/2\pi \end{cases} \quad (16)$$

式中: Real 代表取实部; Imag 代表取虚部; C_0 、 R_0 和 L_0 分别为单位长度电容、电阻和电感。

1.4 计及分布参数效应的线路谐波阻抗

1.3 节得到了直流双极线路消去相间耦合的单位长度导线基本参数 R_0 、 L_0 及 C_0 , 其中 R_0 和 L_0 呈现出频率相关性, 结合长距离输电线路的分布参数效应后, 能够更精确地计算线路在各个频率的阻抗特性。线路首端和末端电气量之间满足:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_c \sinh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中: $\dot{U}_1$ 和 $\dot{I}_1$ 分别为首端电压和电流; $\dot{U}_2$ 和 $\dot{I}_2$ 分别为末端电压和电流; l 为输电线路长度; γ 为传播系数; Z_c 为波阻抗, 它们都是线路单长参数的函数, 具体计算方法为:

$$\begin{cases} \gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} \\ Z_c = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \end{cases} \quad (18)$$

设线路末端接入的负载阻抗为 Z_L , 则线路首端的入口阻抗 Z_{in} 为:

$$Z_{in} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{\cosh(\gamma l) Z_L + Z_c \sinh(\gamma l)}{\frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) Z_L + \cosh(\gamma l)} \quad (19)$$

当末端阻抗已知时, 可根据式(19)计算考虑线路分布参数效应的首端入口阻抗。特别地, 当负载阻抗为 0 时, 有:

$$Z_{in} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = Z_c \tanh(\gamma l) \quad (20)$$

2 考虑线路频变分布参数特性的 HVDC 系统交流侧导纳建模

本节应用第 1 节直流双极线路模型的内容建立某实际直流工程的小信号模型, 如图 2 所示。图 2 中阀组为 12 脉动换流阀组, 换流站的每一极均由两个阀组构成。

其中整流侧交流滤波器组配置为 4A+4B+2C+5D, 各型号滤波器结构和参数如图 3 和表 1 所示。

逆变站交流滤波器组配置为 4A+3B+7D, 各型号滤波器结构和参数如图 4 和表 2 所示。直流滤波器结构和参数如图 5 和表 3 所示。

定直流电流控制环节的传递函数为:

$$\Delta \alpha_{\text{ordr}} = \frac{0.625 G_{\text{PI_idc}} G_{\text{I_m}}}{\underbrace{\cos(1.543 - \alpha_{\text{ordr}})}_{G_{\alpha_{\text{ordr}}, \text{I}}}} \Delta I_{\text{dcr}} \quad (21)$$

式中: $G_{\text{PI_idc}}$ 为定电流控制 PI 环节传递函数; $G_{\text{I_m}}$ 为电流测量滤波环节传递函数; α_{ordr} 为整流侧触发角整定值; $\Delta \alpha_{\text{ordr}}$ 为整流侧触发角扰动量; ΔI_{dcr} 为整流侧直流电流扰动量。

定直流电压控制环节的传递函数为:

$$\Delta \alpha_{\text{ordi}} = - \frac{0.04 G_{\text{I_m}} G_{\text{PI_udc}}}{\underbrace{(1 + s T_{\text{D3}}) \cos(1.543 - \alpha_{\text{ord}})}_{G_{\alpha_{\text{ordi}}, \text{I}}}} \Delta I_{\text{dci}} - \frac{G_{\text{U_m}} G_{\text{PI_udc}}}{\underbrace{\cos(1.543 - \alpha_{\text{ord}})}_{G_{\alpha_{\text{ordi}}, \text{U}}}} \Delta U_{\text{dcli}} \quad (22)$$

式中: $G_{\text{PI_udc}}$ 为定电压控制 PI 环节传递函数; $G_{\text{U_m}}$ 为电压测量滤波环节传递函数; T_{D3} 为测量延时; α_{ord} 为逆变侧触发角整定值; $\Delta \alpha_{\text{ordi}}$ 为逆变侧触发角扰动量; ΔI_{dci} 为逆变侧直流电流扰动量; ΔU_{dcli} 为逆变侧线路电压扰动量; s 为拉普拉斯算子。

锁相环环节的传递函数为:

$$\Delta \theta = \frac{G_{\text{MAF}} G_{\text{PI_PLL}}}{\underbrace{v_m (s + G_{\text{MAF}} G_{\text{PI_PLL}})}_{G_{\text{PLL}}}} \Delta v_q \quad (23)$$

式中: G_{MAF} 为 MAF 滤波器传递函数; $G_{\text{PI_PLL}}$ 为锁相环滤波环节传递函数; v_m 为直流电压额定值; $\Delta \theta$ 为锁相环输出相角扰动量; Δv_q 为 q 轴电压扰动量。

控制系统参数如表 4 所示。

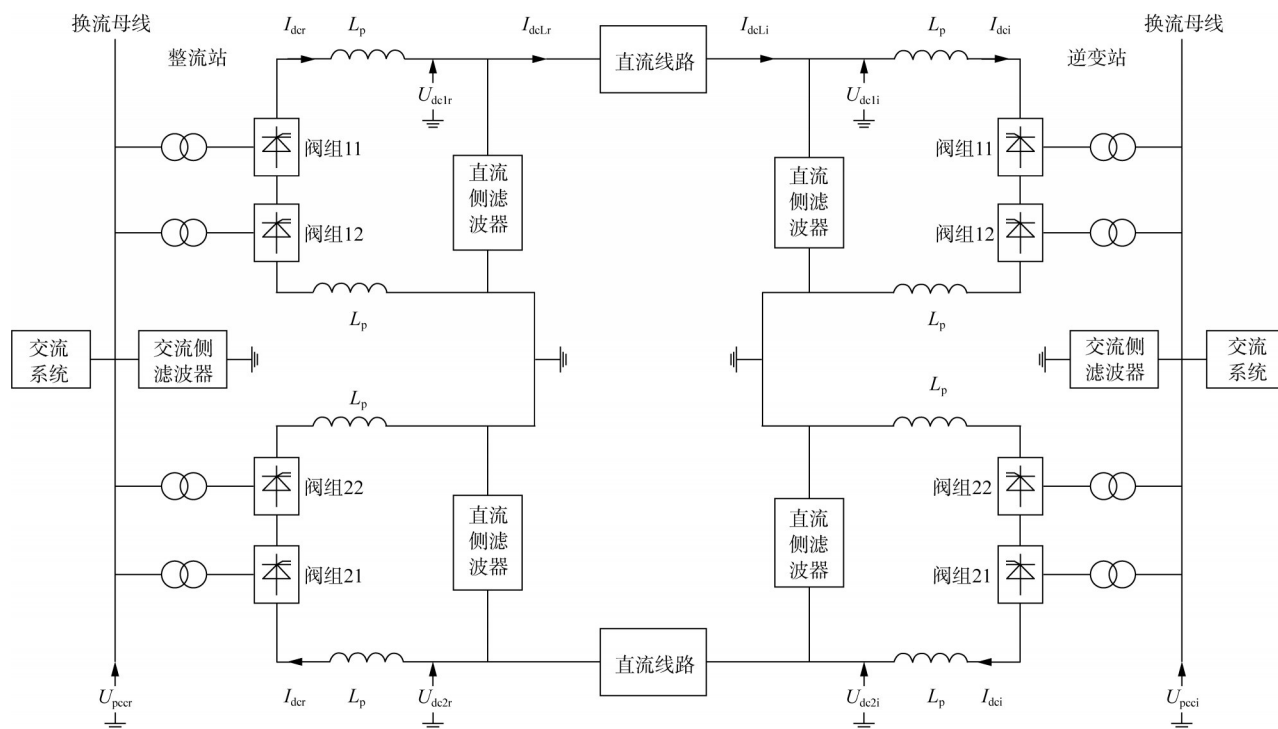


图 2 某实际直流工程主回路拓扑图

Fig. 2 Topology diagram of the main circuit of a certain actual DC engineering project

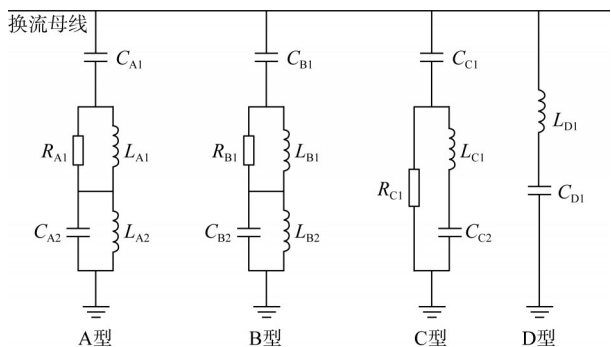


图 3 整流侧交流滤波器

Fig. 3 Rectifier side AC filter

表 1 整流侧交流滤波器组参数

Tab. 1 Rectifier side AC filter bank parameters

滤波器类型	A	B	C	D
组数	4	4	2	5
$C_1/\mu\text{F}$	2.149	2.153	2.160	2.160
L_1/mH	12.853	6.242	685.909	2.037
R_1/Ω	500	500	1800	
$C_2/\mu\text{F}$	5.639	3.867	14.772	
L_2/mH	9.507	9.058		

双极全压运行参数如表 5 所示。

本文使用文献[24]中的传递函数描述交直流侧电气扰动量之间的关系, 即:

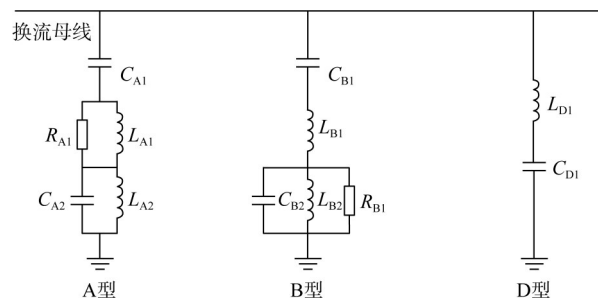


图 4 逆变侧交流滤波器

Fig. 4 Inverter side AC filter

表 2 逆变站交流滤波器组参数

Tab. 2 Rectifier side AC filter bank parameters

滤波器类型	A	B	D
组数	4	3	7
$C_1/\mu\text{F}$	2.406	2.410	2.673
L_1/mH	13.471	6.528	1.645
R_1/Ω	500	2000	
$C_2/\mu\text{F}$	4.666	3.231	
L_2/mH	9.793	9.259	

$$\begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta I_q \\ \Delta U_{dc} \\ \Delta \mu \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} \end{bmatrix}}_K \begin{bmatrix} \Delta U_d \\ \Delta U_q \\ \Delta i_{dc} \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} \quad (24)$$

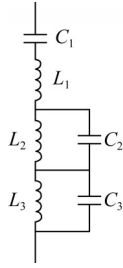


图5 直流滤波器电气结构

Fig. 5 Electrical structure diagram of DC filters

表3 直流滤波器参数

Tab. 3 DC filter parameters

参数	数值	参数	数值
L_1/mH	9.345	L_2/mH	15.919
$C_1/\mu\text{F}$	1.2	L_3/mH	4.656
$C_1/\mu\text{F}$	2.824	$C_3/\mu\text{F}$	2.647

表4 控制系统参数

Tab. 4 Control system parameters

控制模式	参数
定直流电流控制	$G_{\text{PI_idc}}=0.4+166.7/\text{s}$
定直流电压控制	$G_{\text{PI_udc}}=0.1+125/\text{s}$
锁相环	$G_{\text{PI_PLL}}=10+50/\text{s}$

表5 双极全压运行参数

Tab. 5 Parameters during bipolar full voltage operation

参数	取值	参数	取值
换流阀阻尼电阻 R/Ω	2 700	换流阀阻尼 电容 $C/\mu\text{F}$	0.027
换流变压器漏抗 $L_c/\text{p. u.}$	0.185	换流变压器 变比	525/169.85
整流侧 换流变压器额定容量/MVA	750	直流电流/kA	3.125
换流母线电压/ kV	525	直流电压/kV	± 800
延迟触发角/rad	0.25	换相重叠角/rad	0.38
换流阀阻尼电阻 R/Ω	2 700	换流阀阻尼 电容 $C/\mu\text{F}$	0.027
换流变压器漏抗 $L_c/\text{p. u.}$	0.18	换流变压器 变比	525/165.59
逆变侧 换流变压器额定容量/MVA	750	直流电流/kA	3.125
换流母线电压/ kV	525	直流电压/kV	± 768
延迟触发角/rad	2.44	换相重叠角/rad	0.35

式中: $\Delta I_{d(q)}$ 为公共连接点 (point of common connecting, PCC) 流入换流器的 $d(q)$ 轴交流电流扰动量; $\Delta U_{d(q)}$ 为 PCC 点 $d(q)$ 轴交流电压扰动量; ΔU_{dc} 为换

流器在直流侧两端的直流电压扰动量; Δi_{dc} 为换流器输出的直流电流扰动量; $\Delta \alpha$ 为触发角扰动量; $\Delta \mu$ 为换相重叠角扰动量; $K_{ij} (i \in \{1, 2, 3, 4\}, j \in \{1, 2, 3, 4\})$ 为各扰动量之间对应的传递函数。需要指出的是, 本文所建模型单侧使用 4×12 脉动换流器, 因此本文传递函数矩阵与文献[24]中 12 脉动传递函数矩阵之间的关系为:

$$\begin{bmatrix} K_{1x} \\ K_{2x} \\ K_{3x} \end{bmatrix} = 4 \begin{bmatrix} K_{1x}^{12} \\ K_{2x}^{12} \\ K_{3x}^{12} \end{bmatrix} \quad (25)$$

式中等式左边为本文传递函数矩阵, 等式右边为文献[24]中 12 脉动传递函数矩阵, K 的上标代表换流器脉动数, 下标中的 $x=\{1, 2, 3, 4\}$, 代表 K 的第 x 列。

此外, 文献[24]中是针对逆变工况的换流器进行的推导, 由于整流侧直流电压的参考方向与逆变侧相反, 因此得到式(26)[25]。

$$K_{3xr} = -K_{3xi} \quad (26)$$

式中: 下标 r 为整流侧变量; i 为逆变侧变量, 下文沿用这种标记。

先构建逆变侧直流线路出口看向逆变侧的直流谐波阻抗 $Z_{dcLi} = \Delta U_{dci} / \Delta I_{dLi}$, 系统中电气量一共需要满足 3 个约束。首先是换流器约束:

$$\begin{cases} \Delta I_{di} = K_{11i} \Delta V_{di} + K_{12i} \Delta V_{qi} + K_{13i} \Delta I_{dci} + K_{14i} \Delta \alpha_i \\ \Delta I_{qi} = K_{21i} \Delta V_{di} + K_{22i} \Delta V_{qi} + K_{23i} \Delta I_{dci} + K_{24i} \Delta \alpha_i \\ \Delta U_{dci} - \Delta U_{dc2i} - 4 \Delta I_{dci} s L_p \\ = K_{31i} \Delta V_{di} + K_{32i} \Delta V_{qi} + K_{33i} \Delta I_{dci} + K_{34i} \Delta \alpha_i \\ \Delta \alpha_i = \Delta \alpha_{ordi} - G_{\text{PLLi}} \Delta V_{qi} \end{cases} \quad (27)$$

式中: ΔI_{dLi} 为逆变侧直流线路出口电流; ΔI_{di} 和 ΔI_{qi} 为 dq 坐标下的换流变压器二次侧交流电流; ΔV_{di} 和 ΔV_{qi} 为 dq 坐标下的二次侧交流电压; ΔI_{dci} 为直流电流; $\Delta \alpha_i$ 为实际的触发角; ΔU_{dci} 为换流器直流出口正极电压; $\Delta \alpha_{ordi}$ 为逆变侧触发角指令值; G_{PLLi} 为逆变侧锁相环节传递函数。 $\Delta \alpha_{ordi}$ 和 G_{PLLi} 具体表达式详见式(22)——(23)。

其次, 交流侧电压电流之间要满足以下约束。

$$\begin{cases} \Delta I_{di} = -(Y_{gdd} \Delta V_{di} + Y_{gdq} \Delta V_{qi}) \\ \Delta I_{qi} = -(Y_{gqd} \Delta V_{di} + Y_{gqq} \Delta V_{qi}) \end{cases} \quad (28)$$

式中 $Y_{gdd}=Y_{gqq}$, $Y_{gqd}=-Y_{gdq}$, 它们为逆变侧交流电网和交流滤波器并联后 dq 坐标下的导纳, 滤波器结构详见图 3—4。

最后, 在考虑直流滤波器的作用后, 直流电压

和直流电流之间要满足以下约束。

$$\begin{cases} \Delta U_{dc1i} = Z_{dcF}(\Delta I_{dcLi} - \Delta I_{dci}) \\ \Delta U_{dc2i} \approx -\Delta U_{dc1i} \end{cases} \quad (29)$$

联立式(27)–(29)可得:

$$\begin{cases} -\underbrace{(Y_{gdd} + K_{11i})}_{a_{11}} \Delta V_{di} - \underbrace{(Y_{gdq} + K_{12i} + K_{14i} G_{PLLi})}_{a_{12}} \Delta V_{qi} \\ = \underbrace{(K_{13i} + K_{14i} G_{\alpha_{ordr-i}})}_{b_{11}} \Delta I_{dci} + \underbrace{K_{14i} G_{\alpha_{ordr-U}}}_{b_{12}} \Delta U_{dc1i} \\ -\underbrace{(Y_{gdd} + K_{21i})}_{a_{21}} \Delta V_{di} - \underbrace{(Y_{gdq} + K_{22i} + K_{24i} G_{PLLi})}_{a_{22}} \Delta V_{qi} \\ = \underbrace{(K_{23i} + K_{24i} G_{\alpha_{ordr-i}})}_{b_{21}} \Delta I_{dci} + \underbrace{K_{24i} G_{\alpha_{ordr-U}}}_{b_{22}} \Delta U_{dc1i} \end{cases} \quad (30)$$

式中 $G_{\alpha_{ordr-i}}$ 和 $G_{\alpha_{ordr-U}}$ 表达式见式(22)。

$$\begin{aligned} & \left(2 - K_{34i} G_{\alpha_{ordr-U}} + \frac{K_{33i} + K_{34i} G_{\alpha_{ordr-i}} + 4sL_p}{Z_{dcF}} \right) \Delta U_{dc1i} = \\ & K_{31i} \Delta V_{di} + (K_{32i} - K_{34i} G_{PLLi}) \Delta V_{qi} + \\ & (K_{33i} + K_{34i} G_{\alpha_{ordr-i}} + 4sL_p) \Delta I_{dLi} \end{aligned} \quad (31)$$

由式(31)可以解得:

$$\begin{cases} \Delta V_{di} = \frac{a_{22}b_{11} - a_{12}b_{21}}{a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12}} \Delta I_{dci} + \frac{a_{22}b_{12} - a_{12}b_{22}}{a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12}} \Delta U_{dc1i} \\ \Delta V_{qi} = \frac{a_{11}b_{21} - a_{21}b_{11}}{a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12}} \Delta I_{dci} + \frac{a_{11}b_{22} - a_{21}b_{12}}{a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12}} \Delta U_{dc1i} \end{cases} \quad (32)$$

式中 a_{ij} 、 b_{ij} ($i \in [1, 2]$, $j \in [1, 2]$) 表达式见式(30)。

将式(32)代入式(31)可得逆变侧直流线路出口看向逆变站的直流谐波阻抗 Z_{dcLi} , 再将 Z_{dcLi} 代入式(19)即可得到从整流侧直流线路出口看向逆变站的直流谐波阻抗 Z_{dcLr} 为:

$$Z_{dcLr} = \frac{\cosh(\gamma l) \frac{\Delta U_{dc1i}}{\Delta I_{dcLi}} + Z_c \sinh(\gamma l)}{\frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) \frac{\Delta U_{dc1i}}{\Delta I_{dcLi}} + \cosh(\gamma l)} \quad (33)$$

扰动量在整流侧同样需要满足换流器约束, 即:

$$\begin{cases} \Delta I_{dr} = K_{11r} \Delta V_{dr} + K_{12r} \Delta V_{qr} + K_{13r} \Delta I_{dcr} + K_{14r} \Delta \alpha_r \\ \Delta I_{qr} = K_{21r} \Delta V_{dr} + K_{22r} \Delta V_{qr} + K_{23r} \Delta I_{dcr} + K_{24r} \Delta \alpha_r \\ \Delta U_{dc1r} - \Delta U_{dc2r} + 4\Delta I_{dcr} sL_p \\ = K_{31r} \Delta V_{dr} + K_{32r} \Delta V_{qr} + K_{33r} \Delta I_{dcr} + K_{34r} \Delta \alpha_r \\ \Delta \alpha_r = \Delta \alpha_{ordr} - G_{PLLi} \Delta V_{qr} \end{cases} \quad (34)$$

式中: ΔI_{dr} (ΔI_{qr}) 为整流侧 $d(q)$ 轴电流扰动量; ΔV_{dr} (ΔV_{qr}) 为整流侧 $d(q)$ 轴电压扰动量; ΔI_{dcr} 为整流侧直流电流; $\Delta \alpha_r$ 为整流侧触发角扰动量; ΔU_{dc1r} (ΔU_{dc2r}) 为整流侧正(负)极线路电压扰动量; $\Delta \alpha_{ordr}$ 为整流侧定直流电流控制器输出的触发角指令扰动量; G_{PLLi} 为整流侧锁相环节传递函数。

考虑直流滤波器组的作用, 直流侧还需要满足以下约束。

$$\begin{cases} \Delta U_{dc1r} = Z_{dcF}(\Delta I_{dcr} - \Delta I_{dLr}) \\ \Delta U_{dc2r} \approx -\Delta U_{dc1r} \\ \Delta U_{dc1r} = Z_{dcLr} \Delta I_{dLr} \end{cases} \quad (35)$$

联立式(34)–(35)可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{dr} \\ \Delta I_{qr} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} Y_{dd} & Y_{dq} \\ Y_{qd} & Y_{qq} \end{bmatrix}}_{Y_{dq}} \begin{bmatrix} \Delta U_{dr} \\ \Delta U_{qr} \end{bmatrix} \quad (36)$$

式中矩阵 Y_{dq} 为 dq 坐标下的交流侧导纳。将 dq 坐标导纳转化为序导纳^[26], 即:

$$\begin{bmatrix} I(s) \\ e^{j2\theta} I^*(s) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} Y_s(s) & Y_c(s) \\ Y_{co}(s) & Y_{so}(s) \end{bmatrix}}_{Y_{ac}} \cdot \begin{bmatrix} U(s) \\ e^{j2\theta} U^*(s) \end{bmatrix} \quad (37)$$

式中: $Y_s(s)$ 为自导纳; $Y_c(s)$ 为耦合导纳; $Y_{so}(s)$ 和 $Y_{co}(s)$ 分别为它们的共轭。具体表达式见式(38)。式(37)说明 HVDC 系统中存在频率耦合现象。

$$\begin{cases} Y_s(s + j\omega_0) = \frac{Y_{dd}(s) + Y_{qq}(s)}{2} + j \frac{Y_{qd}(s) - Y_{dq}(s)}{2} \\ Y_c(s + j\omega_0) = \frac{Y_{dd}(s) - Y_{qq}(s)}{2} + j \frac{Y_{qd}(s) + Y_{dq}(s)}{2} \\ Y_s^*(s + j\omega_0) = \frac{Y_{dd}(s) + Y_{qq}(s)}{2} - j \frac{Y_{qd}(s) - Y_{dq}(s)}{2} \\ Y_c^*(s + j\omega_0) = \frac{Y_{dd}(s) - Y_{qq}(s)}{2} - j \frac{Y_{qd}(s) + Y_{dq}(s)}{2} \end{cases} \quad (38)$$

3 仿真实验

3.1 线路单长参数及末端接地时谐波阻抗验证

某实际直流工程中双极直流线路的几何结构及参数分别如图6、表6所示。在 PSCAD/EMTDC 软件中对解耦前的单位长度基本参数进行仿真实验, 扫描值和计算值的对比结果如图7所示。

图7中蓝色圆圈是 PSCAD/EMTDC 中自参数的仿真值, 橙色圆圈是 PSCAD/EMTDC 中互参数的仿真值, 黄色实线是 MATLAB 中自参数的计算值,

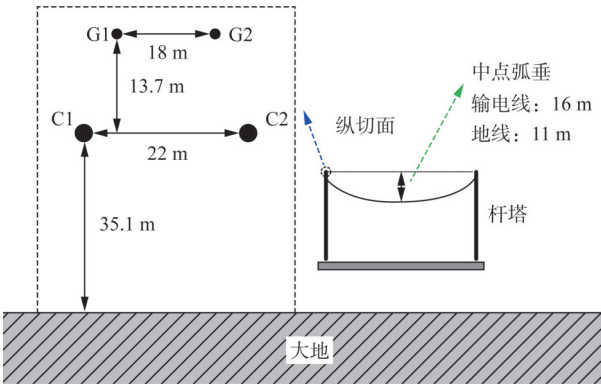


图 6 直流线路几何结构

Fig. 6 Geometric structure of DC lines

表 6 直流线路参数

Tab. 6 DC line parameters

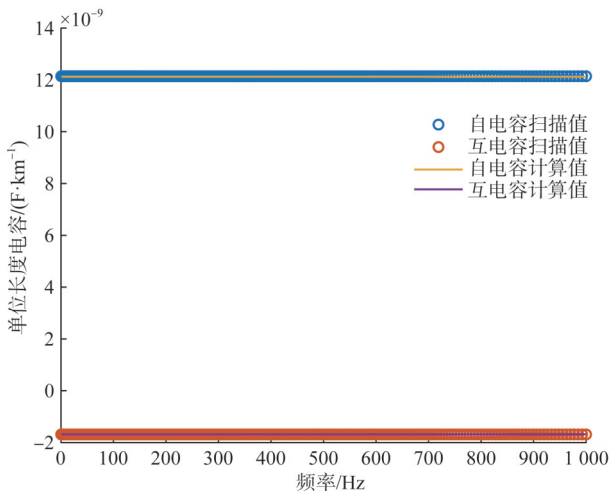
线路	参数	数值	参数	数值
输电线	导线数目	2	中点弧垂高度/m	16
	分裂数	6	分裂间隔/m	0.45
	直流电阻/($\Omega \cdot \text{km}$)	0.043 3	半径/m	0.016 8
地线	地线数目	2	中点弧垂高度/m	11
	直流电阻/($\Omega \cdot \text{km}$)	0.709 8	半径/m	0.008 75
大地	平均电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)	1 000	相对磁导率	1

紫色实线是 MATLAB 中互参数的计算值。

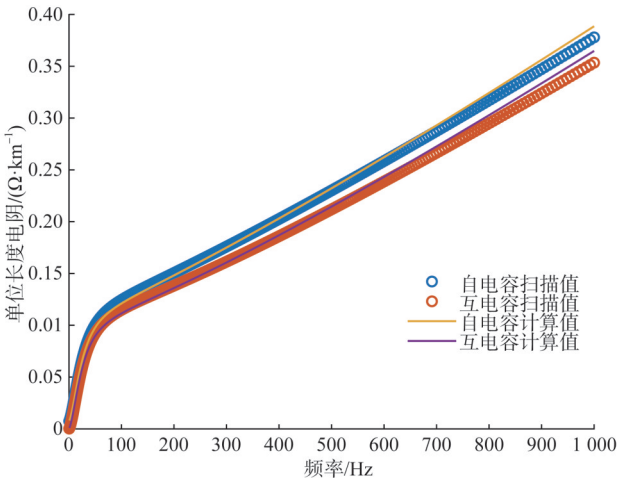
由图 7 可知，线路单位长度电容几乎不随频率变化，而单位长度电阻和单位长度电感均展现出频率相关性，且各单位长度参数的计算值和仿真值均吻合较好，只有单位长度电阻在高频段稍有误差，误差最大的为单位长度互电阻，其均方根误差也仅为 $1.64 \times 10^{-4} \Omega/\text{km}$ 。

进一步对长度为 1 418 km 的输电线路末端短路时的全长阻抗进行验证。线路末端短路接地，注入 1~1 000 Hz 谐波电压，测量谐波电流响应，将电压和电流经过 FFT 处理并作商后，与式(20)得到的结果进行比较，结果如图 8 所示。图中蓝色圆圈为 PSCAD/EMTDC 扫描值，红色实线为 MATLAB 计算值。

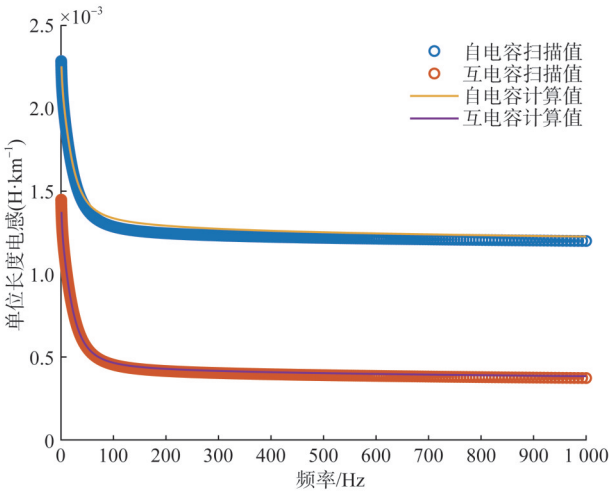
由图 8 可知，直流双极输电线路末端接地时直流阻抗谐波特性的计算值和仿真值基本吻合，幅频特性均方根误差为 3.41Ω ，相频特性均方根误差为 1.73° ，均在合理误差范围内，进一步验证了所提线路模型的有效性。此外，线路阻抗幅频特性呈现出峰谷交替的特性，使得特定频次的谐波极易在线路中进行传播，相频特性曲线则在容性和感性之间交替，为稳定性分析增加了更大难度。



(a) 单位长度电容验证



(b) 单位长度电阻验证



(c) 单位长度电感验证

图 7 直流双极线路单位长度参数验证

Fig. 7 Verification of unit length parameters for DC bipolar lines

经过计算可得上述实际直流工程双极直流线路单位长度参数在基频 50 Hz 处的数值，如表 7 所示。

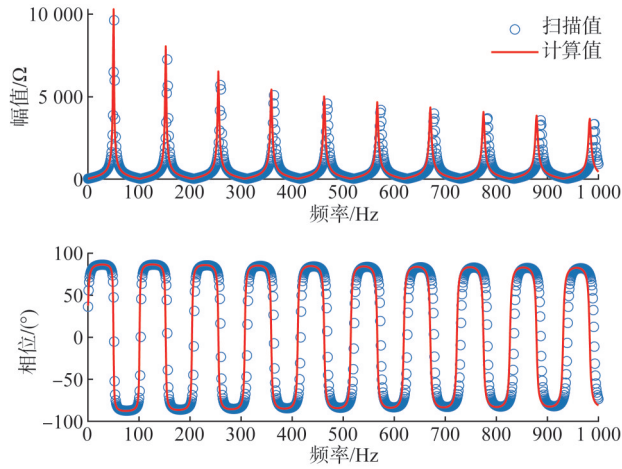


图 8 直流双极输电线路末端接地时谐波特性

Fig. 8 Harmonic characteristics of DC bipolar transmission lines with terminal grounding

表中 C_s 为自电容, R_s 为自电阻, L_s 为自电感, C_m 为互电容, R_m 为互电阻, L_m 为互电感。

表 7 双极直流线路单位长度基频参数

Tab. 7 Basic frequency parameters per unit length of bipolar DC lines

参数	数值	参数	数值
$C_s/(\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$	1.211×10^{-8}	$C_m/(\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$	1.685×10^{-9}
$R_s/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.098 0	$L_s/(\text{H} \cdot \text{km}^{-1})$	1.438×10^{-3}
$R_m/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.089 8	$L_m/(\text{H} \cdot \text{km}^{-1})$	5.632×10^{-4}

进一步, 将表 7 中的单长参数乘以每一段 π 形线路的长度就可以得到 π 形级联线路的集中参数模型。将本文所提单位长度参数频率相关的分布参数模型与集中参数模型进行比较。在 $[1, 300]$ Hz 频率区间内, 将 4π 、 8π 、 12π 集中参数模型与分布参数模型的阻抗特性进行对比分析, 结果如图 9 所示。图中红色实线为本文所用的单位长度参数频率相关的分布参数模型, 蓝色虚线、黄色点线和绿色点划线分别为 4π 、 8π 和 12π 级联的集中参数模型。

由图 9 可知, 随着集中参数模型 π 级联个数的增加, 集中参数模型与分布参数模型的差异在减小, 但在采用 12 个 π 级联后, 在小于 300 Hz 的频率范围内二者仍然有些许差异, 继续增大 π 级联的个数虽然能使得二者结果一致, 但是将使得计算量大大增加。另外, 当采用 12 π 级联的集中参数模型时, 可以观察到其阻抗幅值特性的 3 个峰值分别为 10 154、10 398 和 10 569 Ω , 与分布参数模型幅频

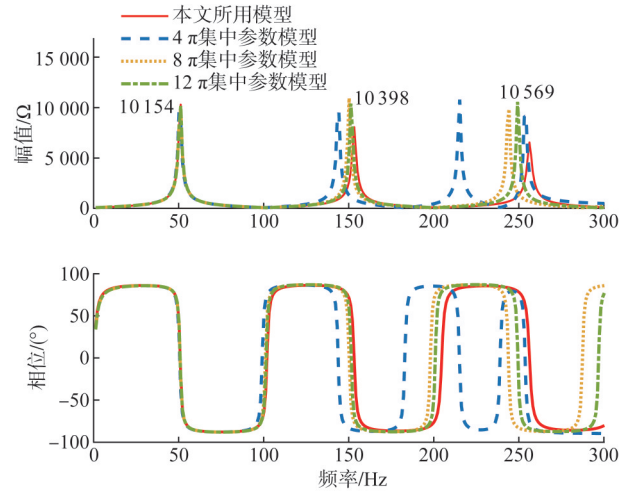


图 9 线路模型低频段对比

Fig. 9 Comparison of low-frequency bands of line models

特性的峰值衰减特性相反。

在更大频率范围 $[1, 1000]$ Hz 内进一步将二者进行对比, 结果如图 10 所示。图中红色实线为单位长度参数频率相关的分布参数模型, 绿色实线为 24π 级联的集中参数模型。

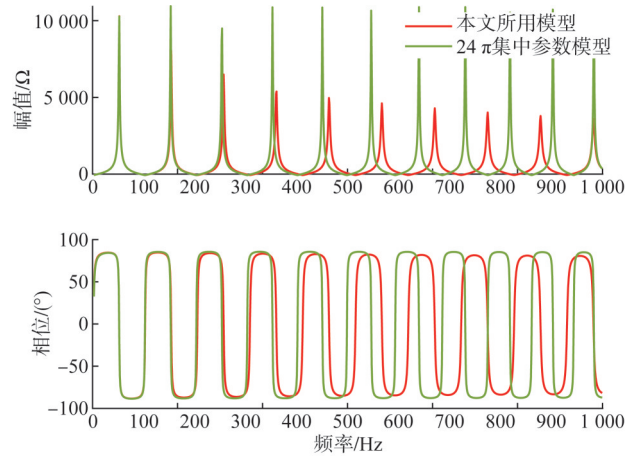


图 10 线路模型中高频段对比

Fig. 10 Comparison of high-frequency bands in line models

由图 10 可知, 当采用 24π 级联的集中参数模型后, 它与分布参数模型的差异仍然较大。因此, 对于长距离输电线路, 若使用集中参数模型研究谐波在线路中的传递特性, 将会导致较大的误差。

3.2 实际直流工程小信号模型验证

在 PSCAD/EMTDC 平台对图 2 所示直流工程模型的 $Y_s(s)$ 和 $Y_{\infty}(s)$ 进行扫频验证, 在整流侧 PCC 点注入电压谐波, 测量相应的电流谐波, 将电流和电压经过 FFT 处理并作商后, 与式 (38) 得到的结果进

行比较,结果如图 11 所示。图中蓝色圆圈为 PSCAD/EMTDC 扫频值,红色实线为理论计算值。

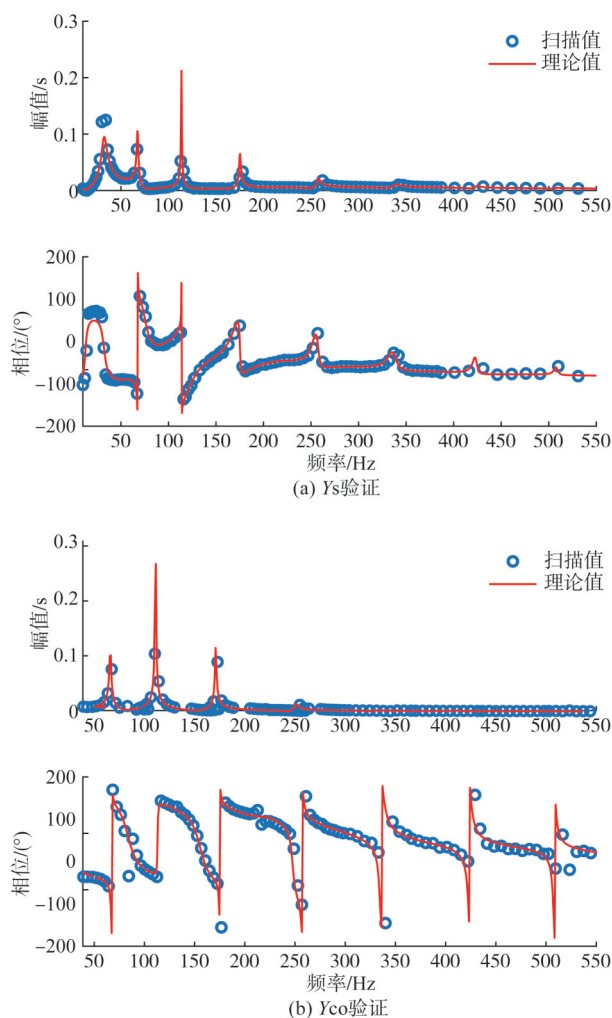


图 11 实际工程模型交流侧导纳验证

Fig. 11 Verification of AC side admittance of actual engineering models

由图 11 可知,除了部分频率点处受到背景谐波的影响出现误差以外,仿真结果与计算结果基本一致,幅频特性的均方根误差为 $3.73 \times 10^{-4} \text{ s}$,相频特性均方根误差为 1.86° ,误差均较小,进一步表明所提线路模型能准确描述 HVDC 系统的谐波阻抗特性。

4 结论

本文提出了一种考虑频变特性的架空线分布参数模型,该模型消去了地线效应和极间耦合效应,进一步提高了 HVDC 系统小信号模型的准确性。主要结论如下。

1) 架空线的单长电容基本不存在频变特性,而单长电阻和单长电感存在频变特性,单长电阻随频率增大而增大,单长电感随频率增大而减小。

2) 集中参数模型难以准确描述架空线的高频特性,而频变分布参数模型能够准确反映谐波在长距离线路中的传递特性。

3) 所提模型的准确性和有效性在某实际直流工程交流侧导纳模型中进一步得到验证。

本文的创新在于将直流双极线路的频变分布参数模型融合到了直流系统的小信号建模中,不足之处在于增加了计算量,此外电缆的谐波模型在小信号分析中的应用尚待研究。

参考文献

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [2] 卢洵, 张东辉, 周姝灿, 等. 复杂交直流电网系统级新型储能协调规划布局方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(8): 85–95.
LU Xun, ZHANG Donghui, ZHOU Shucan, et al. Coordinated planning layout method for system-level new energy storage of complex AC/DC power grids [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(8): 85–95.
- [3] 王延伟, 刘宇明, 杨荣照, 等. 柔性直流输电系统高频谐振自适应抑制策略[J]. 南方电网技术, 2024, 18(2): 1–11.
WANG Yanwei, LIU Yuming, YANG Rongzhao, et al. Adaptive suppression strategy of high frequency resonance in MMCHVDC transmission system [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(2): 1–11.
- [4] 陆晶晶, 贺之渊, 赵成勇, 等. 直流输电规划关键技术与展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 182–191.
LU Jingjing, HE Zhiyuan, ZHAO Chengyong, et al. Key technologies and prospects for DC power grid planning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 182–191.
- [5] 林伯强, 杨梦琦. 碳中和背景下中国电力系统研究现状、挑战与发展方向[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2022, 42(5): 1–10.
LIN Boqiang, YANG Mengqi. China's power system research in the context of carbon neutrality current status, challenges, and development direction [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences), 2022, 42(5): 1–10.
- [6] 叶运铭, 汪娟娟, 陈威, 等. LCC-HVDC 系统直流控制回路小干扰稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 178–188.
YE Yunming, WANG Juanjuan, CHEN Wei, et al. Small-signal stability analysis of DC control loop for LCC-HVDC system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 178–188.
- [7] CHEN X, MA J, WANG S, et al. An accurate impedance model of line commutated converter with variable commutation overlap [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(1): 562–572.
- [8] 郭春义, 殷子寒, 王烨, 等. LCC-MMC 型混合直流输电系统

- 小干扰稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(4): 1040 – 1052.
- GUO Chunyi, YIN Zihan, WANG Ye, et al. Investigation on small-signal stability of hybrid LCC-MMC HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4): 1040 – 1052.
- [9] MARTI J R. Accurate modeling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations[J]. IEEE Power Engineering Review, 1982, PER-2(1): 29 – 30.
- [10] CARSON J R. Wave propagation in overhead wires with ground return[J]. Bell System Technical Journal, 1926, 5(4): 539 – 554.
- [11] 满九方, 谢小荣, 陈垒, 等. 柔性直流输电系统高频振荡建模分析与抑制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(9): 3308 – 3322.
- MAN Jiufang, XIE Xiaorong, CHEN Lei, et al. Overview of modeling analysis and mitigation strategies of high-frequency resonance in MMC-HVDC systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(9): 3308 – 3322.
- [12] DOMMEL H. Digital computer solution of electromagnetic transients in single-and multiphase networks[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, PAS-88(4): 388 – 399.
- [13] 王惠泽, 曹书豪, 冯漠可, 等. 考虑参数频变特性的电力电缆改进贝杰龙模型[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(9): 3722 – 3732.
- WANG Huize, CAO Shuhao, FENG Moke, et al. Improved Bergeron model of power cable considering parameter frequency-dependent characteristics [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(9): 3722 – 3732.
- [14] 徐政, 钱洁. 电缆电气参数不同计算方法及其比较[J]. 高压技术, 2013, 39(3): 689 – 697.
- XU Zheng, QIAN Jie. Comparison of different methods for calculating electrical parameters of power cables[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 689 – 697.
- [15] 徐政, 李斯迅, 金砚秋. 海底电缆谐波频段电气参数计算[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 76 – 84.
- XU Zheng, LI Sirun, JIN Yangiu. Calculation of electrical parameters of submarine cable in harmonic frequency range[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 76 – 84.
- [16] 刘俊, 郭瑾程, 魏占宏, 等. 频变输电线路模型中的低阶拟合方法[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1197 – 1203.
- LIU Jun, GUO Jincheng, WEI Zhanhong, et al. Low-order approximation method for frequency-dependent transmission line model [J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1197 – 1203.
- [17] 陈思危, 李保宏, 刘天琪, 等. 考虑电缆和架空线参数频变特性的直流电网阻抗建模[J]. 电力工程技术, 2022, 41(6): 101 – 108.
- CHEN Siwei, LI Baohong, LIU Tianqi, et al. Impedance modeling of DC grid considering the frequency-dependent characteristics of cable and overhead line parameters [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6): 101 – 108.
- [18] BEERTEN J, D'ARCO S, SUUL J A. Frequency-dependent cable modelling for small-signal stability analysis of VSC-HVDC systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(6): 1370 – 1381.
- [19] 刘心肠, 李亚男, 蒋维勇. 基于波参数的直流线路谐波阻抗解析方法[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2842 – 2847.
- LIU Xinyang, LI Yanan, JIANG Weiyong. A novel analytic method of DC line harmonic impedance based on wave parameters [J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2842 – 2847.
- [20] 刘心肠, 蒋维勇, 李亚男. ± 100 kV 特高压直流输电工程直流系统谐振特性与抑制措施[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 202 – 207.
- LIU Xinyang, JIANG Weiyong, LI Yanan. Resonance characteristics of DC transmission line in ± 100 kV UHVDC power transmission project and its suppression measures [J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 202 – 207.
- [21] W M L, F Y. Numerical calculations of internal impedance of solid and tubular cylindrical conductors under large parameters [J]. IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 2004, 151(1): 67 – 72.
- [22] KROLO I, MODRIĆ T, VUJEVIĆ S. Definition and computation of carson formulas [C]//2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech), July 12 – 14, 2017, Split, Croatia. New York: IEEE, 2017: 1 – 6.
- [23] DERI A, TEVAN G, SEMLYEN A, et al. The complex ground return plane a simplified model for homogeneous and multi-layer earth return [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100(8): 3686 – 3693.
- [24] 周盛宇, 汪娟娟, 刘岳坤, 等. 考虑换流阀阻尼电路的LCC-HVDC系统小信号精准建模[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3730 – 3744.
- ZHOU Shengyu, WANG Juanjuan, LIU Yuekun, et al. Small signal accurate modeling of LCC-HVDC system considering converter valve damping circuit [J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3730 – 3744.
- [25] 周于清, 李大虎, 姚伟, 等. 受端近区光伏电站对LCC-HVDC系统稳定性影响分析[J]. 中国电力, 2024, 57(3): 170 – 182.
- ZHOU Yuqing, LI Dahu, YAO Wei, et al. Stability analysis of LCC-HVDC with PV station at the receiving end [J]. Electric Power, 2024, 57(3): 170 – 182.
- [26] RYGG A, MOLINAS M, ZHANG C, et al. A modified sequence-domain impedance definition and its equivalence to the dq-domain impedance definition for the stability analysis of AC power electronic systems [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4): 1383 – 1396.

收稿日期: 2023-08-28; 网络首发日期: 2024-04-20

作者简介:

樊玮(1992), 女, 工程师, 硕士, 从事电力系统稳定、无功电压管理工作, 18588863003@163.com;

周盛宇(1997), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为高压直流输电, 2453090917@qq.com;

陈德扬(1991), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为直流输电系统保护, tonycdy1991@163.com。