

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.06.012

考虑电缆和架空线参数频变特性的直流电网阻抗建模

陈思危¹, 李保宏¹, 刘天琪¹, 何川¹, 张敏², 王腾鑫²

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065;

2. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原 030001)

摘要:直流电网的故障特性可通过分析电网阻尼的方式获取,但传统电网阻抗建模往往忽略线路参数的频变特性,建模结果无法准确反映电网阻尼特性。为对比分析电缆和架空线直流电网故障电流特性的差异,文中首先基于矢量拟合提出一种考虑线路参数频变特性的直流电网阻抗模型。接着,基于此模型的幅频特性,对比分析电缆与架空线直流电网故障电流时延、初始上升率和幅值的差异,并研究改变电网关键参数对2种电网故障特性的影响。所提模型阻尼特性与依频模型直流电网扫频结果相比,均方根误差低于0.6,准确性高于简化模型。最后,基于对称单极双端系统极间短路故障进行仿真。结果表明:桥臂电感值增加时电缆直流电网故障电流上升率比架空线高24.96%,验证了电缆直流电网故障电流对感性关键参数变化更敏感的结论。

关键词:频变特性;矢量拟合;阻抗建模;电缆直流电网;架空线直流电网;故障电流

中图分类号:TM726.1

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)06-0101-08

0 引言

随着环境问题的日益突出,世界各国加速了对可再生能源的开发和利用^[1]。高压直流输电是实现可再生能源大规模输送的关键技术^[2],同时随着输送容量与电压等级的提升,模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)技术近年来高速发展^[3]。在输电网架建设方面,近几年直流电缆在高压直流电网中的占比逐渐提升^[4]。尽管电缆故障率远低于架空线,但电缆故障时将直接导致线路停电,且维修困难^[5],因此分析电缆故障特性具有重要的工程意义。由于电缆和架空线的线路参数量级和频变特性不同,二者的故障电流特性存在明显差异^[6],发生故障时对MMC的影响也不同,因此应进行针对性分析。目前针对架空线和电缆故障电流特性的对比研究较少,无法从故障电流角度为直流电网输电线路选择提供有效指导。

文献[7]提出了一种基于直流电网阻抗特性分析电网故障特性的方法。而直流电网阻抗建模往往忽略线路参数的频变特性以简化分析^[8-9],因此对不同类型电网故障电流进行对比分析需要建立更准确的线路模型。输电线路模型分为集中参数模型和分布参数模型,分布参数模型包括贝杰龙(Bergeron)模型^[10]和依频模型^[11-13]。其中依频模型计及了所有参数的频变特性,是目前描述输电线路

暂态故障电流特性最为精确的电磁暂态模型^[14]。由于分布参数模型的分布特性无法用常值来描述^[15],输电线路阻抗建模只能基于集中参数模型。阻抗建模中通常使用 π 型等效模型^[16-17]、串联 π 节等效模型^[18]及串联电阻电感^[19]来对输电线路进行建模。文献[20]指出 π 型等效模型与依频模型阻尼特性差异较大,且增加 π 节的数目对改善模型阻尼特性作用不大。由此可见,传统集中参数模型无法准确描述依频模型的阻尼特性,分析直流电网故障电流特性具有局限性。

针对集中参数模型无法准确描述依频模型阻尼特性的问题,文中提出了一种可完整描述直流电网全频域阻尼特性的阻抗模型。首先,对比了电缆和架空线参数频变特性的不同;其次,通过矢量拟合得到依频模型单位阻抗频率响应的数学表达式,在此基础上对电缆与架空线直流电网分别进行了阻抗建模;然后,基于电网阻尼特性对比分析了2种电网故障电流特性的不同;最后,通过PSCAD/EMTDC仿真验证了电缆直流电网故障电流对感性关键参数变化更敏感的结论。

1 电缆和架空线参数的频变特性

依频模型是目前最精确的输电线路电磁暂态模型。与集中参数模型相比,依频模型考虑了输电线路的分布特性和参数的频变特性^[21]。文中所用架空线和电缆依频模型的配置见图1,二者均为400 kV输电线路,且稳态幅频特性接近。图1(a)中,导线分裂间距为0.45 m;地线与导线的中跨凹陷分别

收稿日期:2022-06-07;修回日期:2022-08-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52007125);国家电网有限公司总部科技项目(5100-202199274A-0-0-00)

为 14 m 和 20 m。中跨凹陷是指两杆塔间线路自然下垂时,线路最高点与最低点之间的垂直距离。图 1(b)中,导体层、护套层和铠装层的半径数据分别为 0.031 0 m,0.053 0 m 和 0.061 6 m;绝缘层 1、2、3 的半径数据分别为 0.051 0 m,0.056 1 m 和 0.066 6 m。2 种模型地面的电阻率均取 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 。

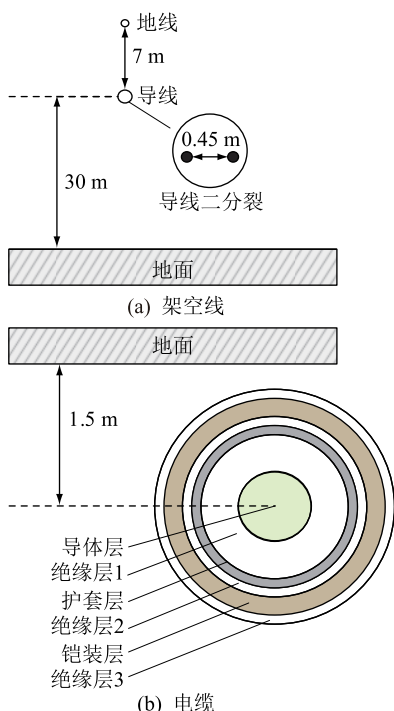


图 1 基于依频模型的输电线路配置

Fig.1 Transmission line configuration based on frequency-dependent line model

文献[22]指出输电线路对地导纳的频变特性并不明显,因此依频模型忽略了对地导纳的频变特性。表 1 为依频模型的单位对地导纳值,可见电缆单位对地电导是架空线的 10 倍,单位对地电容是架空线的 25.86 倍。

表 1 输电线路依频模型单位导纳
Table 1 Unit admittance of frequency-dependent transmission line model

输电线路类型	电导/ $(\mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1})$	电容/ $(\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$
电缆	0.1	0.257
架空线	0.01	0.009 938

图 2 为电缆和架空线单位电阻、电感的频率响应。当频率低于 1 Hz 时,电缆和架空线的电阻、电感值几乎各自相等;当频率高于 1 Hz 时,电阻随频率的增加而上升,电感随频率的增加而下降,这是由于高频电流通过输电线路时产生了趋肤效应^[23]。在 $10^2 \sim 10^4$ Hz 范围内,架空线平均电阻值是电缆的 6.026 倍,平均电感值是电缆的 11.589 倍。

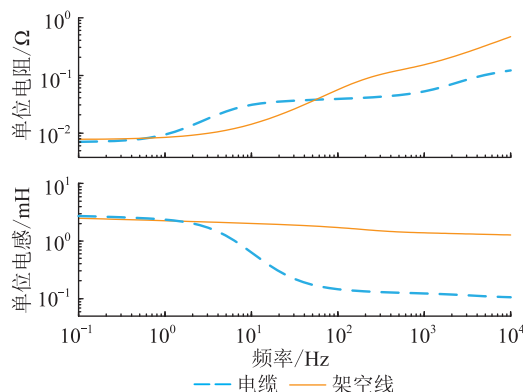


图 2 输电线路电阻和电感的频率响应

Fig.2 Frequency dependence of transmission line resistance and transmission line inductance

2 考虑参数频变特性的电缆和架空线直流电网阻抗建模

2.1 考虑参数频变特性的 π 型等效模型

文献[20]指出分布特性对输电线路的阻尼特性几乎没有影响,因此选择忽略线路分布特性的 π 型等效模型进行建模。

由式(1)和式(2)可以得到经过长线修正后的 π 型等效模型线路参数。

$$Z_{\pi} = z l \sinh(\gamma l) / (\gamma l) \quad (1)$$

$$Y_{\pi} = y l \tanh(\gamma l / 2) / (\gamma l / 2) \quad (2)$$

式中: Z_{π} 为线路阻抗; Y_{π} 为线路对地导纳; z 为线路单位阻抗,是频变参数; y 为输电线路单位对地导纳,是频变参数; l 为输电线路长度; γ 为传播系数, $\gamma = \sqrt{zy}$ 。

2.2 输电线路依频模型参数拟合

搭建 π 型等效模型须考虑式(1)和式(2)中线路参数的频变特性。使用 PSCAD/EMTDC 中的线路常量程序(line constant program, LCP)可以计算依频模型指定频率下的稳态参数值^[24],由此可得依频模型参数的频率响应。基于 π 型等效模型建立阻抗模型需要得到式(1)中单位阻抗 z 的频率响应数学表达式。输电线路阻抗频率响应包括幅值和相角两部分,因此须同时对幅值和相角进行拟合,而使用常规的拟合算法例如最小二乘法难以得到结果。文中采用文献[13]所提基于有理函数逼近的矢量拟合算法对输电线路阻抗的频率响应进行拟合。

原则上,若不考虑阶数,有理函数可以逼近任何频率响应。有理函数逼近的表达式为:

$$f(s) \approx \sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s - a_n} + d + sh \quad (3)$$

式中: s 为拉普拉斯算子; N 为拟合阶数; a_n, c_n 为复数; d, h 为实数。

设置未知的修正辅助函数 $\sigma(s)$,在高频时其值近似为1,使得 $f(s)\sigma(s)$ 与式(3)相等, $\sigma(s)$ 与 $f(s)\sigma(s)$ 有相同极点。通过式(4)可求解 $f(s)$ 。

$$\begin{bmatrix} f(s)\sigma(s) \\ \sigma(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s - \bar{a}_n} + d + sh \\ \sum_{n=1}^N \frac{c'_n}{s - \bar{a}_n} + 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: \bar{a}_n 为进行迭代计算的初始极点; c'_n 为区别于 c_n 的复数。

2.2.1 电缆参数拟合

对于电缆,可直接使用式(3)进行拟合。从 $N=1$ 开始拟合,直到拟合阶数 $N=5$ 时其拟合均方根误差首次低于 10^{-2} ,拟合表达式如式(5)所示。

$$z_{\text{cable}} = 511.14 + \frac{-2485.56}{s \times 10^{-6} + 4.87} + \frac{-0.74}{s \times 10^{-4} + 1.9} + \frac{-14.94}{s + 705.95} + \frac{-2.48}{s + 36.11} + \frac{-0.04}{s + 8.46} \quad (5)$$

式中: z_{cable} 为电缆单位阻抗的频率响应。

图3为单位阻抗频率响应与拟合结果的比较,拟合结果的均方根误差为0.00426,可知电缆参数拟合结果准确。

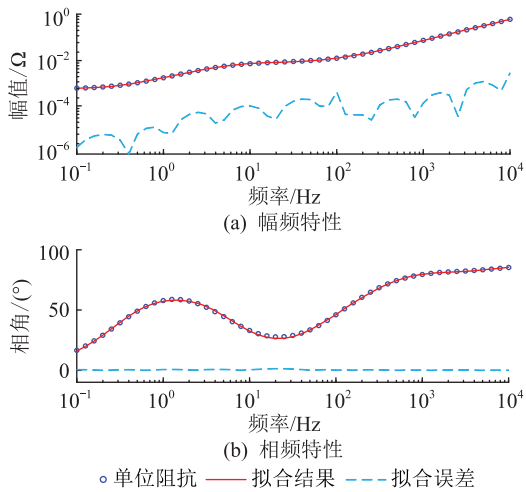


图3 基于矢量拟合算法拟合电缆单位阻抗
Fig.3 Fitting cable unit impedance based on vector fitting

2.2.2 架空线参数拟合

对于架空线,如果直接使用式(3)进行拟合,拟合阶数 N 需要取到8才能使均方根误差低于 10^{-2} 。在达到拟合精度的前提下,为降低拟合阶数,文中采用分段拟合的方法对架空线阻抗值进行拟合,采用100 Hz作为高、低频域分段拟合的分界频率^[23]。低频段取拟合阶数 $N=3$,高频段取拟合阶数 $N=5$,

其拟合表达式如式(6)所示。

$$z_{\text{line}} = \begin{cases} 14.43 + \frac{-120.76}{s \times 10^{-3} + 8.42} + \frac{-16.99}{s + 225.39} + \frac{-0.03}{s + 11.12} & s \leq 100 \times 2\pi \\ 4 + \frac{-59267.04}{s \times 10^{-6} + 6.92} + \frac{-26.93}{s \times 10^{-4} + 5.83} + \frac{-0.17}{s \times 10^{-2} + 2.25} + \frac{-0.66}{s \times 10^{-2} + 2.49} + \frac{-279.26}{s + 885.47} & s > 100 \times 2\pi \end{cases} \quad (6)$$

式中: z_{line} 为架空线单位阻抗的频率响应。

架空线参数拟合结果见图4,低频段拟合结果的均方根误差为0.00278,高频段拟合结果的均方根误差为0.00502,可知架空线参数拟合结果准确。

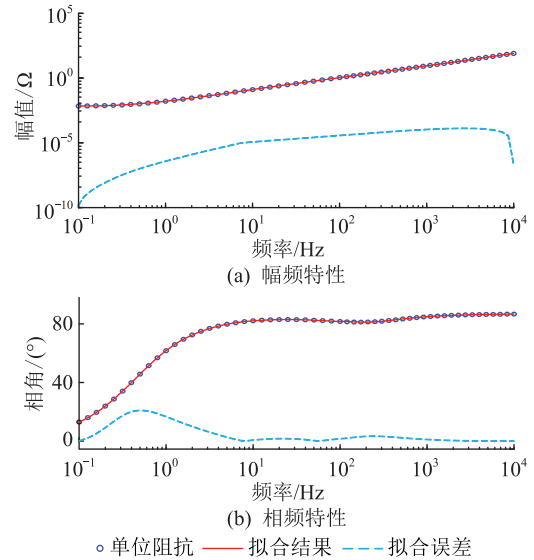


图4 基于矢量拟合算法拟合架空线单位阻抗
Fig.4 Fitting overhead line unit impedance based on vector fitting

2.3 直流电网阻抗建模

基于2.2节输电线路单位阻抗的频率响应拟合结果进行直流电网阻抗建模,以MMC端口处接入双极线路为例进行模型验证,系统结构如图5所示。其中 Z_n, Y_n 分别通过式(1)和式(2)得到,具有频变特性; Z_{MMC} 为MMC等效等值阻抗,为定直流电压控制站;输电线路长度为100 km。

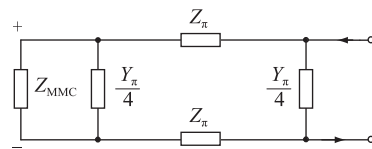


图5 MMC端口接入双极线路
Fig.5 Connecting bipolar transmission line at MMC port

从图5端口看入可得直流电网等效阻抗 Z_{dc} ,其表达式如式(7)所示。

$$Z_{dc} = \frac{\left(\frac{Z_{MMC} Y_{\pi}/4}{Z_{MMC} + Y_{\pi}/4} + 2Z_{\pi} \right) Y_{\pi}/4}{\frac{Z_{MMC} Y_{\pi}/4}{Z_{MMC} + Y_{\pi}/4} + 2Z_{\pi} + Y_{\pi}/4} \quad (7)$$

$$\begin{cases} Z_{MMC} = -\Delta u_{dc}/\Delta I_{dc} = \\ \frac{U_{ceq0} C_{eq} L_{eq} s^2 + (U_{ceq0} C_{eq} R_{eq} + I_{d0} L_{eq}) s + a}{b[1.5U_{sd0} - 3I_{sd0}(R_s + sL_s)] + I_{d0} + sC_{eq} U_{ceq0}} \\ a = U_{ceq0} + I_{d0} R_{eq} \\ b = \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) \frac{1}{1 + 3Ts} \times \frac{1.5\sqrt{2}U_s/\sqrt{3}}{P_{Base}/U_{dc,Base}} \end{cases} \quad (8)$$

式中： Δu_{dc} ， ΔI_{dc} 分别为 Z_{MMC} 两侧的电压变化量和电流变化量； C_{eq} ， L_{eq} ， R_{eq} 分别为MMC直流侧等效电容、电感和电阻； R_s ， L_s 分别为交流侧等效电阻和电感； U_{ceq0} 为直流侧电容电压稳态值； U_{sd0} ， I_{sd0} 分别为d轴电压稳态值和电流稳态值； I_{d0} 为等效受控电流源电流稳态值； k_p ， k_i 分别为比例调节系数和积分调节系数； T 为惯性时间常数； U_s 为交流侧电压； P_{Base} ， $U_{dc,Base}$ 分别为直流侧输入有功功率的基准值和直流电压的基准值。

分别将电缆和架空线直流电网阻抗建模与依频模型直流电网扫频结果进行对比，结果如图6和图7所示。电缆直流电网阻抗建模的均方根误差为0.591，架空线直流电网阻抗建模的均方根误差为0.497。由此可知，建模结果与扫频结果基本一致，说明上述阻抗建模可以准确反映依频模型直流电网的阻尼特性。

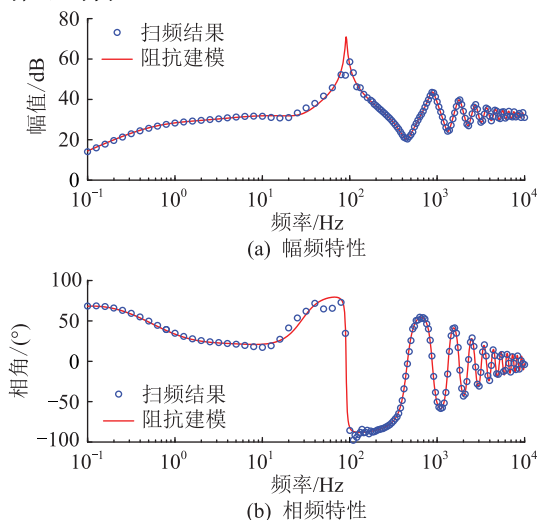


图6 电缆直流电网阻抗建模与扫频结果的比较
Fig.6 Comparison of impedance modeling and frequency sweeping results of the DC grid with cables

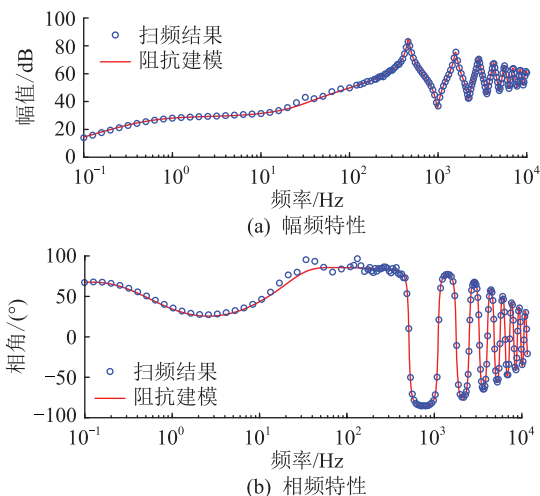


图7 架空线直流电网阻抗建模与扫频结果的比较
Fig.7 Comparison of impedance modeling and frequency sweeping results of the DC grid with overhead lines

2.4 不同直流电网阻抗模型幅频特性与扫频结果的比较

将采用文中模型、 π 型等效模型、串联 π 节模型(10 π 节)的直流电网幅频特性与依频模型直流电网扫频结果进行对比，如图8所示。由图8可知，文中模型与扫频结果基本吻合； π 型等效模型与扫频结果在低频段和高频段无法吻合；串联 π 节模型的幅频特性与 π 型等效模型接近，但随着 π 节数目的增加，串联 π 节模型对扫频结果的逼近效果有所改善。相较 π 型等效模型和串联 π 节模型，文中模型能更准确地反映依频模型的幅频特性。

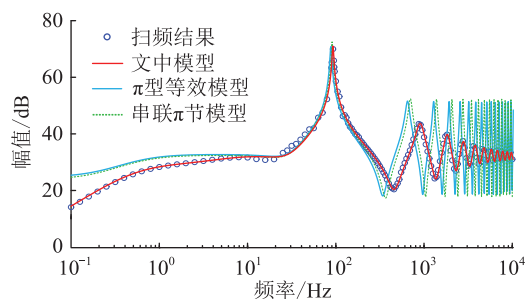


图8 不同阻抗模型幅频特性与扫频结果的比较
Fig.8 Comparison of the amplitude-frequency characteristics of different impedance models and frequency sweeping results

3 基于阻抗模型的电缆和架空线直流电网故障电流特性对比

由文献[7]理论推导可知，故障电流的频域高频段幅值决定了其时域初始上升率；又因为从故障点看入的直流电网等效总阻抗的高频幅值与故障电流的高频幅值成反比，所以直流电网高频幅值与故障电流初始上升率成负相关关系。另外，故障电

流与直流电网其余频段的阻抗特性也密切相关,从故障点看入的等效等值阻抗决定了故障电流的整体上升率。基于以上理论以及架空线和电缆在不同频段的幅频特性,文中对二者故障电流关键动态特性进行对比分析。

3.1 电缆和架空线直流电网故障电流关键特性对比

3.1.1 故障电流时延特性

极间短路故障时,与线路电压相位相反的高频电压波从故障点向两端前进,在到达换流站后使换流站子模块电容放电产生故障电流^[25]。行波自故障点到达换流站的时间即是故障电流的时延。

故障电流的时延取决于故障行波的波速。使用均匀无损单导线波速公式可得故障电流的时延计算公式,如式(9)所示。

$$t_{\text{delay}} = l_{\text{fault}} \sqrt{L_0 C_0} \quad (9)$$

式中: t_{delay} 为故障电流的时延; l_{fault} 为故障点距离换流站端口断路器的输电线路长度; L_0, C_0 分别为线路单位长度的电感值和电容值,考虑到故障行波是高频行波,取 L_0 和 C_0 的高频值。

将表1和图2中的线路参数代入式(9)计算可知,相同长度的电缆故障电流的时延是架空线的1.465倍。虽然时延特性受具体线路参数的影响,但电缆单位对地电容与电感的乘积明显大于架空线,因此电缆的时延大于架空线。

3.1.2 故障电流初始上升率与幅值

图9为电缆和架空线直流电网幅频特性的直接比较,可知架空线直流电网高频段的幅值持续高于电缆直流电网。直流电网高频段幅值与故障电流初始上升率成负相关关系,因此电缆直流电网故障电流的初始上升率应高于架空线直流电网。

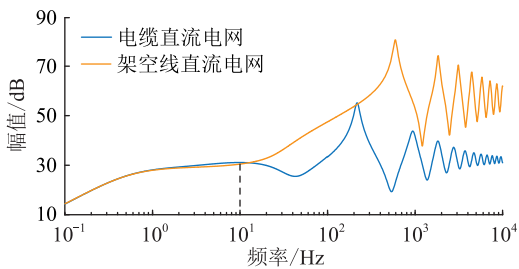


图9 电缆和架空线直流电网幅频特性比较

Fig.9 Comparison of the amplitude-frequency characteristics of the DC grid with cables and overhead lines

图9中,除了高频域首个峰值和低频域重叠部分以外,架空线直流电网的等效等值总阻抗幅值始终高于电缆直流电网。从故障点看入的电网等效等值阻抗决定了故障电流上升率,因此线路发生故障时,电缆直流电网故障电流的整体上升率应高于

架空线直流电网。由此可知,在MMC子模块电容放电期间,电缆直流电网故障电流的幅值应高于架空线直流电网。

3.2 直流电网关键参数对电缆和架空线直流电网故障电流的影响

以MMC桥臂电感为例,对比分析直流电网关键参数的变化对电缆和架空线直流电网幅频特性的影响,进一步验证模型的正确性,并以此为基础研究关键参数的变化对2种电网故障电流的影响。

基于2.3节的直流电网阻抗建模可以得到桥臂电感对幅频特性的影响结果,如图10所示。由图10可知,随着桥臂电感值的增加,直流电网中频段幅值增大;且当桥臂电感发生相同变化时,电缆直流电网幅频特性的变化比架空线直流电网明显。

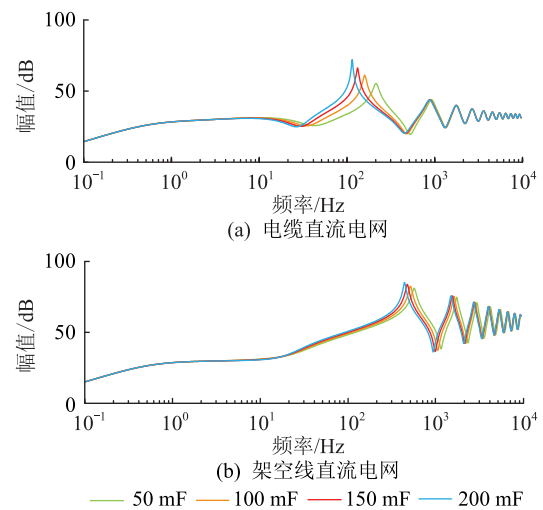


图10 桥臂电感对幅频特性的影响

Fig.10 Influence of arm inductance on amplitude-frequency characteristics

由理论分析可知,中频段幅频特性影响的是故障电流的整体上升率,因此随着桥臂电感值的增加,电网端口故障电流将会下降;与架空线直流电网相比,电缆直流电网故障电流对桥臂电感的变化会更敏感。

文献[28]指出故障电流的上升率仅与故障回路电感有关,且成反比关系。例如桥臂电感、平波电抗器等关键参数会直接影响直流电网的等效电感。由图2可知,在中高频阶段,电缆的单位电感值远低于架空线。电感相关电网关键参数的变化对架空线直流电网等效电感值影响较小,对电缆直流电网影响较大。因此,电缆直流电网对感性关键参数的变化更为敏感。

4 仿真验证

高压直流系统中常见故障类型包括单极接地

短路、极间短路和单极断线,其中极间短路最严重。文中基于 PSCAD/EMTDC 中 MMC 对称单极双端系统的极间短路故障进行仿真验证,系统参数如表 2 所示,其中 L_{arm} 为 MMC 桥臂电感; C_{SM} 为 MMC 子模块电容; R_{ON} 为 MMC 子模块导通电阻; N_{SM} 为 MMC 桥臂子模块数目; R_g, L_g 分别为 MMC 阀侧星型电抗经电阻接地时的接地电阻和接地电感。换流站间设置 200 km 输电线路,极间短路故障设置在线路中点,分析换流站 1 端口断路器处的故障电流。

表 2 对称单极双端直流电网参数
Table 2 Parameters of the symmetrical monopolar two-terminal DC grid

换流站编号	控制方式	$L_{arm}/$ mH	$C_{SM}/$ μ F	$R_{ON}/$ m Ω	N_{SM}	$L_g/$ H	$R_g/$ Ω
1	$U_{dc} = \pm 400$ kV, $Q = 0$ Mvar	50	10 000	1.361	200	2	200
2	$P = 0$ MW, $Q = 0$ Mvar	50	10 000	1.361	200	2	200

4.1 不同输电线型直流电网故障电流关键特性对比

图 11 为电缆和架空线直流电网前 10 ms 内的故障电流,可知电缆的时延为 0.5 ms,架空线的时延为 0.325 ms,电缆的时延高于架空线;电缆直流电网故障电流的初始上升率为 2 127.17 kA/s,架空线为 1 570.41 kA/s,电缆直流电网故障电流的初始上升率高于架空线直流电网;电缆直流电网故障电流幅值持续高于架空线直流电网。仿真结果与 3.1 节分析吻合。

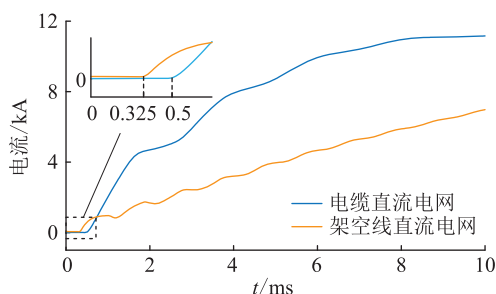


图 11 电缆与架空线直流电网故障电流仿真结果比较
Fig.11 Simulation results comparison of fault currents of the DC grid with cables and overhead lines

采用式(9)计算不同长度线路的时延,并与仿真结果对比,结果如表 3 所示,可以观察到计算结果与仿真结果误差皆不高于 5%,说明计算与仿真近似吻合。时延计算误差主要受 MMC 端口等效电容、电感的影响,随着线路长度增加,MMC 等效电容、电感造成的影响越小,计算误差越低。电缆单位电容、电感乘积更大,因此 MMC 等效电感、电容造成的影响相对较小,所以在计算中电缆时延误差小于同等长度下的架空线。

表 3 计算时延与仿真时延的对比

Table 3 Comparison of calculation delay and simulation delay

线路长度/km	电缆			架空线		
	计算时延/ms	仿真时延/ms	误差/%	计算时延/ms	仿真时延/ms	误差/%
100	0.523	0.510	2.549	0.357	0.340	5.000
200	1.046	1.030	1.553	0.714	0.685	4.234
300	1.569	1.545	1.553	1.070	1.030	3.883
400	2.091	2.075	1.063	1.426	1.375	3.709

4.2 关键参数对不同输电线型直流电网故障电流的影响

图 12 描述了 MMC 桥臂电感发生变化时,电缆和架空线直流电网前 10 ms 故障电流随之产生的变化。

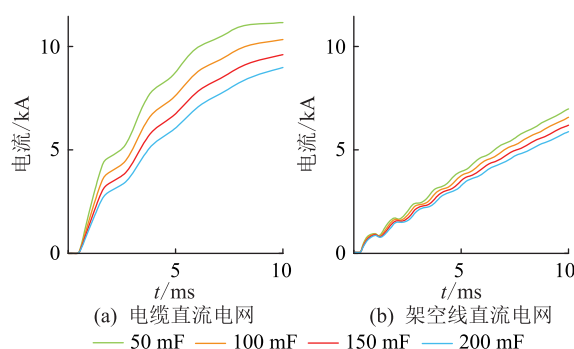


图 12 不同桥臂电感下的故障电流

Fig.12 Fault currents under different arm inductances

由图 12 可知,MMC 桥臂电感值由 50 mF 依次上升到 100 mF、150 mF、200 mF 时,对于电缆直流电网,10 ms 时的故障电流依次下降了 7.35%、7.09%、6.44%;而对于架空线直流电网,故障电流依次下降了 5.77%、5.87%、5.07%;桥臂电感值增加时电缆直流电网故障电流上升率比架空线直流电网平均高 24.96%。显然,与架空线直流电网相比,电缆直流电网故障电流对桥臂电感的变化更敏感。仿真结果与 3.2 节分析吻合。

5 结论

文中以依频模型阻尼特性为基础,提出了一种考虑输电线路参数频变特性的直流电网阻抗模型。通过 PSCAD/EMTDC 仿真验证了所提模型的正确性。同时,基于该模型的幅频特性,对比分析了电缆和架空线直流电网故障电流特性的不同,明确了在直流电网中,对于长度相同、稳态幅频特性接近的电缆和架空线,故障电流特性有如下不同:

(1) 输电线路故障电流存在时延现象,时延时间与线路长度成正比。电缆故障电流的时延时间

大于架空线;

(2) 电缆直流电网故障电流的初始上升率和整体幅值高于架空线直流电网;

(3) 与架空线直流电网相比,电缆直流电网故障电流对桥臂电感、平波电抗器等感性关键参数的变化更为敏感。

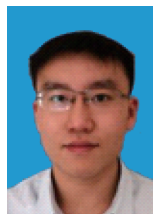
文中所提模型可准确描述输电线路阻抗特性。基于文中模型,下一步研究将在频域对直流电网故障电流进行定量计算,由此进一步对电缆和架空线的故障电流特性进行定量分析。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 贺之渊,陆晶晶,刘天琪,等. 柔性直流电网故障电流抑制关键技术与展望[J]. 电力系统自动化,2021,45(2):173-183.
HE Zhiyuan, LU Jingjing, LIU Tianqi, et al. Key technologies and prospect of fault current suppression in flexible DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(2): 173-183.
- [3] 叶敏芝,喻哲扬,徐政. 欧洲柔性直流电网的规划及其仿真研究[J]. 电力工程技术,2020,39(6):66-75.
YE Minzhi, YU Zheyang, XU Zheng. Planning and simulation research of European VSC-HVDC grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 66-75.
- [4] 陈宗正,张旭航,申亚,等. 基于500 kV长距离电缆线路的合闸过电压研究[J]. 电瓷避雷器,2021(6):108-112.
CHEN Zongzheng, ZHANG Xuhang, SHEN Ya, et al. Closing overvoltage based on EHV long-distance cable line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(6): 108-112.
- [5] 周远翔,赵健康,刘睿,等. 高压/超高压电力电缆关键技术分析及展望[J]. 高电压技术,2014,40(9):2593-2612.
ZHOU Yuanxiang, ZHAO Jiankang, LIU Rui, et al. Key technical analysis and prospect of high voltage and extra-high voltage power cable [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2593-2612.
- [6] 刘伟,陈皓. 基于分布参数模型的混合线路故障测距新算法[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(24):76-80,132.
LIU Wei, CHEN Hao. A new fault location algorithm for hybrid transmission line based on distributed parameter model [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 76-80, 132.
- [7] LI Y J, LI J P, XIONG L S, et al. DC fault detection in meshed MTDC systems based on transient average value of current[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(3): 1932-1943.
- [8] 吕敬,蔡旭,张占奎,等. 海上风电场经MMC-HVDC并网的阻抗建模及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(14):3771-3781.
LYU Jing, CAI Xu, ZHANG Zhankui, et al. Impedance modeling and stability analysis of MMC-based HVDC for offshore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3771-3781.
- [9] 吕敬,蔡旭,张健文. 模块化多电平换流器的交直流侧阻抗模型[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):131-136,143.
LYU Jing, CAI Xu, ZHANG Jianwen. AC and DC-side impedance models of modular multilevel converter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 131-136, 143.
- [10] SEMLYEN A, DABULEANU A. Fast and accurate switching transient calculations on transmission lines with ground return using recursive convolutions[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1975, 94(2): 561-571.
- [11] MARTI J R. Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, PAS-101(1): 147-157.
- [12] GUSTAVSEN B, IRWIN G, MANGELRØD R, et al. Transmission line models for the simulation of interaction phenomena between parallel AC and DC overhead lines[C]//Proceedings of International Conference on Power Systems Transients (IPST 1999), June 20-24, 1999, Budapest, Hungary: 61-67.
- [13] GUSTAVSEN B, SEMLYEN A. Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3): 1052-1061.
- [14] BEERTEN J, D'ARCO S, SUUL J A. Cable model order reduction for HVDC systems interoperability analysis[C]//11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Birmingham, UK. Institution of Engineering and Technology, 2015: 1-10.
- [15] WEDEPOHL L M, NGUYEN H V, IRWIN G D. Frequency-dependent transformation matrices for untransposed transmission lines using Newton-Raphson method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(3): 1538-1546.
- [16] PINTO R T, RODRIGUES S, BAUER P, et al. Operation and control of a multi-terminal DC network [C]//2013 IEEE ECCE Asia Downunder. Melbourne, VIC, Australia. IEEE, 2013: 474-480.
- [17] PINARES G, TJERNBERG L B, TUAN L A, et al. On the analysis of the DC dynamics of multi-terminal VSC-HVDC systems using small signal modeling [C]//2013 IEEE Grenoble Conference. Grenoble, France. IEEE, 2013: 1-6.
- [18] CHAUDHURI N R, MAJUMDER R, CHAUDHURI B. Stability analysis of VSC MTDC grids connected to multimachine AC systems [C]//2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA, USA. IEEE, 2012.
- [19] KALCON G O, ADAM G P, ANAYA-LARA O, et al. Small-signal stability analysis of multi-terminal VSC-based DC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1818-1830.
- [20] 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.
- [21] MORCHED A, GUSTAVSEN B, TARTIBI M. A universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3):1032-1038.
- [22] MARTINEZ-VELASCO J A. Power system transients: parameter determination [M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2010.
- [23] WIGINGTON R L, NAHMAN N S. Transient analysis of coaxial cables considering skin effect [J]. Proceedings of the IRE, 1957, 45(2):166-174.
- [24] URIBE F A. Calculating mutual ground impedances between overhead and buried cables [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2008, 50(1):198-203.
- [25] 林圣, 武骁, 何正友, 等. 基于行波固有频率的电网故障定位方法 [J]. 电网技术, 2013, 37(1):270-275.
LIN Sheng, WU Xiao, HE Zhengyou, et al. A power system fault location method based on natural frequencies of traveling waves [J]. Power System Technology, 2013, 37(1):270-275.
- [26] TAO Y, LI B H, DRAGICEVIC T, et al. HVDC grid fault current limiting method through topology optimization based on genetic algorithm [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(6):7045-7055.

作者简介:



陈思危

陈思危(1998),男,硕士在读,研究方向为柔性高压直流输电故障(E-mail:905023609@qq.com);

李保宏(1986),男,博士,副教授,研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电、直流电网和交直流混联电网稳定分析;

刘天琪(1962),女,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电、柔性直流电网。

Impedance modeling of DC grid considering the frequency-dependent characteristics of cable and overhead line parameters

CHEN Siwei¹, LI Baohong¹, LIU Tianqi¹, HE Chuan¹, ZHANG Min², WANG Tengxin²

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Grid Shanxi Electric Power Company Research Institute, Taiyuan 030001, China)

Abstract: The fault characteristics of direct current (DC) grids can be analyzed by addressing the grid damping characteristics. However, the frequency-dependent characteristics of the transmission line parameters are usually ignored in the conventional grid impedance modeling methods, which cannot accurately reflect the grid damping characteristics. To compare and analyze the fault currents characteristics of the DC grids with cables and overhead lines, an impedance model of DC grid considering the frequency-dependent characteristics of the transmission line parameters based on vector fitting is proposed in this paper. Then, the proposed model is applied to compare and analyze the fault current features including time delays, initial rising rates and amplitudes of the DC grids with cables and overhead lines. Meanwhile, the impacts of the DC grids key parameters on the fault current characteristics of the two DC grids are investigated. Compared with the sweeping results of the frequency-dependent line model, the proposed model performs well in reflecting the damping characteristic of the DC grid, where the root square error is less than 0.6, informing that the proposed model is much more accurate than the simplified model. Finally, the simulation is conducted in a symmetrical monopolar two-terminal DC grid with pole-to-pole fault. The simulation results show that the fault current rising rate of the DC grid with cables is 24.96% higher than that of the DC grid with overhead lines when the arm inductance is increased, which validates that the fault currents of the DC grids with cables are more sensitive to the inductive key parameters than the DC grids with overhead lines.

Keywords: frequency-dependent characteristics; vector fitting; impedance modeling; direct current (DC) grid with cables; DC grid with overhead lines; fault current

(编辑 陆海霞)