

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231300

MMC型柔性直流输电系统的中高频振荡无源阻尼抑制策略

聂永辉¹, 张德伟¹, 高磊², 吴春迎¹, 张瑞东¹

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 较长的控制链路延时会导致基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔性直流输电系统阻抗在高频段出现负阻尼区间, 易与交流系统分布电容相互作用引发高频振荡。现有有源阻尼抑制策略虽可有效抑制高频振荡, 但会恶化中频段阻抗特性, 增加中频振荡发生的风险。为有效抑制中高频振荡, 提出在 MMC 交流侧母线处并联无源阻抗重塑装置的无源阻尼抑制策略。首先, 推导出 MMC 简化模型并验证其准确性。其次, 根据奈奎斯特稳定判据与最小功率损耗约束设计阻抗重塑装置参数, 实现 MMC 系统阻抗重塑。最后, 应用阻抗法对比分析重塑前后 MMC 系统阻抗特性, 分析阻抗重塑装置对 MMC 系统阻抗的修正效果。在 PSCAD/EMTDC 中搭建含无源阻抗重塑装置的 MMC 电磁暂态仿真模型。仿真结果表明, 该抑制策略在中高频段均可有效抑制 MMC 系统的振荡现象, 对系统稳态特性影响小, 且基频功率损耗低。

关键词: 柔性直流输电; MMC 简化模型; 中高频振荡; 阻抗稳定分析; 无源阻抗重塑装置

Passive damping suppression strategy for medium and high frequency oscillations in MMC type flexible DC transmission systems

NIE Yonghui¹, ZHANG Dewei¹, GAO Lei², WU Chunying¹, ZHANG Ruidong¹

(1. College of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: Long control link delays can lead to negative damping in the impedance range of flexible DC transmission systems based on modular multi platform converters (MMC). These can easily interact with distributed capacitors in the AC system and cause high-frequency oscillations. Although existing active damping suppression strategies can effectively suppress high-frequency oscillations, they will deteriorate the impedance characteristics of the mid frequency range and increase the risk of mid frequency oscillations. To effectively suppress mid-to-high frequency oscillations, this paper proposes a passive damping suppression strategy by paralleling a passive impedance reshaping device at the AC side bus of the MMC. First, an MMC simplified model is derived and its accuracy is verified. Secondly, impedance reshaping device parameters are designed based on the Nyquist stability criterion and minimum power loss constraint to achieve impedance reshaping of the MMC system. Finally, the impedance method is applied to compare the impedance characteristics of the MMC system before and after reshaping, and the correction effect of the impedance reshaping device on the impedance of the MMC system is analyzed. An MMC electromagnetic transient simulation model with a passive impedance reshaping device is built in PSCAD/EMTDC. The results show that this suppression strategy can effectively suppress the oscillation phenomenon of the MMC system in the mid-to-high frequency range, with little impact on the steady-state characteristics of the system, and low fundamental frequency power loss.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Jilin Province (No. 20230101216JC).

Key words: flexible DC transmission; MMC simplified model; mid-to-high frequency oscillations; impedance stability analysis; passive impedance reshaping device

0 引言

模块化多电平换流器(modular multilevel converter,

MMC)柔性直流输电技术由于其换相可靠性高, 控制方式灵活, 谐波含量低等优点在高压直流输电领域中被广泛应用^[1-5]。自 2010 年后, 随着柔性直流输电工程大量投入运行, MMC 并网工程稳定性问题也愈加明显, 高频振荡现象频繁出现^[6-7], 给电力

基金项目: 吉林省自然科学基金项目资助(20230101216JC)

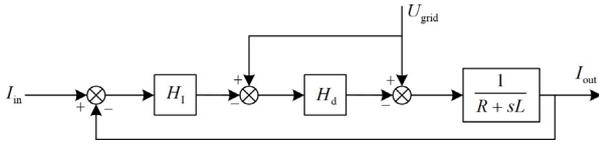


图 2 MMC 简化模型框图

Fig. 2 Block diagram of MMC simplified model

根据图 2 中 U_{grid} 与 I_{out} 的关系, 可知 MMC 的阻抗表达式为

$$Z_{\text{MMC1}} = \frac{sL + H_1 H_d}{1 - H_d} \quad (1)$$

其中, H_d 可以表示为

$$H_d = e^{-sT_d} \quad (2)$$

式中, T_d 为控制系统总延时。

由式(1)可知, 分子中 $sL = 2\pi f_p L$, sL 的相角恒定, 幅值随着频率 f_p 的增加而线性增加, 在中高频段, 其值远大于分子中另一项, 因此 MMC 的阻抗表达式可简化为

$$Z_{\text{MMC}} = \frac{sL}{1 - H_d} \quad (3)$$

为验证 MMC 简化模型的准确性, 在 PSACD/EMTDC 电磁暂态仿真软件中搭建 MMC 的详细模型, 仿真参数如表 1 所示。每隔 50 Hz 设置一个扫频点, 通过扫频得到 MMC 详细模型交流侧的阻抗特性。以扫频结果为基准, 通过 Matlab 计算 MMC 简化模型阻抗特性, 对比结果如图 3 所示。在 200~2500 Hz 频段, MMC 简化模型阻抗特性和详细模型扫频阻抗特性基本一致。验证了 MMC 简化模型的准确性。

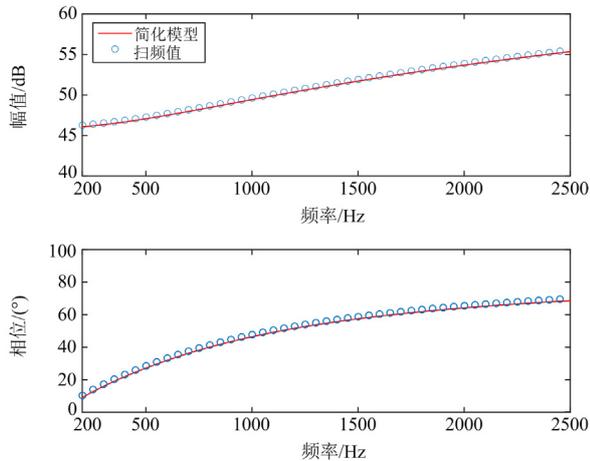


图 3 MMC 简化模型理论值与扫频值对比验证

Fig. 3 Comparison and verification of theoretical values and sweep frequency values of MMC simplified model

表 1 MMC 主电路及控制部分参数

Table 1 Parameters of MMC main circuit and control section

项目	数值	项目	数值
交流电压/kV	525	直流电压/kV	840
桥臂子模块数 N	500	桥臂电容/mF	11
桥臂阻感 R, L	0.1 Ω 、140 mH	额定功率/MW	1250
电流内环 K_p	1	电流内环 K_i	30
链路延时 $T_d/\mu\text{s}$	400	换流变压器比	525/437

1.2 交流线路阻抗模型

高频振荡是由 MMC 与交流线路之间的相互作用导致的, 因此也应建立相应的交流线路阻抗模型。本文选用 20 个 π 型等值电路模拟交流线路阻抗特性。每个 π 型回路包括等效电阻 R_g 、等效电感 L_g 、等效电容 C_g , 其值可由线路等效参数 r, l, c 和线路长度 L_{line} 表示。

$$R_g = \frac{rL_{\text{line}}}{n}, L_g = \frac{lL_{\text{line}}}{n}, C_g = \frac{cL_{\text{line}}}{n} \quad (4)$$

式中, n 代表等效 π 型电路数量。交流线路阻抗 Z_{line} 可以表示为

$$Z_{\text{line}}(s) = \frac{1}{sC_g} \parallel \frac{\overbrace{2(sL_g + R_g)}^{20\text{个循环}}}{sC_g} \parallel \frac{1}{sL} \quad (5)$$

通过扫频得到交流线路的阻抗特性曲线如图 4 所示。由图 4 可知, 交流线路阻抗相位特性在感性(相位在 $+90^\circ$ 附近)和容性(相位在 -90° 附近)之间周期性变化。

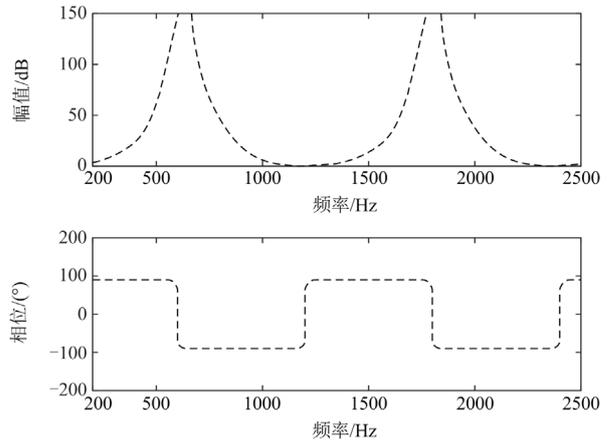


图 4 交流线路阻抗特性

Fig. 4 AC line impedance characteristics

2 MMC 系统稳定性分析与阻抗重塑思想

2.1 MMC 系统稳定性分析

较长的控制链路延时使 MMC 型柔性直流输电系统在中高频段出现负阻尼(相位超过 90°)区间。当控

制链路延时分别为 $0 \mu\text{s}$ 、 $400 \mu\text{s}$ 、 $600 \mu\text{s}$ 时, MMC 的阻抗特性曲线如图 5 所示。

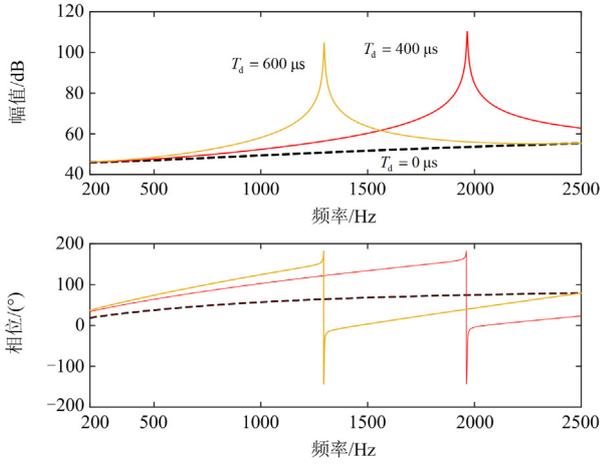


图 5 不同延时 MMC 阻抗特性

Fig. 5 MMC impedance characteristics for different delays

由图 5 可知, 当控制链路延时为 $0 \mu\text{s}$ 时, MMC 没有表现出负阻尼特性; 随着链路延时的增加, MMC 出现负阻尼区间且向低频段方向移动。

根据奈奎斯特稳定判据, MMC 系统发生高频振荡需要同时满足式(6)和式(7)所示的两个条件。

$$\frac{|Z_{\text{MMC}}|}{|Z_{\text{line}}|} = 1 \quad (6)$$

$$|\angle Z_{\text{MMC}} - \angle Z_{\text{line}}| \geq 180^\circ \quad (7)$$

根据 MMC 与交流线路的阻抗特性可知, MMC 阻抗幅频特性曲线与交流线路阻抗幅频特性曲线一定会存在交点。因此本文从相位特性出发, 由于交流线路阻抗相位特性曲线在正负 90° 之间周期变化, 只需要控制 MMC 阻抗相位在正负 90° 之间变化, 即可保证两者相位差在 180° 以内, 使 MMC 系统不满足高频振荡发生条件。

2.2 阻抗重塑思路

为方便对无源阻抗重塑装置参数进行设计, 将无源阻抗重塑装置与 MMC 等效成一个整体, 附加无源阻抗重塑装置后柔性直流输电系统结构框图如图 6 所示。

无源阻抗重塑装置由电阻 R_F 、电感 L_F 、滤波电容 C_1 和电容 C_2 组成, 其中 C_2 与电阻 R_F 串联, 这种结构可以显著提高基频时 $R_F C_2$ 支路的阻抗, 使无源阻抗重塑装置在截止频率之前可等效成单调谐滤波器, 从而减少功率损耗。在截止频率之后, $R_F C_2$ 支路的阻抗明显低于 L_F 提供的阻抗, 电流主要流经 $R_F C_2$ 支路。无源阻抗重塑装置的阻抗可用式(8)表示。

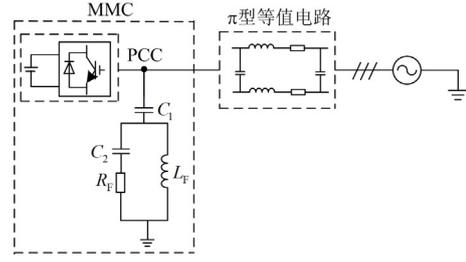


图 6 附加无源阻抗重塑装置系统结构框图

Fig. 6 Block diagram of additional passive impedance remodeling device system structure

$$Z_F = \frac{1}{sC_1} + \left(\frac{1}{sC_2} + R_F \right) // sL_F \quad (8)$$

无源阻抗重塑装置具有高通特性, 在高频段可以为 MMC 提供正阻尼。因此可以通过对阻抗重塑装置的参数 R_F 、 L_F 、 C_1 、 C_2 进行设计, 使阻抗重塑装置提供的正阻尼抵消 MMC 因控制链路延时产生的负阻尼, 以保证柔性直流输电系统的稳定运行。重塑之后 MMC 系统的阻抗特性可用式(9)表示。

$$Z_{\text{MMC}'} = Z_{\text{MMC}} // Z_F = \left(\frac{sL}{1 - e^{-sT_d}} \right) // \left(\frac{1}{sC_1} + \left(\frac{1}{sC_2} + R_F \right) // sL_F \right) \quad (9)$$

滤波电容 C_1 的存在导致低频段时电流无法流入阻抗重塑装置, 在低频段 MMC 的阻抗小于阻抗重塑装置的阻抗, 并联后 MMC 系统的阻抗更接近 MMC 的阻抗。在高频段, 随着电感 L 增大, 阻抗重塑装置中 $R_F C_2$ 支路成为电流的主要通路, 此时 MMC 的阻抗远大于阻抗重塑装置的阻抗, 并联后 MMC 系统的阻抗更接近阻抗重塑装置的阻抗。随着频率的增加, 阻抗重塑装置的阻性增加, 重塑之后的阻抗相位曲线也更加接近零点。

3 基于阻抗重塑抑制方法的实现

无源阻抗重塑装置谐波等效阻抗可以用式(10)表示。

$$Z_F(\omega) = R_F(\omega) + jX_F(\omega) \quad (10)$$

式中: ω 为谐波角频率; $R_F(\omega)$ 为滤波器等效谐波电阻, 可用式(11)表示; $X_F(\omega)$ 为滤波器等效谐波电抗, 可用式(12)表示。

$$R_F(\omega) = \frac{A\omega^4}{\omega^2(R_F C_2)^2 + (\omega^2 L_F C_2 - 1)^2} \quad (11)$$

$$X_F(\omega) = \frac{N_X(\omega)}{D_X(\omega)} = \frac{B\omega^4 + C\omega^2 - 1}{\omega C_1 (\omega^2(R_F C_2)^2 + (\omega^2 L_F C_2 - 1)^2)} \quad (12)$$

$$\begin{cases} A = R_F L_F^2 C_2^2 \\ B = R_F^2 C_2^2 L_F C_1 - L_F^2 C_1 C_2 - L_F^2 C_2^2 \\ C = L_F C_1 + 2L_F C_2 - R_F^2 C_2^2 \end{cases} \quad (13)$$

其中, $N_x(\omega)$ 、 $D_x(\omega)$ 为中间变量。

1) 对滤波电容 C_1 进行设计

无源阻抗重塑装置中的电容 C_1 在额定功率下运行会产生一定的无功补偿, 所以电容值不能太大。工程中规定, 无功补偿不超过系统额定有功功率的 5% 时, 其对系统的影响可以忽略^[24]。可以通过式(14)求电容 C_1 的值。

$$Q_c = \omega_0 C_1 U^2 \leq 0.05 P_N \quad (14)$$

式中: Q_c 为电容 C 提供的无功补偿容量; ω_0 为基频角频率; U 为交流母线电压值; P_N 为系统额定有功功率。

2) 对电感 L_F 进行设计

在截止频率处, 电感 L_F 与电容 C_1 发生谐振, 可通过式(15)求取电感 L_F 的值。

$$L_F = \frac{1}{\omega_h^2 C_1} \quad (15)$$

式中, ω_h 是 h 次谐波的角频率, $\omega_h = h\omega_0$ 。

3) 对电容 C_2 进行设计

C_2 的作用是减少阻抗重塑装置基频下的有功损耗, 无源阻抗重塑装置基频下功率损耗 P_{FL} 可用式(16)表示。

$$P_{FL} = \operatorname{Re} \left(\frac{U^2}{Z_F(\omega_1)} \right) = \frac{U^2 A \omega_1^6}{A \omega_1^6 + B \omega_1^4 + C \omega_1^2 + 1} \quad (16)$$

C_1 、 L_F 通过式(14)和式(15)已求出, 可通过寻找 C_2 和 R_F 的最优解来确定最小有功损耗。即

$$\min P_{FL} = f(R_F, C_2) \quad (17)$$

式中, $f(R_F, C_2)$ 表示有功损耗最小时, 求 R_F 、 C_2 值的中间函数。

当 $\omega > \omega_h$ 时, $X_F(\omega) > 0$, 这意味着在截止频率以上, 无源阻抗重塑装置阻抗特性表现为非容性, 故有如下约束条件。

$$g_1(R_F, C_2) \leq 0; g_2(R_F, C_2) \leq 0; g_3(R_F, C_2) \leq 0 \quad (18)$$

式中: $g_1(R_F, C_2) = C_2 - C_1$; $g_2(R_F, C_2) = C_1 L / (R_F C_1 - L) - C_2$; $g_3(R_F, C_2) = L_F - R_F^2 C_1$ 。

通过 KKT 最优化求解方式, 得出电容 C_2 的表达式如式(19)所示。

$$C_2 = \frac{C_1 L_F}{R_F^2 C_1 - L_F} \quad (19)$$

当 C_2 达到最大值即 $C_2 = C_1$ 时, 电阻 R_F 达到最

小值, $R_F = (2L_F / C_1)^{1/2}$ 。由式(12)可知, $D_x(\omega)$ 始终是正的, 当 $X_F(\omega \geq \omega_h) \geq 0$ 时, 则有 $N_x(\omega \geq \omega_h) \geq 0$ 。

$$N_x(\omega \geq \omega_h) \geq 0 \Leftrightarrow \begin{cases} C_2 \geq \frac{C_1 L_F}{R_F^2 C_1 - L_F} \\ R_F \geq \sqrt{\frac{2L_F}{C_1}} \end{cases} \quad (20)$$

式(20)中有两个约束条件, 一是电容 C_2 的最小值边界, 二是电阻 R_F 的取值范围, 根据电容 C_2 与电阻 R_F 的逆关系, 可得电容 C_2 的取值范围如式(21)所示。

$$\frac{C_1 L_F}{R_F^2 C_1 - L_F} \leq C_2 \leq C_1 \quad (21)$$

4) 对电阻 R_F 进行设计

阻抗重塑装置中电阻 R_F 的主要作用是提供正阻尼, 以抵消 MMC 换流器产生的负阻尼, 可通过式(22)求取 R_F 的取值范围。

$$-90^\circ < \operatorname{Arg} \left(\left(\frac{sL_F}{1 - e^{sT_d}} \right) // \left(\frac{1}{sC_1} + \left(\frac{1}{sC_2} + R_F \right) // sL_F \right) \right) < 90^\circ \quad (22)$$

已知 C_1 、 L_F 的大小, C_2 可用 C_1 、 L_F 、 R_F 表示, 则式(22)可等效成关于 R_F 的一阶方程, 根据限定条件, 即可求出电阻 R 的取值范围, 进而计算出电容 C_2 的取值范围。

根据 PSCAD 电磁暂态仿真模型的阻抗扫频结果, 延时为 400 μ s 时, MMC 的负阻尼区间在 950~1950 Hz 频段, 控制链路延时的增加会导致 MMC 的负阻尼区间向左移动; 另外无源阻抗重塑装置提供的相位补偿较大, 且负阻尼开始频段对 MMC 阻抗特性影响较小。考虑以上因素, 截止频率选取 900 Hz。根据式(14)、式(15)、式(21)和式(22)可求出阻抗重塑装置参数。

综上所述, 阻抗重塑装置的参数设计流程如图 7 所示。

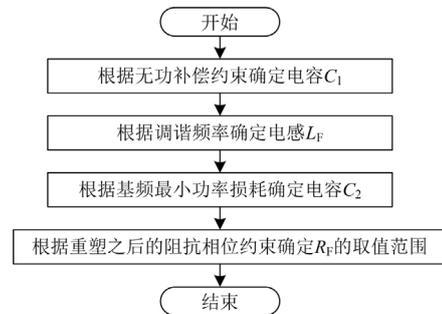


图 7 阻抗重塑装置参数设计流程

Fig. 7 Parameter design process for impedance reshaping device

4 抑制有效性验证及系统稳态特性分析

通过计算, 阻抗重塑装置的电阻 R 在 111.64Ω 到 356.58Ω 之间满足重塑后的 MMC 系统阻抗相位要求, 根据式(14), 电容 C_1 产生的无功补偿在 62.5 Mvar 之内时对系统的影响可以忽略。为保留一定的相位裕度, 阻抗重塑装置参数选取如表 2 所示。

表 2 无源阻抗重塑装置参数

参数	数值	参数	数值
补偿容量/Mvar	60	截止频率/Hz	900
电感 L/H	0.043	电容 $C_1/\mu\text{F}$	0.69
电容 $C_2/\mu\text{F}$	0.25	电阻/ Ω	250

4.1 高频振荡有效性验证

将控制链路延时分别设置为 $400 \mu\text{s}$ 和 $600 \mu\text{s}$, 利用阻抗法进行稳定性分析, 对比加入阻抗重塑装置前后 MMC 系统的阻抗特性, 并通过 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件来验证阻抗重塑装置对 MMC 系统的中高频振荡抑制的有效性。

当延时为 $400 \mu\text{s}$ 时, 未附加阻抗重塑装置和附加阻抗重塑装置的 MMC 系统阻抗特性如图 8 所示。由图 8 可知, 附加阻抗重塑装置后, MMC 系统阻抗相频特性得到了明显的改善, 负阻尼区间被阻抗重塑装置提供的正阻尼抵消, 发生高频振荡的风险被消除。通过 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件进行验证, 波形如图 9(a)所示, 在 2 s 时将延时切换为 $400 \mu\text{s}$, MMC 系统出现振荡现象, 2.1 s 时通过 FFT 分析得知系统发生了 1857.63 Hz 的高频振荡, 如图 9(b)所示。在 2.2 s 时投入阻抗重塑装置, 系统振荡逐渐消失, 对 2.35 s 时 A 相电压进行 FFT 分析, 分析结果如图 9(c)所示, 高频振荡得到了有效抑制。

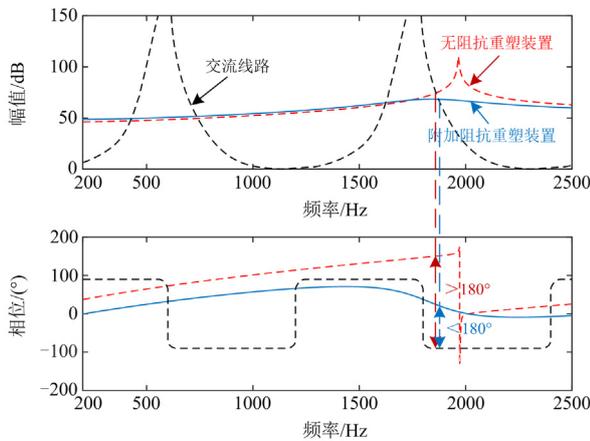
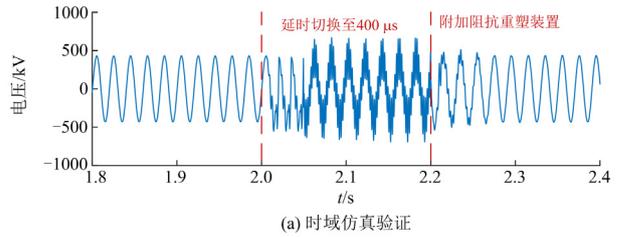
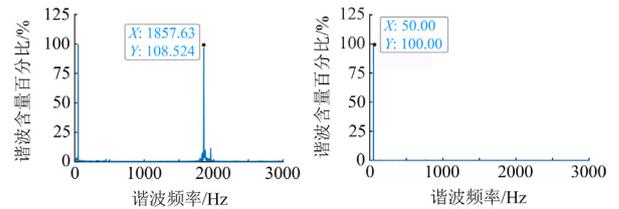


图 8 $400 \mu\text{s}$ 延时 MMC 系统阻抗特性分析

Fig. 8 Impedance characterization of $400 \mu\text{s}$ delay MMC system



(a) 时域仿真验证



(b) 2.1 s时FFT分析

(c) 2.35 s时FFT分析

图 9 $400 \mu\text{s}$ 延时 MMC 系统时域仿真验证

Fig. 9 Time domain simulation verification of $400 \mu\text{s}$ delay MMC system

当控制链路延时为 $600 \mu\text{s}$ 时, 未附加阻抗重塑装置和附加阻抗重塑装置的 MMC 系统阻抗特性如图 10 所示。由图 10 可知, 附加阻抗重塑装置之后, MMC 阻抗相位特性曲线与交流线路阻抗相位特性曲线的相位差始终小于 180° , 根据奈奎斯特稳定判据, 柔性直流输电系统稳定运行。为验证阻抗重塑装置对 MMC 系统的中高频振荡抑制的有效性, 通过 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件进行验证, 2 s 之前延时设置为 0, 此时系统稳定运行, 在 2 s 时将延时切换为 $600 \mu\text{s}$, 系统出现振荡现象, 2.1 s 时 A 相电压 FFT 分析结果如图 11(b)所示, 系统出现了 731.554 Hz 的中频振荡现象, 在 2.2 s 时投入阻抗重塑装置, 2.35 s 时 A 相电压 FFT 分析结果如图 11(c)所示, 只有基频波动。

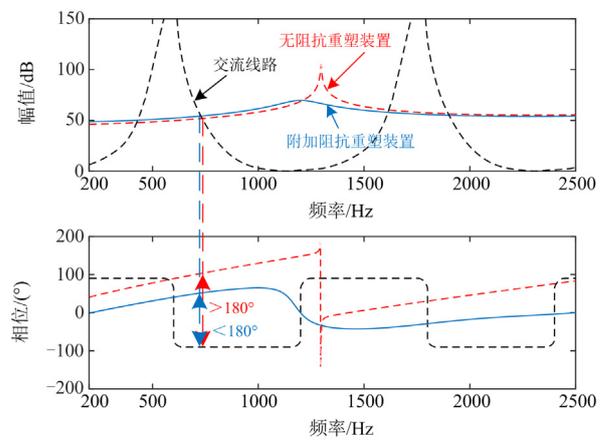


图 10 $600 \mu\text{s}$ 延时 MMC 系统阻抗特性分析

Fig. 10 Impedance characterization of $600 \mu\text{s}$ delay MMC system

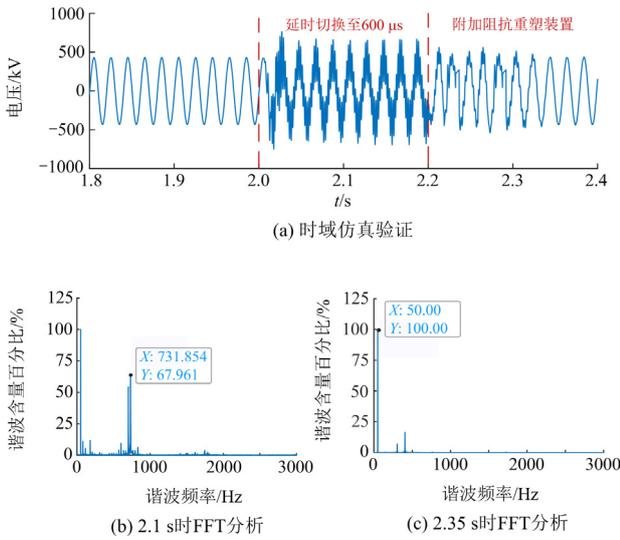


图 11 600 μs 延时 MMC 系统时域仿真验证
Fig. 11 Time domain simulation verification of 600 μs delay MMC system

上述分析表明, 在 MMC 交流侧母线处并联阻抗重塑装置可有效抑制 MMC 系统的高频振荡。

4.2 系统稳态特性分析

4.2.1 无源阻抗重塑装置对系统稳态特性影响分析

附加无源阻抗重塑装置对系统高频振荡进行抑制时, 首先要保证阻抗重塑装置对系统稳定运行无影响。本文通过对比加入阻抗重塑装置前后电压、电流运行特性以及有功功率阶跃特性来验证附加阻抗重塑装置对系统稳态特性的影响。

有功功率阶跃变化时加入阻抗重塑装置与未加入阻抗重塑装置时的功率特性变化曲线如图 12 所示, 可见两者功率特性基本保持一致。

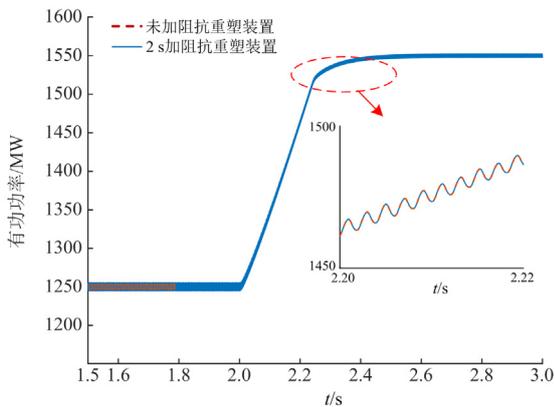
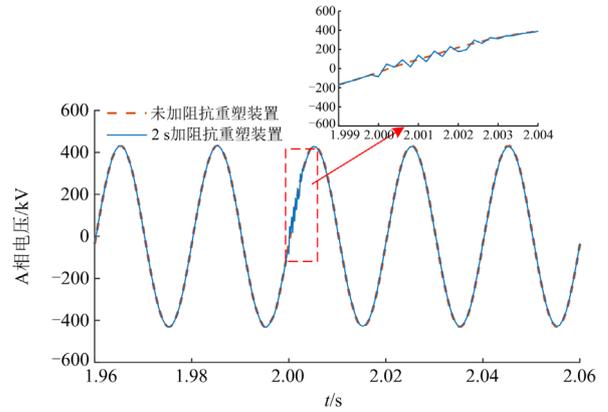


图 12 功率阶跃特性波形图

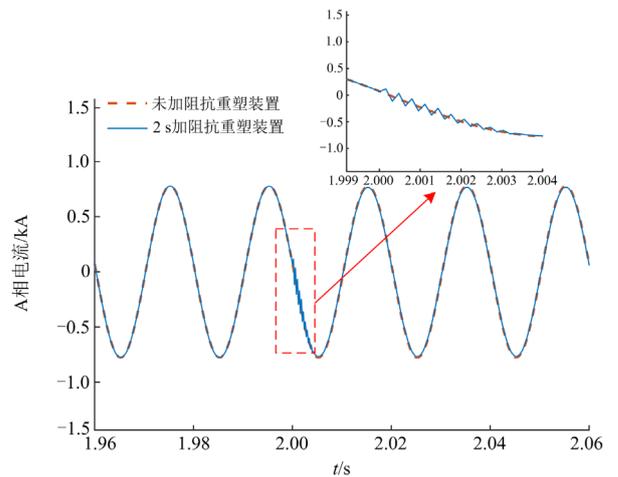
Fig. 12 Power step characteristics waveforms

图 13 展示了系统稳定运行时, 加入阻抗重塑装置前后电压、电流特性的变化。从图 13 中可以看出,

加入阻抗重塑装置时电压、电流稳态波形都出现了轻微的波动, 大约持续 4 ms 之后波动消失, 电压、电流波形恢复稳态特性。通过对比分析可知, 在 MMC 交流母线处并联阻抗重塑装置对系统电压、电流稳态特性几乎没有影响。



(a) 交流母线A相电压



(b) 交流母线A相电流

图 13 电压、电流稳态分析波形图

Fig. 13 Voltage, current steady state analysis waveforms

综上所述, 附加阻抗重塑装置抑制中高频振荡时, 阻抗重塑装置不会对系统的稳态特性造成影响。

4.2.2 基频功率损耗比较

表 3 展示了无源阻抗重塑装置与 RLC 高通滤波器两种无源阻尼装置的基频功率损耗。通过对比可以看出, 无源阻抗重塑装置的基频功率损耗远小于 RLC 高通滤波器的基频功率损耗。

表 3 基频有功损耗对比表

Table 3 Fundamental frequency active loss comparison

名称	交流线路电压有效值/kV	基频有功损耗/kW
无源阻抗重塑装置	525	0.364×10^{-7}
RLC 高通滤波器	525	3.44

5 结论

针对基于 MMC 柔性直流输电系统中出现的中高频振荡现象, 本文从附加无源阻尼控制策略出发, 提出了在交流母线处并联阻抗重塑装置的无源阻尼抑制策略, 应用阻抗法分析重塑前后 MMC 系统阻抗特性, 并在 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件中验证了阻抗重塑装置对 MMC 系统的中高频振荡的抑制效果。得出以下结论:

1) 本文所提在 MMC 交流侧母线处并联阻抗重塑装置的无源阻尼抑制策略能够有效抑制 MMC 系统的中高频振荡。

2) 所提无源阻尼抑制策略和阻抗重塑装置参数设计方法能够很好地改善 MMC 系统的中高频段阻抗特性。

3) 所提无源阻尼抑制策略对系统稳态特性影响小, 基频功率损耗低。

本文未考虑装置成本, 在接下来的研究中将探究有源与无源相结合的滤波器设计方法, 在保证抑制效果的同时, 最大程度地提高经济效益。

参考文献

- [1] 李斌, 李晔, 何佳伟, 等. 基于模块化多电平的柔性直流系统故障稳态特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 1-8.
LI Bin, LI Ye, HE Jiawei, et al. Stable fault characteristic analysis of the DC system based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 1-8.
- [2] LIANG Yingyu, REN Yi, YU Jinhua, et al. Current trajectory image-based protection algorithm for transmission lines connected to MMC-HVDC stations using CA-CNN[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): 97-111.
- [3] 宋延涛, 范雪峰, 吴庆范, 等. 基于 MMC 的海上风电柔性直流送出控制策略研究[J]. 高压电器, 2023, 59(12): 63-74.
SONG Yantao, FAN Xuefeng, WU Qingfan, et al. Research on flexible DC output control strategy for offshore wind power based on MMC[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(12): 63-74.
- [4] 曹帅, 刘东, 赵成功. 适用于风电经柔性直流并网系统的柔性耗能装置及控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(23): 51-62.
CAO Shuai, LIU Dong, ZHAO Chenggong. A flexible energy dissipation device with control strategy for an HVDC wind power integration system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23): 51-62.
- [5] 饶宏, 周月宾, 李巍巍, 等. 柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(1): 1-11.
RAO Hong, ZHOU Yuebin, LI Weiwei, et al. Engineering application and development prospect of VSC-HVDC transmission technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 1-11.
- [6] 张思彤, 梁纪峰, 马燕峰, 等. 直驱风电场经柔性直流输电并网的宽频振荡特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 33-42.
ZHANG Sitong, LIANG Jifeng, MA Yanfeng, et al. Broadband oscillation characteristics analysis of a VSC-HVDC connected direct drive wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 33-42.
- [7] 孙银锋, 刘金鑫, 梁栋. 基于附加改进有源滤波器的柔性直流输电系统高频振荡抑制策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(10): 85-92.
SUN Yinfeng, LIU Jinxin, LIANG Dong. High frequency oscillation suppression strategy for flexible HVDC system based on improved active filter[J]. Smart Power, 2023, 51(10): 85-92.
- [8] JI Ke, PANG Hui, HE Zhiyuan, et al. Active/passive method-based hybrid high-frequency damping design for MMCs[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(5): 6086-6098.
- [9] ZHANG Ye, HONG Chao, LIANG Tu, et al. Research on high-frequency resonance mechanism and active harmonic suppression strategy of power systems with power electronics[C] // 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON), 2018, Guangzhou, China: 2350-2356.
- [10] 郭贤珊, 刘斌, 梅红明, 等. 渝鄂直流背靠背联网工程交直流系统谐振分析与抑制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 157-164.
GUO Xianshan, LIU Bin, MEI Hongming, et al. Analysis and suppression of resonance between AC and DC systems in Chongqing-Hubei back-to-back HVDC project of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 157-164.
- [11] 黄方能, 韦超, 周剑, 等. 基于谐波状态空间模型的 MMC 系统高频振荡分析[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1967-1976.
HUANG Fangneng, WEI Chao, ZHOU Jian, et al. MMC system high frequency resonance based on harmonic state space model[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1967-1976.
- [12] 孙伟君, 夏翔, 刘刚, 等. MMC 型级联变换器阻抗建模和稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 117-127.
SUN Weijun, XIA Xiang, LIU Gang, et al. MMC-based

- cascaded converter impedance model and stability analysis[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(5): 117-127.
- [13] 方辉, 周敬森, 王皓正, 等. 基于谐波状态空间的 MMC 背靠背直流输电系统阻抗建模及稳定性分析[J]. *智慧电力*, 2023, 51(3): 87-95.
FANG Hui, ZHOU Jingsen, WANG Haozheng, et al. Impedance modeling and stability analysis of MMC based back-to-back HVDC transmission system based on harmonic state space[J]. *Smart Power*, 2023, 51(3): 87-95.
- [14] 许冬, 王璋, 陈东, 等. 考虑桥臂多谐波耦合的模块化多电平换流器直流侧阻抗建模方法[J]. *电网技术*, 2019, 43(7): 2632-2640.
XU Dong, WANG Zhang, CHEN Dong, et al. DC side impedance modeling method of modular multi-level converter considering multiple harmonic coupling on arm[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(7): 2632-2640.
- [15] 代锋, 王钢, 曾德辉, 等. MMC-HVDC 输电系统中高频阻抗建模及谐振机理分析[J]. *电网技术*, 2022, 46(6): 2356-2372.
DAI Feng, WANG Gang, ZENG Dehui, et al. Medium- & high-frequency impedance modeling and resonance mechanism analysis of MMC-HVDC transmission system[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(6): 2356-2372.
- [16] 杨诗琦, 刘开培, 秦亮, 等. MMC-HVDC 高频振荡问题研究进展[J]. *高电压技术*, 2021, 47(10): 3485-3496.
YANG Shiqi, LIU Kaipei, QIN Liang, et al. Research progress of high frequency oscillation in MMC-HVDC[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(10): 3485-3496.
- [17] 郭琦, 郭海平, 黄立滨. 电网电压前馈对柔性直流输电在弱电网下的稳定性影响[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(14): 139-144.
GUO Qi, GUO Haiping, HUANG Libin. Effect of grid voltage feedforward on VSC-HVDC stability in weak power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(14): 139-144.
- [18] 杜东冶, 郭春义, 贾秀芳, 等. 基于附加带阻滤波器的模块化多电平换流器高频谐振抑制策略[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(7): 1516-1525.
DU Dongye, GUO Chunyi, JIA Xiufang, et al. Suppression strategy for high frequency resonance of modular multilevel converter based on additional band-stop filter[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(7): 1516-1525.
- [19] 郭贤珊, 刘泽洪, 李云丰, 等. 柔性直流输电系统高频振荡特性分析及抑制策略研究[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(1): 19-29, 370.
GUO Xianshan, LIU Zehong, LI Yunfeng, et al. Characteristic analysis of high-frequency resonance of flexible high voltage direct current and research on its damping control strategy[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(1): 19-29, 370.
- [20] ZOU Changyue, RAO Hong, XU Shukai, et al. Analysis of resonance between a VSC-HVDC converter and the AC grid[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(12): 10157-10168.
- [21] 彭意, 郭春义, 杜东冶. 柔性直流输电的阻抗重塑及中高频振荡抑制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(22): 8053-8063.
PENG Yi, GUO Chunyi, DU Dongye. Research on medium and high frequency oscillation suppression approach based on impedance tuning in flexible HVDC system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(22): 8053-8063.
- [22] 刘春震, 徐海亮, 高铭琨, 等. 基于 C 型滤波器的 MMC 高频振荡抑制及参数设计方法[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(8): 206-215.
LIU Chunzhen, XU Hailiang, GAO Mingkun, et al. High-frequency oscillation suppression and parameter design method for modular multilevel converter based on C-type filter[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(8): 206-215.
- [23] 王宇. 柔性直流接入的电网高频振荡阻尼控制策略及实时仿真研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
WANG Yu. Research on active damping control and real-time simulation of high frequency resonance in grid-connected VSC-HVDC system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [24] 蔡雨希, 何英杰, 陈涛, 等. 基于粒子群的三电平并网逆变器 LCL 滤波参数的高效精确设计方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(20): 6663-6674.
CAI Yuxi, HE Yingjie, CHEN Tao, et al. Efficient and accurate design method of LCL filter for three-level grid-connected inverter based on particle swarm optimization[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(20): 6663-6674.

收稿日期: 2023-10-08; 修回日期: 2024-03-03

作者简介:

聂永辉(1970—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为新型电力系统稳定性分析与控制; E-mail: yonghui_n@aliyun.com

张德伟(1997—), 男, 硕士, 主要研究方向为柔性直流输电系统稳定性分析; E-mail: 794987822@qq.com

吴春迎(1992—), 女, 通信作者, 硕士, 讲师, 主要研究方向为柔性直流输电系统稳定性分析。E-mail: 20172761@ncepu.edu.cn

(编辑 周金梅)