

# 考虑电压前馈控制的 MMC-HVDC 并网稳定性分析 及其阻抗控制优化方法

黄通<sup>1</sup>, 陈新<sup>1\*</sup>, 张东辉<sup>1</sup>, 何国庆<sup>2</sup>, 李光辉<sup>2</sup>, 李彧野<sup>2</sup>

- (1. 江苏省新能源发电与电能变换重点实验室(南京航空航天大学), 江苏省南京市 210016;  
2. 新能源与储能运行控制国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京市海淀区 100192)

## MMC-HVDC Integrated System Stability Analysis and Impedance Optimization Method With Consideration of Voltage Feed-forward Control

HUANG Tong<sup>1</sup>, CHEN Xin<sup>1\*</sup>, ZHANG Donghui<sup>1</sup>, HE Guoqing<sup>2</sup>, LI Guanghui<sup>2</sup>, LI Yuyue<sup>2</sup>

- (1. Jiangsu Key Laboratory of New Energy Generation and Power Conversion (Nanjing University of Aeronautics & Astronautics), Nanjing 210016, Jiangsu Province, China; 2. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems (China Electric Power Research Institute), Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** In order to suppress high frequency resonance, low-pass filter-based voltage feedforward controllers are commonly used in MMC-HVDC projects. Voltage feedforward control may have negative impacts on MMC-HVDC integrated system stability. Therefore, it is worth analyzing the impacts of feedforward control on impedance characteristic as well as integrated system stability. First, the multi-harmonic linearization method is adopted to establish the MMC-HVDC sequence impedance model considering voltage feedforward control. Then, the impedance sensitivity analysis method is used to quantify the impacts of different controllers on the stability of integrated system. Voltage feedforward control is essential in integrated systems stability analysis and in system stability improvement. Finally, an optimization method for MMC-HVDC impedance control based on voltage feedforward control is proposed to improve the stability of integrated system. The accuracy of the sequence impedance model and the effectiveness of impedance optimization method proposed in this paper are verified in Matlab/Simulink.

**KEY WORDS:** modular multilevel converter (MMC); voltage feedforward control; stability analysis; impedance optimization

**摘要:** 为抑制上千赫兹的高频振荡, 柔性直流工程中常在基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)控制环路中加入基于低通滤波器的电压前馈控制, 然而, 电压前馈

控制对 MMC-HVDC 并网站阻抗特性影响较大, 在某些工况下, 加入电压前馈控制对系统稳定性会有恶化作用, 因此, 有必要深入研究考虑电压前馈的 MMC-HVDC 并网稳定性及其阻抗优化控制方法。文中采用多谐波线性化方法, 建立考虑电压前馈控制的 MMC-HVDC 并网站序阻抗模型, 采用阻抗灵敏度分析方法, 解析 MMC-HVDC 并网站不同控制环路对系统稳定性的影响作用能力, 系统分析考虑电压前馈控制对准确分析并网系统稳定性问题的必要性及其用以提升系统稳定性的有效性, 在此基础上, 提出一种基于电压前馈控制的 MMC-HVDC 并网站阻抗控制优化方法, 实现了并网系统稳定性的有效提升。在 Matlab/Simulink 中搭建考虑电压前馈控制的 MMC-HVDC 并网站仿真模型, 对其序阻抗模型、并网稳定性分析及阻抗优化与重塑方法进行验证。

**关键词:** 模块化多电平换流器; 电压前馈控制; 稳定性分析; 阻抗控制优化

## 0 引言

基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)具有冗余度大、谐波含量少、转换效率高优点<sup>[1-3]</sup>, 成为海上风电等大规模新能源接入电网的新途径。然而, 在实际运行过程中, 国内外 MMC-HVDC 工程中频繁出现宽频带振荡事故<sup>[4-6]</sup>, 严重影响了电力系统安全、稳定、经济地运行。

阻抗分析方法是并网系统振荡分析的常用手段, 广泛应用于 MMC-HVDC 并网系统稳定性分析

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGTYHT/21-JS-223)。

Project Supported by State Grid Corporation Science and Technology Project (SGTYHT/21-JS-223).

中。准确的 MMC-HVDC 阻抗模型是分析并网系统稳定性的前提，目前，常用的 MMC-HVDC 阻抗建模方法包括多谐波线性化方法<sup>[7-9]</sup>和谐波状态空间方法<sup>[10-11]</sup>(harmonic state-space, HSS)，两种建模方法所建立的阻抗模型已被证明是完全等效的<sup>[12]</sup>。已有多位学者建立了考虑直流电压控制、输出电流控制、环流控制、锁相控制、延时等环节的 MMC-HVDC 阻抗模型。此外，有学者发现，频率耦合效应<sup>[13]</sup>及正负序耦合效应<sup>[12]</sup>会影响并网系统中的 MMC-HVDC 阻抗特性，需要对阻抗模型进行修正，以保证并网系统稳定性分析结果的准确性。

电压前馈控制通常用于改善变换器的动态性能，抑制背景谐波以及缓解电网电压引起的不平衡问题<sup>[14-16]</sup>，此外，还是一种有效的变换器阻抗控制手段，可用于增强系统稳定性。目前，MMC-HVDC 的阻抗建模和稳定性分析大多忽略了电压前馈控制的影响，但在实际应用中发现，加入电压前馈控制后，对 MMC-HVDC 的阻抗特性和系统稳定性构成较大影响<sup>[17]</sup>，因此，有必要在考虑电压前馈前提下系统分析 MMC-HVDC 并网稳定性及其阻抗优化方法。

通常，并网电力电子装置具有多个控制环路，并网稳定影响因素错综复杂，而灵敏度分析方法可直观、定量地比较不同控制环路对电力电子装置的阻抗特性及并网稳定性的影响。文献[18]基于状态空间模型特征值灵敏度分析双馈或直驱风电机组引发的次/超同步振荡稳定的主导因素。但随着系统复杂程度的增加，系统特征值的求解难度也随之增加。文献[19]提出基于 RLC 电路模型的灵敏度分析方法，通过分析系统等效 RLC 电路在虚部过零点频率处，阻抗实部正负研究系统振荡影响因素，但 RLC 电路在复杂电网接入条件下，应用场景具有局限性。值得注意的是，MMC-HVDC 的控制结构环路多，阻抗解析式复杂，物理释义不清晰，难以直接开展阻抗优化设计，因此，有必要结合阻抗灵敏度分析深入研究 MMC-HVDC 的阻抗特性影响及其优化设计过程。

针对电压前馈控制对 MMC-HVDC 并网稳定性的影响及阻抗优化问题，本文首先采用多谐波线性化方法，给出考虑电压前馈控制的 MMC-HVDC 序阻抗建模过程，采用阻抗灵敏度分析方法，研究电压前馈控制对 MMC-HVDC 并网站阻抗特性影响；随后，比较不同控制环路对 MMC-HVDC 并网系统

稳定性的影响，阐述考虑电压前馈控制对开展 MMC-HVDC 并网系统稳定性研究的必要性；最后，提出一种基于电压前馈控制的 MMC-HVDC 阻抗控制与优化设计方法，并给出具体优化设计过程，有效实现 MMC-HVDC 并网系统的阻抗特性优化和稳定性提升。

### 1 考虑电压前馈控制的 MMC-HVDC 并网站阻抗建模及阻抗特性分析

典型的 MMC-HVDC 并网站功率拓扑结构和控制结构如图 1 所示，图中： $i_{xu}$ 、 $i_{xl}(x=a, b, c)$ 分别为三相的上、下桥臂电流； $i_{sx}$ 、 $v_{sx}$ 分别为 MMC-HVDC 并网站输出电流、输出电压； $v_{sdq}$ 分别为输出电压的  $d$ 、 $q$  轴分量； $v_{dc}$ 为 MMC-HVDC 并网站直流侧电压； $v_{xu}$ 、 $v_{xl}$ 分别为上、下桥臂模块输出电压； $L$ 、 $R$ 分别为桥臂的电感和电阻； $C_m$ 为模块电容， $C_{eq}$ 为等效电容，且  $C_{eq} = C_m/N$ ， $N$ 为桥臂的模块数。

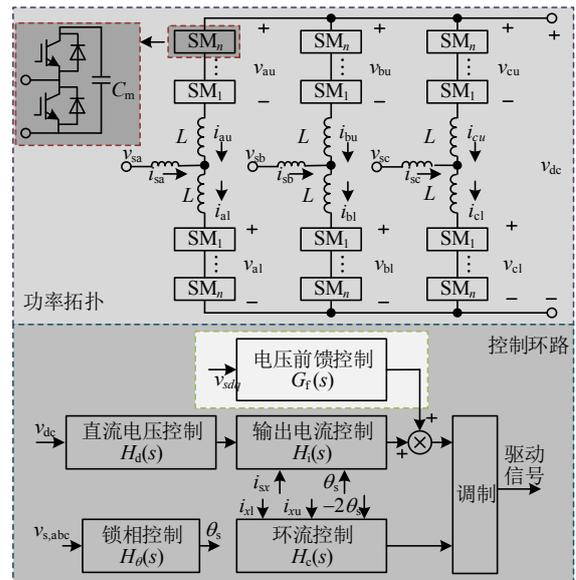


图 1 MMC-HVDC 并网站功率拓扑与控制结构

Fig. 1 Topology and control structure of MMC

为了消除电网中的高次谐波对并网站的不良影响，工程上一般在电网电压前馈中加入低通滤波器以滤除电网高次谐波<sup>[16]</sup>，电压前馈控制器  $G_f(s)$  的数学表达式为

$$G_f(s) = k_f \frac{\omega_f}{s + \omega_f} \tag{1}$$

式中： $k_f$ 为电压前馈系数； $\omega_f$ 为低通滤波器的截止频率。MMC-HVDC 并网站的其他控制包括直流电压控制、锁相控制、 $dq$  坐标系下输出电流控制和环流控制，其传递函数分别为  $H_d(s)$ 、 $H_\theta(s)$ 、 $H_i(s)$ 、

和  $H_c(s)$ 。dq 坐标系下输出电流控制和环流控制的解耦系数为  $K_i$  和  $K_{ic}$ ，MMC-HVDC 并网站的直流电压参考值，无功电流参考值和环流参考值分别为  $V_{dr}$ 、 $I_{qr}$  和  $I_{cr}$ ，MMC-HVDC 并网站的锁相角为  $\theta_s$ 。

文献[20]推导了考虑直流电压控制、输出电流控制、环流控制和锁相控制的 MMC-HVDC 并网站阻抗模型，由图 1 可知，考虑电压前馈后，调制信号的小信号将额外引入一个由电压前馈控制引入的输出电压小信号响应，因此，在 abc 坐标下，线性化的调制信号小信号谐波向量  $\hat{m}_u$  如式(2)所示(忽略表示相序的下标)。为简化运算，本文仅考虑三次及以下的稳态谐波。

$$\hat{m}_u = \mathbf{G}_1 \hat{i}_u + \mathbf{G}_2 \hat{v}_s + \mathbf{G}_3 \hat{v}_s \quad (2)$$

其中：

$$\begin{cases} \mathbf{G}_1 = (\mathbf{U} - \mathbf{Q}_3 \mathbf{H}_3)^{-1} (\mathbf{Q}_1 + \mathbf{Q}_3 \mathbf{H}_1) \\ \mathbf{G}_2 = (\mathbf{U} - \mathbf{Q}_3 \mathbf{H}_3)^{-1} (\mathbf{Q}_2 + \mathbf{Q}_3 \mathbf{H}_2) \\ \mathbf{G}_3 = (\mathbf{U} - \mathbf{Q}_3 \mathbf{H}_3)^{-1} \mathbf{Q}_{v2} \end{cases}$$

式中： $\mathbf{H}_1 = \mathbf{I}_{dc}^{-1} (6\mathbf{T}_1 + 6\mathbf{T}_3 - \mathbf{V}_{dc} \mathbf{T}_5)$ ； $\mathbf{H}_2 = 6\mathbf{I}_{dc}^{-1} \mathbf{T}_2$ ； $\mathbf{H}_3 = 6\mathbf{I}_{dc}^{-1} \mathbf{T}_4$ ； $\hat{i}_u$ 、 $\hat{v}_s$  分别为上桥臂电流和输出电压的小信号谐波向量； $\mathbf{U}$  为  $7 \times 7$  的单位矩阵，调制信号可以用桥臂电流和输出电压的表示；桥臂电流的系数矩阵为  $\mathbf{G}_1$ ；为了方便分析电压前馈控制对阻抗的影响，输出电压的系数矩阵分为  $\mathbf{G}_2$  和  $\mathbf{G}_3$ ， $\mathbf{G}_2$  表示锁相控制对调制信号的影响， $\mathbf{G}_3$  表示电压前馈控制对调制信号的影响。为简化公式，定义中间变量  $\mathbf{Q}_1$ 、 $\mathbf{Q}_2$ 、 $\mathbf{Q}_3$  和  $\mathbf{Q}_{v2}$ ，分别表示信号经输出电流控、锁相控制、直流电压控制和电压前馈控制的增益； $\mathbf{T}_1 - \mathbf{T}_5$  为表征交直流侧功率守恒方程中的中间变量，具体表达式如(A1)–(A5)所示。

考虑电压前馈控制后，MMC-HVDC 并网站功率小信号不发生变化，可表示为

$$\begin{cases} \hat{v}_u = \mathbf{Z}_c (\mathbf{M}_u \hat{i}_u + \mathbf{I}_u \hat{m}_u) \\ \hat{i} = \mathbf{Y}_1 (\frac{1}{2} \hat{v}_{dc} - \hat{v}_s - \mathbf{M}_u \hat{v}_u - \mathbf{V}_u \hat{m}_u) \\ \hat{v}_{dc} = \mathbf{H}_1 \hat{i}_u + \mathbf{H}_2 \hat{v}_s + \mathbf{H}_3 \hat{v}_u \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\mathbf{Z}_c$ 、 $\mathbf{Y}_1$  为不同小信号频率所对应的 MMC 等效电容阻抗与桥臂电感导纳矩阵； $\mathbf{M}_u$ 、 $\mathbf{I}_u$ 、 $\mathbf{V}_u$  和  $\mathbf{I}_{dc}$  为上桥臂调制信号、桥臂电流、等效电容电压和直流侧电流稳态信号经托普利兹变换得到的矩阵； $\hat{v}_{dc}$ 、 $\hat{v}_u$  分别为直流侧电压和上桥臂等效电容电压的小信号谐波向量。

结合式(2)和(3)可消去  $\hat{m}$ ，从而得到考虑直流电压控制的 MMC 导纳矩阵  $\mathbf{Y}$ ：

$$\mathbf{Y} = \{ \mathbf{U} - \mathbf{Y}_1 [0.5\mathbf{H}_1 - \mathbf{M}\mathbf{Z}_c \mathbf{M} + (0.5\mathbf{H}_3 - \mathbf{M}\mathbf{Z}_c \mathbf{I} - \mathbf{V})\mathbf{G}_1] \}^{-1} \mathbf{Y}_1 [0.5\mathbf{H}_2 - \mathbf{U} + (0.5\mathbf{H}_3 - \mathbf{M}\mathbf{Z}_c \mathbf{I} - \mathbf{V})(\mathbf{G}_2 + \mathbf{G}_3)] \quad (4)$$

式中 MMC-HVDC 并网站导纳矩阵  $\mathbf{Y}$  为  $7 \times 7$  矩阵，其中(4,4)元素表示  $f_p$  频率的 MMC 输出侧电压与同频率桥臂电流之间的传递函数，结合图 1 所表示的 MMC-HVDC 并网站输出电流与桥臂电流的关系，因此可定义考虑电压前馈控制的 MMC-HVDC 并网站正、负序阻抗为：

$$\mathbf{Z}_p(s) = -\frac{1}{2\mathbf{Y}(4,4)} \quad (5)$$

$$\mathbf{Z}_n(s) = \mathbf{Z}_p^*(-s) \quad (6)$$

为了验证所建立的考虑电压前馈控制的 MMC-HVDC 并网站阻抗模型的准确性，基于 Matlab/Simulink 搭建包含直流电压控制、电流控制、电压前馈控制、环流控制和锁相控制的 MMC-HVDC 并网站仿真模型，具体仿真参数如表 1 所示。MMC-HVDC 并网站正、负序阻抗的理论曲线与仿真测量结果的对比如图 2 所示，理论曲线与仿真测量结果完全吻合。

表 1 考虑电压前馈控制的 MMC-HVDC 并网站仿真参数  
Table 1 Parameters of MMC considering voltage feed-forward control

| 参数        | 数值        | 参数             | 数值  |
|-----------|-----------|----------------|---|
| 额定功率/MW   | 255       | $H_v(s)$       | $9.266 \times 10^{-3} + 0.28/s$                 |
| 线电压有效值/kV | 375       | $H_i(s)$       | $6.642 \times 10^{-5} + 0.05/s$                 |
| 直流侧电压/kV  | $\pm 350$ | $H_c(s)$       | $5.078 \times 10^{-5} + 0.013/s$                |
| 上/下桥臂模块数  | 500       | $H_\theta(s)$  | $4.961 \times 10^{-5} + 1.062 \times 10^{-3}/s$ |
| 桥臂电感/mH   | 100       | $\omega_f/k_f$ | 1000 $\pi/0.9$                                  |
| 子模块电容/mF  | 13.6      | 仿真步长/ $\mu s$  | 4   |

由图 2 可知，MMC-HVDC 并网站正负序阻抗有明显的差异，正序阻抗随着频率的增加，阻抗的模值和幅角曲线特性变化明显，在 1~20Hz 范围内，MMC-HVDC 并网站阻抗主要受环流控制、电压前馈控制和 MMC 功率电路影响，该频段的 MMC-HVDC 并网站阻抗有可能表现出“负阻尼”特性；在 20~80Hz 范围内，MMC-HVDC 并网站阻抗受直流电压控制和锁相控制影响，阻抗以基频为中心呈现出两个对称的谐振峰；在 80~400Hz 范围内，MMC-HVDC 并网站阻抗主要受到电流环积分器的影响，表现为阻容特性；在 400Hz 以上范围，

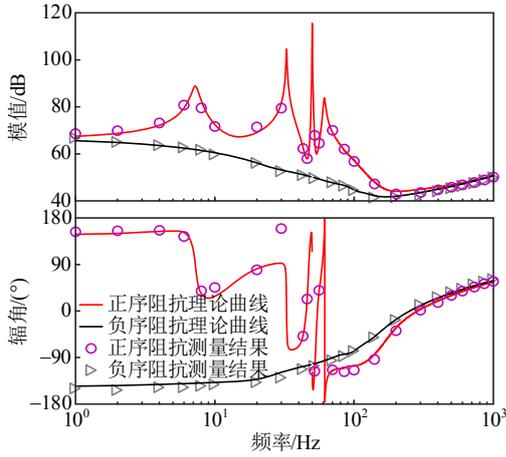


图2 MMC-HVDC 序阻抗解析和仿真结果

Fig. 2 Theoretical curves and simulation results of MMC-HVDC sequence impedance

MMC-HVDC 并网站阻抗主要受到滤波器的影响，表现为阻感特性。MMC-HVDC 并网站正负序阻抗在低频段差异较大，但随着频率的增加，正负序阻抗曲线逐渐重合。一般情况下，并网系统不会出现负序振荡，因此下文中的 MMC-HVDC 并网站阻抗特性分析都是对正序阻抗的分析。

## 2 MMC-HVDC 并网站阻抗特性分析

MMC-HVDC 并网站的多个控制环路作用相互耦合，共同影响 MMC-HVDC 并网站阻抗特性，不同控制对 MMC-HVDC 并网站阻抗影响的频段和程度不同，本节通过引入灵敏度指标量化控制环路对 MMC-HVDC 并网站阻抗的影响，进而重点分析对阻抗特性影响最大的控制环节。

### 2.1 MMC 阻抗灵敏度分析

由阻抗模型可知，MMC-HVDC 并网站阻抗特性受到多个控制环路影响，控制环路带宽对阻抗特性的影响程度可由阻抗灵敏度来衡量。阻抗灵敏度可分别定义为阻抗模值灵敏度  $H_{M\omega\alpha}$  和辐角灵敏度  $H_{P\omega\alpha}$ ，分别表征在控制参数变化的情况下，阻抗模值和辐角变化的程度。参数的阻抗灵敏度越大，说明该参数的变化对阻抗特性的影响程度越大，阻抗的模值灵敏度和辐角灵敏度分别为

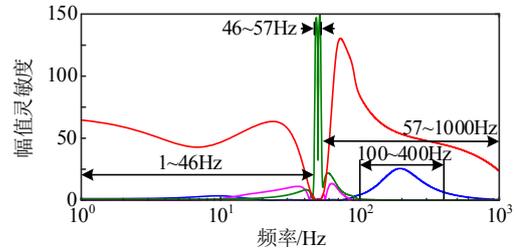
$$H_{M\omega\alpha}(s) = \lim_{\Delta\omega_\alpha \rightarrow 0} \frac{|Z(\omega_\alpha + \Delta\omega_\alpha, s)| - |Z(\omega_\alpha, s)|}{\Delta\omega_\alpha} \quad (7)$$

$$H_{P\omega\alpha}(s) = \lim_{\Delta\omega_\alpha \rightarrow 0} \frac{\angle Z(\omega_\alpha + \Delta\omega_\alpha, s) - \angle Z(\omega_\alpha, s)}{\Delta\omega_\alpha} \quad (8)$$

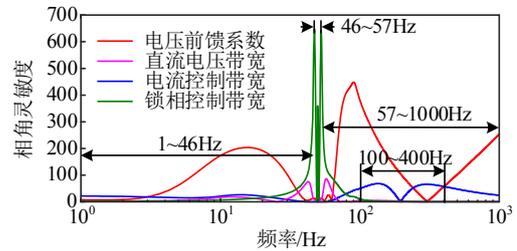
式中： $Z(\omega_\alpha, s)$ 为控制环路  $\alpha$  的带宽取  $\omega_\alpha$  的 MMC-HVDC 阻抗； $Z(\omega_\alpha + \Delta\omega_\alpha, s)$ 为控制环路  $\alpha$  的带宽变

化  $\Delta\omega_\alpha$  后的 MMC-HVDC 阻抗。

图3分别给出电压前馈系数、电流控制带宽、直流电压控制带宽和锁相控制带宽对 MMC-HVDC 并网站阻抗的模值、辐角灵敏度，灵敏度曲线的值越大说明该曲线所对应的控制对 MMC-HVDC 并网站的阻抗的影响越大。



(a) 阻抗模值灵敏度



(b) 阻抗辐角灵敏度

图3 MMC-HVDC 并网站各控制参数阻抗灵敏度曲线

Fig. 3 impedance sensitivity curve of MMC-HVDC control parameters

图3中，电压前馈控制的阻抗灵敏度在1~46、57~1000Hz频段上明显大于其他控制参数，说明在这些频段上，电压前馈系数的变化能够显著改变 MMC-HVDC 并网站阻抗特性，但在这些频段上电压前馈控制对 MMC-HVDC 并网站阻抗特性的影响程度并不完全相同，在电压前馈控制起主导作用的频段内，距离基频越近的频段电压前馈对阻抗模值的影响越大，随着与基频之间的频率差增加，电压前馈控制对阻抗模值的影响逐渐减小。电压前馈控制对 MMC-HVDC 并网站阻抗辐角的影响与对阻抗模值的影响较为类似，但在高频段，电压前馈对 MMC-HVDC 并网站阻抗辐角的影响又逐渐增加。

同时，锁相控制、直流电压控制的阻抗灵敏度曲线在基频附近频段(46~57Hz)均较大，说明 MMC-HVDC 并网站基频附近阻抗特性主要受锁相控制和直流电压控制的影响，与现有研究结论一致。

在电压前馈控制的阻抗灵敏度较大的频段(1~46、57~1000Hz)上，锁相和直流电压控制的阻抗灵敏度近似为零，而在锁相和直流电压控制的阻抗灵敏度较大的频段(46~57Hz)上，电压前馈控制的灵敏

度近似为零。这说明，不同控制影响 MMC-HVDC 并网站阻抗特性的频段有所不同。

此外，输出电流控制带宽位于电压前馈控制对 MMC-HVDC 并网站阻抗存在影响的频段内，输出电流控制在输出电流控制带宽截止频率处灵敏度相比于其他频段明显增大，但仍小于电压前馈控制，说明，在同一频段上可能存在多个控制环节对 MMC-HVDC 并网站阻抗特性存在影响，但不同控制的影响大小也不同。

综上所述，MMC-HVDC 并网站阻抗特性受到多个控制环路的共同作用，不同控制对 MMC-HVDC 并网站阻抗特性的影响频段和影响程度均有所不同。电压前馈控制在 MMC-HVDC 并网站大部分频段阻抗特性均起到主导作用，有必要展开进一步研究。

### 2.2 电压前馈控制对 MMC-HVDC 并网站阻抗特性的影响

虽然式(4)所示的 MMC-HVDC 并网站阻抗数学模型中考虑了电压前馈控制，但由于表达式较为复杂，难以直观分析电压前馈控制对 MMC-HVDC 并网站阻抗特性的影响，根据图 1 所示的控制结构，可以将式(4)化简为

$$Y_{MMC0}(s) = Y_0 + Y_{If} \quad (9)$$

式中： $Y_{MMC0}(s)$ 为考虑电压前馈控制影响的导纳； $Y_0$ 为不考虑电压前馈控制影响的导纳； $Y_{If}$ 为电压前馈控制的等效导纳，可分别表示为

$$\begin{cases} Y_0 = \{U - Y_1[0.5H_1 - MZ_c M + (0.5H_3 - MZ_c I - V) \cdot \\ \quad G_1]\}^{-1} Y[0.5H_2 - U + (0.5H_3 - MZ_c I - V)G_2] \\ Y_{If} = \{U - Y_1[0.5H_1 - MZ_c M + (0.5H_3 - MZ_c I - \\ \quad V)G_1]\}^{-1} Y_1(0.5H_3 - MZ_c I - V)G_3 \end{cases}$$

由式(7)可知，考虑电压前馈控制后的 MMC-HVDC 并网站导纳  $Y_{MMC0}(s)$  可以看作是无电压前馈控制的 MMC-HVDC 并网站导纳  $Y_0$  与电压前馈控制的等效导纳  $Y_{If}$  之和，其等效电路如图 4 所示。电

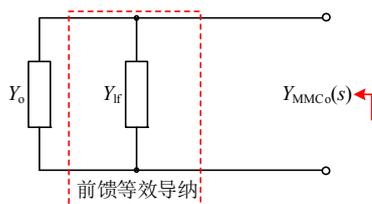


图 4 考虑电压前馈控制的 MMC-HVDC 并网站等效电路  
Fig. 4 Equivalent circuit of MMC-HVDC considering voltage feedforward control

压前馈控制对  $Y_{MMC0}(s)$  的影响表征为  $Y_{If}$  的特性，使电压前馈控制对 MMC-HVDC 并网站导纳特性的影响表现得更为直观。

图 5 对比了表 1 所示的工况下，考虑电压前馈控制前后 MMC-HVDC 并网站的正序导纳特性。在基频附近频段，不考虑电压前馈控制的 MMC-HVDC 并网站导纳(图中表示为  $Y_0$ ，对应于  $Y_0$  的(4,4)元素)与考虑电压前馈控制的 MMC-HVDC 并网站导纳(图中表示为  $Y_{MMC0}$ ，对应于  $Y_{MMC0}$  的(4,4)元素)几乎重合。在基频以外的频段， $Y_0$  与电压前馈控制的等效导纳(图中表示为  $Y_{If}$ ，对应于  $Y_{If}$  的(4,4)元素)的模值非常接近，辐角差接近  $180^\circ$ ，因此加入电压前馈控制后， $Y_{MMC0}$  的模值大幅减小。但随着频率的增加， $Y_{If}$  的模值逐渐减小， $Y_{If}$ 、 $Y_{MMC0}$  的影响逐渐减小， $Y_{MMC0}$  的模值逐渐与  $Y_0$  相接近。电压前馈控制对  $Y_{MMC0}$  模值影响较大的频段与 2.1 节分析的电压前馈控制的模值灵敏度较大的频段保持一致。

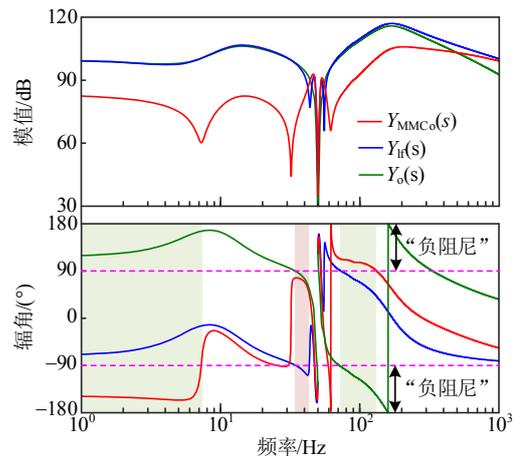


图 5 电压前馈控制对 MMC-HVDC 并网站导纳特性影响  
Fig. 5 Impacts of voltage feedforward control on admittance characteristics of MMC-HVDC

需要注意的是， $Y_{If}$  在低频段(1~34Hz)辐角大于  $90^\circ$ ，在中频段(72~160Hz)辐角小于  $-90^\circ$ ， $Y_{If}$  在这两个频段呈现出“负阻尼”特性，因此加入电压前馈控制后， $Y_{MMC0}$  在这两个频段会呈现出额外的“负阻尼”特性(1~8Hz 和 74~133Hz，图中绿色区域所示)，同理，在  $Y_{If}$  提供阻尼的频段，加入电压前馈控制后， $Y_{MMC0}$  也会由“负阻尼”特性变为“正阻尼”特性(34~44Hz，图中红色区域所示)。同样地，上述  $Y_{MMC0}$  出现阻尼特性变化的频段均为电压前馈控制辐角灵敏度较大的频段，与 2.1 节分析的电压前馈控制辐角灵敏度较大频段保持一致。

图6对比了仅改变电压前馈系数 $k_f$ 的情况下, MMC-HVDC 并网站阻抗特性(低通滤波器的截止频率 $\omega_f$ 保持不变)。总体而言,随着 $k_f$ 的减小, $Y_{if}$ 的模值逐渐减小,电压前馈控制对阻抗模值的影响变小, $Y_{MMC0}$ 的导纳模值与 $Y_0$ 更加接近,由上述分析可知,即 $k_f$ 越小, $Y_{MMC0}$ 越大, $Z_{MMC0}$ 越小。同样地,随着 $k_f$ 的减小,电压前馈控制对阻抗辐角的影响也逐渐减小, $Y_{if}$ 呈现“负阻尼”特性的频段变窄,因此受电压前馈控制影响而出现“负阻尼”与“正阻尼”特性转换的频段也变窄。换言之,随着 $k_f$ 的减小,考虑电压前馈控制的阻抗 $Z_{MMC0}$ 的特性与不考虑电压前馈控制的阻抗 $Z_0$ 特性更为接近。

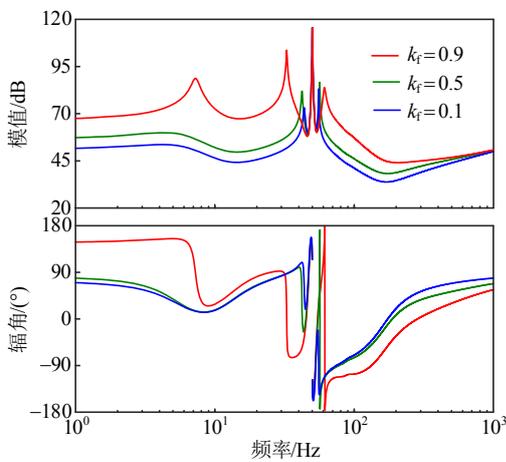


图6 电压前馈系数对 MMC-HVDC 并网站导纳特性影响  
Fig. 6 Impacts of voltage feedforward coefficient  $k_f$  on admittance characteristics of MMC-HVDC

### 3 MMC-HVDC 的并网稳定性分析及控制环路影响

由上文分析可知,电压前馈控制对 MMC-HVDC 并网站阻抗特性有较大影响,又由于电力电子装置阻抗特性决定其入电网后系统的稳定性,因此本节采用阻抗分析方法讨论 MMC-HVDC 的并网稳定性,详细分析电压前馈控制对 MMC-HVDC 并网站阻抗特性的影响及对系统稳定性的影响。

#### 3.1 电压前馈控制对并网系统稳定性影响

图7为 MMC-HVDC 并网系统结构图,MMC-

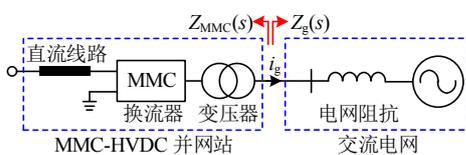


图7 MMC-HVDC 并网系统结构图

Fig. 7 Block diagram of MMC-HVDC integrated system

HVDC 换流站包括模块化多电平换流器和联接变压器,其阻抗定义为 $Z_{MMC}(s)$ ,交流电网包括电网阻抗和理想电网,其阻抗定义为 $Z_g(s)$ 。本文研究的 $Z_{MMC}(s)$ 和 $Z_g(s)$ 的交互稳定性问题。

以考虑电压前馈控制的 MMC-HVDC 接入交流电网为例,分析电压前馈控制对并网系统稳定性影响,其中 MMC-HVDC 参数如表1所示,交流电网短路比(short circuit ratio, SCR)为2.9(对应电网电感 $L_g=0.4H$ ,电阻 $R_g=12.52\Omega$ )。并网系统广义奈奎斯特曲线如图8所示,MMC-HVDC 阻抗不考虑电压前馈控制时,广义奈奎斯特曲线不包裹 $(-1, j0)$ , MMC-HVDC 并网系统稳定。而考虑电压前馈控制时,广义奈奎斯特曲线包裹 $(-1, j0)$ ,考虑频率耦合折合的 MMC-HVDC 阻抗与电网阻抗模值的交点频率为128Hz,该频率处的稳定裕度为 $-1.03^\circ$ ,系统不稳定。

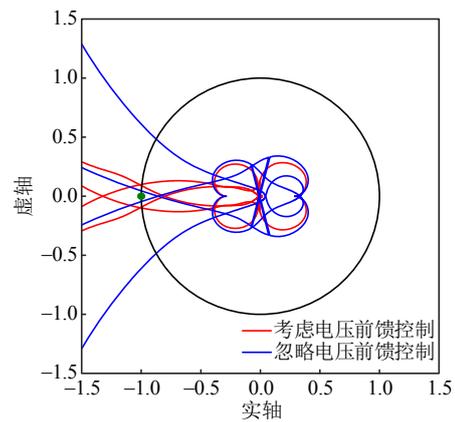


图8 考虑电压前馈控制前后 MMC-HVDC 并网系统稳定性分析对比

Fig. 8 Comparison of GNC of MMC integrated system w/o considering voltage feedforward control

图9给出 MMC-HVDC 并网电流 $i_g$ 的仿真波形,图9(a)给出考虑电压前馈控制的 MMC-HVDC 自稳性的仿真实验验证,仿真开始时, MMC-HVDC 接入理想电网,并网电流 $i_g$ 中无谐波,仿真运行至1.5s时, MMC-HVDC 接入弱电网,其余参数不变,并网电流 $i_g$ 迅速发生畸变,说明 MMC-HVDC 自身稳定,接入弱电网后会产生振荡。图9(b)给出电压前馈控制对并网系统稳定性的影响仿真波形,仿真开始时 MMC-HVDC 不考虑电压前馈控制,并网电流 $i_g$ 中无谐波,并网系统稳定,仿真运行至1.5s时,控制环节中加入电压前馈控制,其余参数不变,加入电压前馈控制后,并网电流 $i_g$ 迅速发生畸变,说明电压前馈控制会导致并网系统振荡。图9(c)给出

加入电压前馈控制后并网电流  $i_g$  的 FFT 分析结果，可以看出，系统存在 128Hz 振荡，仿真结果与理论分析结果一致。

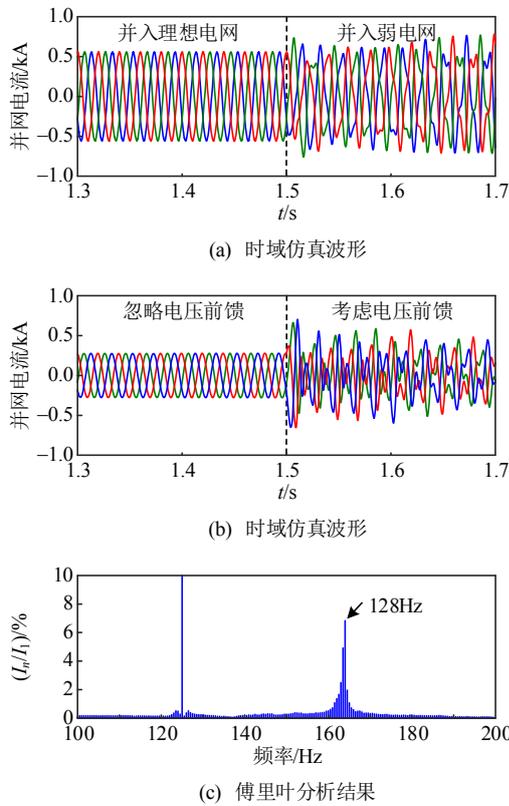


图 9 并网电流波形及电流傅里叶分析结果

Fig. 9 Waveform and FFT result of injected current

### 3.2 电压前馈控制对并网系统稳定性影响

为讨论 MMC-HVDC 并网站各控制参数对并网系统的稳定性存在影响，图 10 给出直流电压控制、锁相控制、输出电压控制和电压前馈控制参数分别变化 20% 后系统阻抗特性(系统阻抗特性包括

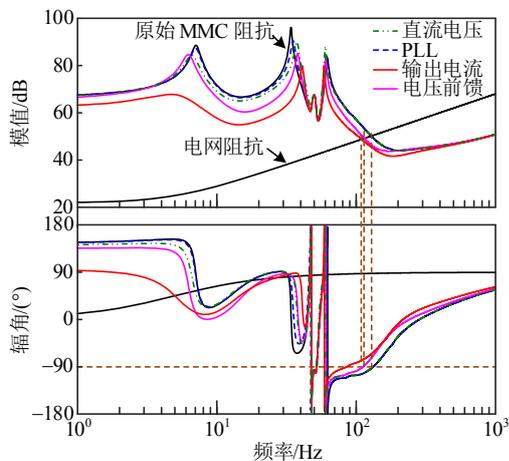


图 10 控制参数变化对系统阻抗特性的影响

Fig. 10 Impacts of variation of control parameters on system impedance characteristics

MMC-HVDC 并网站阻抗和电网阻抗特性)的变化。图中可以看出，改变控制参数后，MMC-HVDC 并网站阻抗特性出现不同程度的变化。改变直流电压控制和锁相控制参数后，振荡频率处阻抗没有明显变化，系统仍然振荡，说明改变直流电压控制和锁相控制控制参数对并网系统稳定性没有改善；同时，改变电压前馈控制和输出电流控制参数后，振荡频率处的系统阻抗出现明显变化，阻抗模值的交点频率右移，稳定裕度分别变化为  $14.49^\circ$  和  $4.23^\circ$ ，系统均由振荡变为稳定。控制环路对并网稳定性影响作用与前面阻抗灵敏度分析结论一致。

图 11 给出相应的仿真结果，图 11(a)中，仿真开始时各控制参数如表 2 所示，并网电流波形中存在较大谐波，系统振荡，仿真运行至 1.5s 时， $k_f$  由 0.9 减小 20%，其余参数不变，参数切换后，并网电流波形中谐波迅速减小，系统稳定，运行稳定后系统 THD 为 0.34%。图 11(b)中，仿真开始时各控制参数如表 2 所示，仿真运行至 1.5s 时，输出电流控制带宽减小 20% ( $K_{pc} = 5.321 \times 10^{-5}$ ,  $K_{ic} = 0.032$ )，其余参数不变，参数切换后，并网电流波形中谐波

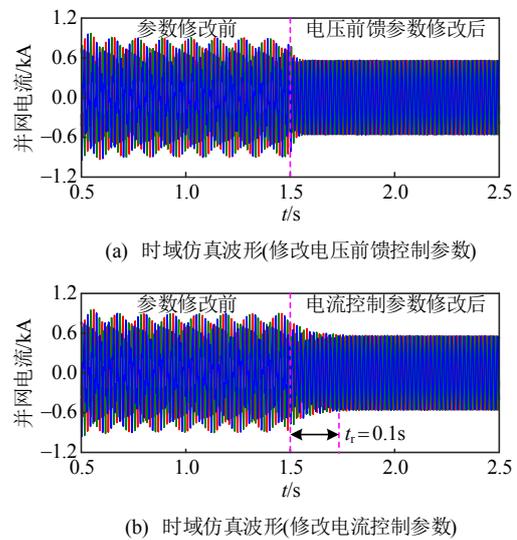


图 11 控制参数变化前后并网电流波形

Fig. 11 Waveform of injected current before and after control parameters change

表 2 MMC-HVDC 控制环路参数对并网系统稳定性影响  
Table 2 Impacts of MMC-HVDC control loop parameters on stability of grid-connected system

| 变化率/% | 电压前馈控制/(°) | 输出电流控制/(°) |
|-------|------------|------------|
| 10    | 10.64      | 1.73       |
| 20    | 14.49      | 4.23       |
| 30    | 15.17      | 6.99       |
| 40    | 15.58      | 11.03      |

逐渐减小, 约 0.1s 后, 系统稳定, 运行稳定后系统 THD 为 3.59%, 系统谐波含量高于电压前馈参数修改后的系统谐波含量。

从表 2 可知, 随着电压前馈控制和输出电流控制参数减小, 系统的稳定裕度也有所提升, 且参数变化幅度相同的情况下, 改变电压前馈对系统稳定裕度的提升始终优于输出电流控制。当电压前馈控制减小 10% 时, 稳定裕度由  $-1.03^\circ$  提升至  $10.64^\circ$ , 稳定裕度提升非常明显, 但随着电压前馈参数的不断减小, 稳定裕度提升效果减缓, 参数减小 20% 和 30% 时, 稳定裕度没有明显提升。

需要说明的是, 随着输出电流控制带宽的不断减小, 系统的稳定裕度提升效果没有明显减缓。虽然更小的输出电流控制带宽有助于提升系统稳定裕度, 但是输出电流控制带宽的不断减小会影响变换器自身控制性能。

综上, 通过减小电压前馈参数比减小电流控制带宽更能有效提升稳定裕度。但同时, 但电压前馈参数调整到一定程度后, 对稳定裕度的提升影响作用较弱。因此, 通过改变电压前馈参数可以在一定程度上提升并网系统稳定性, 但稳定裕度的提升幅度与范围受到限制, 有必要通过对 MMC-HVDC 并网站阻抗进行优化设计进一步改善系统并网稳定性。

### 4 基于电压前馈控制的 MMC-HVDC 并网站阻抗控制优化

由上文分析可知, 电压前馈控制对 MMC-HVDC 并网站阻抗特性及并网系统稳定性有较大影响, 由于仅通过修改电压前馈参数对并网系统的稳定性提升效果有限, 本节针从阻抗塑造和优化设计的角度讨论 MMC-HVDC 并网站阻抗控制优化方法。

#### 4.1 MMC-HVDC 并网站阻抗控制优化设计方法

与电压前馈控制对 MMC-HVDC 并网站阻抗特性的影响类似, 利用电压前馈控制进行 MMC-HVDC 并网站阻抗控制优化, 可看作在优化前导纳  $Y_{MMC0}(s)$  的基础上并联基于电压前馈控制的阻抗塑造环节的等效导纳  $Y_{rs}(s)$ , 其等效电路如图 12(a) 所示, 因此阻抗控制优化后的 MMC-HVDC 并网站阻抗  $Y_{MMCrs}(s)$  可表示为

$$Y_{MMCrs}(s) = Y_{MMC0}(s) + Y_{rs}(s) \quad (10)$$

现有研究表明, 电力电子装置接入电网出现稳

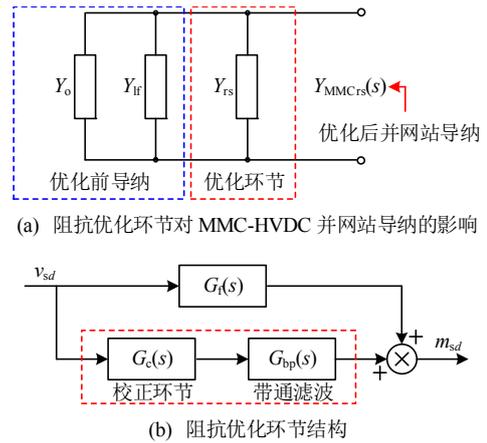


图 12 阻抗优化设计思路及阻抗校正环节结构  
Fig. 12 Theory of impedance optimization and structure of impedance corrector

定性问题是由于电力电子装置在阻抗交点频率处稳定裕度不足, 仍以第 3.1 节中应用场景进行对比分析(后续均以此作为分析案例),  $Y_{MMC0}(s)$  在振荡频率处的等效阻值为  $-5178\Omega$ , 呈现出“负阻尼”特性, 因此系统发生振荡。由式(10)可知, 为了保证重塑后阻抗的稳定性, 可通过设计阻抗塑造环节的等效导纳  $Y_{rs}(s)$ , 使阻抗控制优化后的 MMC 阻抗与电网阻抗模值的交点频率不变, 同时  $Y_{rs}(s)$  在阻抗模值的交点频率处尽可能多地提供阻尼, 从而最大程度提升系统稳定性。

本文采用的阻抗塑造环节结构如图 12(b) 所示, 在 MMC-HVDC 并网站电压前馈控制的基础上加入  $n$  阶的阻抗校正环节  $G_c(s)$  和带通滤波器  $G_{bp}(s)$ , 其中  $G_{bp}(s)$  将  $G_c(s)$  对阻抗校正控制作用限制在振荡频率附近频段内, 以尽可能减小阻抗控制在振荡频率范围之外对 MMC-HVDC 并网站的影响。常见的阻抗校正环节包括超前校正控制器、高通滤波器、低通滤波器和带通滤波器等, 且不同阶数的阻抗校正环节的阻尼提供能力也不同, 在上述分析案例中, 低通滤波环节和带通滤波环节对并网稳定性提升影响作用较弱, 而超前校正环节和高通滤波器能为系统提供正阻尼。

图 13 给出不同阶数超前校正环节的阻尼能力对比。可以看出, 二阶超前校正环节在振荡频率处所能提供的阻尼能力最强, 说明采用超前校正环节进行阻抗校正时, 二阶超前校正控制环节能更有效提高稳定裕度。同理可知, 采用高通滤波环节进行阻抗校正时, 一阶高通滤波环节能更有效提高稳定裕度。图 13 同时给出超前校正环节和一阶高通滤波器的阻尼提供能力对比。一阶高通滤波器的阻尼

提供能力大于一阶超前校正和三阶超前校正的阻尼提供能力，但明显小于二阶超前校正的阻尼提供能力，因此选择二阶超前校正环节进行阻抗校正最为合适。

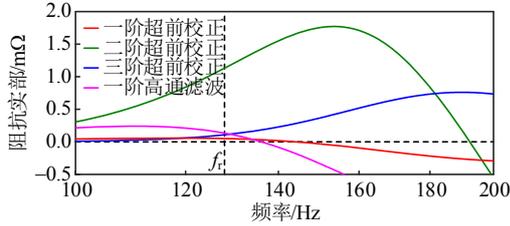


图 13 不同校正环节的阻尼提供能力对比  
Fig. 13 Damping capability of different impedance correctors

根据以上对比分析，阻抗校正环节选用二阶超前校正环节  $G_{lead}(s)$  用于提升  $Y_{MMC0}(s)$  在振荡频率处的幅角， $G_{lead}(s)$  和  $G_{bp}(s)$  的表达式分别为：

$$G_{lead}(s) = (k_{ld} \frac{s / \omega_{ld1} + 1}{s / \omega_{ld2} + 1})^2 \quad (11)$$

$$G_{bp}(s) = \frac{\omega_{bp2} s^2}{(s + \omega_{bp1})(s^2 + \omega_{bp2} s + \omega_{bp2})} \quad (12)$$

阻抗塑造环节参数设计原则如式(13)所示，需保证所加入的阻抗塑造环节能够尽可能多地为 MMC-HVDC 并网站提供阻尼，同时加入阻抗塑造环节后 MMC-HVDC 并网站阻抗与电网阻抗的交点频率  $\omega_r$  几乎不变，从而实现优化后并网系统的稳定裕度达到最大。

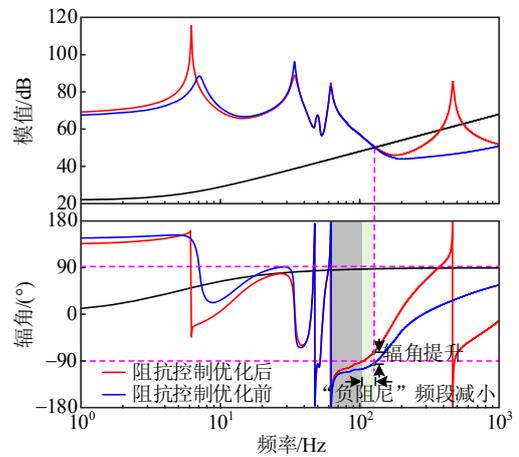
$$\begin{cases} \max \text{Re}(Y_{rs}(\omega_r)) \\ \text{s.t. } \varphi_m = \arcsin(\frac{\omega_{ld2} - \omega_{ld1}}{\omega_{ld2} + \omega_{ld1}}) \\ \omega_r = \sqrt{\omega_{ld1} \omega_{ld2}} \\ |Y_{MMC0}(\omega_r)| = |Y_{MMCrs}(\omega_r)| \\ \omega_{bp1} < \omega_{ld1} < \omega_{ld2} < \omega_{bp2} \end{cases} \quad (13)$$

根据式(13)可得，超前校正环节的零点和极点频率分别为  $\omega_{ld1} = 131.9\text{rad/s}$  和  $\omega_{ld2} = 1746.7\text{rad/s}$ ，带通滤波器的截止频率  $\omega_{bp1} = 62.8\text{rad/s}$  和  $\omega_{bp2} = 8224.7\text{rad/s}$ ， $k_{ld}$  为 0.0114。

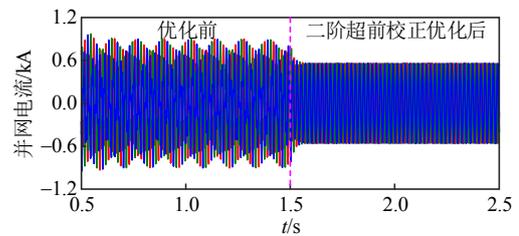
#### 4.2 阻抗控制优化对系统稳定性影响

图 14(a)给出加入阻抗控制优化前后阻抗特性对比，可以看出，阻抗优化环节没有改变 MMC-HVDC 并网站基频附近阻抗特性，优化后 MMC-HVDC 并网站控制功能及动态特性不受影响。此外，采用二阶超前校正形式的阻抗控制优化后，

MMC-HVDC 并网站与电网阻抗模值的曲线交点没有发生明显变化，但 MMC-HVDC 并网站的幅角在振荡频率处大幅提升(稳定裕度由  $-1.03^\circ$  提升至  $22.33^\circ$ )，振荡频率附近 MMC-HVDC 并网站呈现“负阻尼”特性的频段减小(频段宽度由 70.2Hz 减小至 43.7Hz)，有效提升了并网系统的稳定裕度，使并网系统由振荡变为稳定，阻抗塑造控制所带来的稳定裕度提升作用相较电压前馈参数调节更为明显。图 14(b)给出系统的时域仿真波形，仿真进行到 1.5s 时，阻抗控制优化接入后(其余控制参数不变)，系统迅速稳定，系统稳定运行时，THD 为 0.16%，谐波含量小于改变电压前馈参数后的谐波含量。



(a) 阻抗控制优化前后系统阻抗曲线



(b) 时域仿真波形

图 14 阻抗优化设计对系统阻抗的影响

Fig. 14 Impacts of impedance optimization on system impedance

图 15 给出分析案例中采用不同阻抗校正环节进行 MMC-HVDC 并网站阻抗优化的对比，可以看出，采用二阶重塑结构的稳定裕度提升确实最为明显，由  $-1.03^\circ$  提升至  $22.33^\circ$ ，而采用一阶和三阶超前校正环节的的稳定裕度分别为  $0.14^\circ$  和  $3.68^\circ$ ，采用一阶低通环节的的稳定裕度为  $5.89^\circ$ 。这与 4.1 节中分析结论一致。

图 16 分别给出采用三阶超前校正环节和一阶高通滤波环节的系统仿真结果，仿真进行到 1.5s 时，

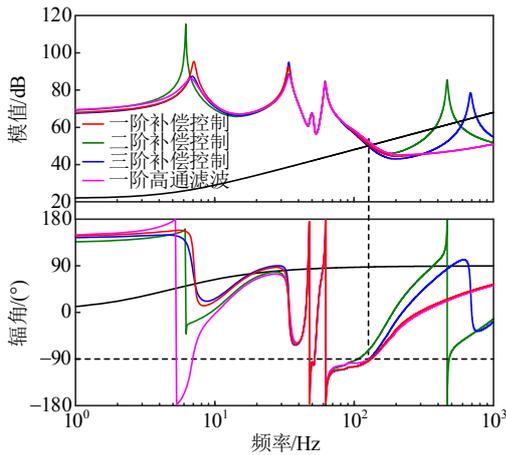
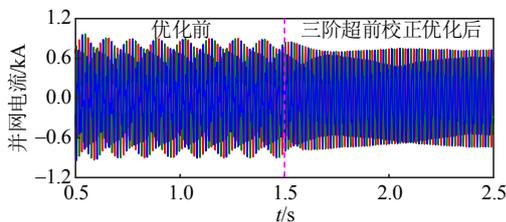
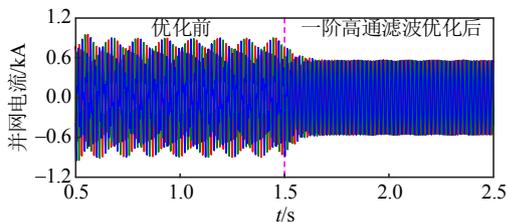


图 15 不同阻抗校正环节对系统阻抗特性的影响

Fig. 15 Impacts of different impedance correctors on impedance characteristics of the system



(a) 时域仿真波形(三阶超前校正)



(b) 时域仿真波形(一阶高通滤波)

图 16 不同校正环节优化后的并网电流波形

Fig. 16 Waveform of injected current with different impedance correctors

分别接入三阶超前校正环节和一阶高通滤波环节，可以看出，相比于接入二阶重塑结构时，系统迅速稳定，接入三阶超前校正环节或一阶高通滤波环节时，系统达到稳定运行的时间明显增加，且系统达到稳定后仍存在一定量的谐波，说明三阶超前校正环节和一阶高通滤波环节均能保证系统稳定，但采用二阶超前校正环节的稳定性更好。因此本文所提出的阻抗控制优化方法能够有效地优化 MMC-HVDC 并网站在振荡频率处的阻抗，提升系统稳定性。

综上，针对 MMC-HVDC 并网稳定分析案例，阻抗控制优化中采用二阶超前校正环节对稳定裕度提升效果最好。同时，相比电压前馈参数修改方

法，阻抗塑造控制对稳定裕度的提升更为明显，能够更加有效地改善系统稳定性问题。

### 5 结论

本文利用多谐波线性化方法推导考虑电压前馈控制的 MMC-HVDC 并网站阻抗模型，分析不同控制环节对 MMC-HVDC 并网站阻抗特性及并网系统稳定性的影响，并基于电压前馈控制提出阻抗控制优化方法，得到以下结论：

1) 建立了考虑电压前馈的 MMC-HVDC 并网站阻抗模型，基于该模型可看出，考虑电压前馈控制的 MMC-HVDC 并网站导纳为未考虑电压前馈的导纳与电压前馈控制等效导纳的并联。在大部分频段上，电压前馈控制对 MMC-HVDC 并网站阻抗的模和辐角特性均有显著的影响。

2) MMC-HVDC 并网站的各控制环路对并网系统的稳定性影响程度有所不同，通过阻抗灵敏度分析可知，电压前馈参数相比其他控制环路参数对 MMC-HVDC 并网稳定性的影响更为明显，但仅通过修改电压前馈参数的方式提升系统稳定性的效果有限。

3) 论文基于电压前馈控制提出一种 MMC-HVDC 并网站阻抗塑造控制与优化方法，给出具体的阻抗校正环节的设计思路与参数设计方法，相比电压前馈参数修改，阻抗塑造控制优化方法能够更有效地提升系统稳定性。最后通过仿真验证，证明了阻抗控制优化方法的可行性。

### 参考文献

[1] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.  
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17(in Chinese).

[2] SUN Jian, LI Mingjie, ZHANG Zhigang, et al. Renewable energy transmission by HVDC across the continent: system challenges and opportunities[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(4): 353-364.

[3] 迟永宁, 梁伟, 张占奎, 等. 大规模海上风电输电与并网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3758-3770.  
CHI Yongning, LIANG Wei, ZHANG Zhankui, et al. An overview on key technologies regarding power transmission and grid integration of large scale offshore wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14):

- 3758-3770(in Chinese).
- [4] 尹聪琦, 谢小荣, 刘辉, 等. 柔性直流输电系统振荡现象分析与控制方法综述[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1117-1123.  
YIN Congqi, XIE Xiaorong, LIU Hui, et al. Analysis and control of the oscillation phenomenon in VSC-HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1117-1123(in Chinese).
- [5] 李光辉, 王伟胜, 郭建波, 等. 风电场经 MMC-HVDC 送出系统宽频带振荡机理与分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5281-5297.  
LI Guanghui, WANG Weisheng, GUO Jianbo, et al. Broadband oscillation mechanism and analysis for wind farm integration through MMC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5281-5297(in Chinese).
- [6] BUCHHAGEN C, RAUSCHER C, MENZE A, et al. BorWin1-First experiences with harmonic interactions in converter dominated grids[C]//International ETG Congress 2015; Die Energiewende-Blueprints for the New Energy Age. Bonn, Germany: VDE, 2015: 1-7.
- [7] SUN Jian, LIU Hanchao. Sequence impedance modeling of modular multilevel converters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(4): 1427-1443.
- [8] ZHANG Yang, CHEN Xin, SUN Jian. Sequence impedance modeling and analysis of MMC in single-star configuration[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 334-346.
- [9] HUANG Tong, CHEN Xin, LI Guanghui, et al. Sequence impedance modeling and frequency characteristic analysis of MMC-based HVDC[C]//Proceedings of 2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia. Busan, Korea (South): IEEE, 2019: 1-8.
- [10] LYU Jing, CAI Xu, MOLINAS M. Optimal design of controller parameters for improving the stability of MMC-HVDC for wind farm integration[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(1): 40-53.
- [11] 刘小林, 王顺亮, 马俊鹏, 等. 基于谐波状态空间的模块化多电平换流器直流侧改进建模[J]. 电网技术, 2021, 45(8): 3173-3180.  
LIU Xiaolin, WANG Shunliang, MA Junpeng, et al. Modeling for DC side impedance of modular multilevel converter based on harmonic state space[J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 3173-3180(in Chinese).
- [12] 宗皓翔, 吕敬, 张琛, 等. MMC 多维阻抗模型及其在风场-柔直交互稳定分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4941-4953.  
ZONG Haoxiang, LV Jing, ZHANG Chen, et al. MIMO impedance model of MMC and its application in the wind farm-HVDC interaction stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4941-4953(in Chinese).
- [13] HUANG Tong, CHEN Xin, LI Zhaohui, et al. Impacts of coupling effects on stability analysis of PMSG-based wind farm integration through MMC-HVDC[C]//Proceedings of 2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference. Nanjing, China: IEEE, 2020: 1918-1923.
- [14] 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.  
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(in Chinese).
- [15] 王凯, 原熙博, 王晖, 等. 弱电网下逆变器并网系统失稳的两种诱因[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 1230-1242.  
WANG Kai, YUAN Xibo, WANG Hui, et al. Two causes of the inverter-based grid-connected system instability in weak grids[J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 1230-1242(in Chinese).
- [16] 李云丰, 汤广福, 贺之渊, 等. MMC 型直流输电系统阻尼控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20): 5492-5503.  
LI Yunfeng, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. Damping control strategy research for MMC based HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20): 5492-5503(in Chinese).
- [17] 李云丰, 贺之渊, 庞辉, 等. 柔性直流输电系统高频稳定性分析及抑制策略(一): 稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 5842-5855.  
LI Yunfeng, HE Zhiyuan, PANG Hui, et al. High frequency stability analysis and suppression strategy of MMC-HVDC systems (Part I): stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 5842-5855(in Chinese).
- [18] 张明远, 肖仕武, 田恬, 等. 基于阻抗灵敏度的直驱风电场并网次同步振荡影响因素及参数调整分析[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2768-2777.  
ZHANG Mingyuan, XIAO Shiwu, TIAN Tian, et al. Analysis of SSO influencing factors and parameter adjustment for grid-connected full-converter wind farm based on impedance sensitivity[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2768-2777(in Chinese).
- [19] 李杨, 帅智康, 方俊彬, 等. 灵敏度在变换器系统阻抗稳定性分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(10): 3480-3491.  
LI Yang, SHUAI Zhikang, FANG Junbin, et al.

Application of sensitivity in impedance-based stability analysis for converter systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(10): 3480-3491(in Chinese).

[20] 黄通, 陈新, 张东辉, 等. 计及直流电压控制的 MMC 换流站阻抗建模及其稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(11): 4273-4284.

HUANG Tong, CHEN Xin, ZHANG Donghui, et al. Impedance characteristic and integration stability research on modular multilevel converter with consideration of DC voltage controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(11): 4273-4284(in Chinese).

#### 附录 A 考虑电压前馈控制的 MMC 阻抗系数矩阵变量定义

式(2)中  $\mathbf{Q}_1$  的非零元素分别如式(A1)所示:

$$\begin{cases} \mathbf{Q}_1(2,4) = -2H_i(s-j\omega_1) + j2K_i \\ \mathbf{Q}_1(4,4) = -2H_i(s-j\omega_1) - j2K_i \end{cases} \quad (\text{A1})$$

式(2)中  $\mathbf{Q}_2$  的非零元素分别如式(A2)所示:

$$\begin{cases} \mathbf{Q}_2(2,2) = G_\theta(s-j\omega_1) \{2[H_i(s-j\omega_1) - jK_i] \dot{I}_{1n} - \dot{M}_{1n}\} e^{j\varphi_1} \\ \mathbf{Q}_2(2,4) = G_\theta(s-j\omega_1) \{2[-H_i(s-j\omega_1) + jK_i] \dot{I}_{1n} + \dot{M}_{1n}\} e^{-j\varphi_1} \\ \mathbf{Q}_2(4,2) = G_\theta(s-j\omega_1) \{2[-H_i(s-j\omega_1) + jK_i] \dot{I}_{1p} + \dot{M}_{1p}\} e^{j\varphi_1} \\ \mathbf{Q}_2(4,4) = G_\theta(s-j\omega_1) \{2[H_i(s-j\omega_1) + jK_i] \dot{I}_{1p} - \dot{M}_{1p}\} e^{-j\varphi_1} \end{cases} \quad (\text{A2})$$

式中:  $G_\theta(s-j\omega_1)$  为锁相闭环传递函数;  $M_{1p}$ 、 $M_{1n}$  分别表示调制信号的正、负基频傅里叶系数;  $\varphi_1$  为 MMC 输出电压相位。

式(2)中  $\mathbf{Q}_3$  的非零元素分别如式(A3)所示:

$$\begin{cases} \mathbf{Q}_3(2,3) = 0.5H_d(s-j\omega_1)H_i(s-j\omega_1)e^{-j\varphi_1} \\ \mathbf{Q}_3(4,3) = 0.5H_d(s-j\omega_1)H_i(s-j\omega_1)e^{j\varphi_1} \end{cases} \quad (\text{A3})$$

式中  $H_d(s-j\omega_1)$ 、 $H_i(s-j\omega_1)$  分别为直流电压、输出电流控制器传递函数。

式(2)中  $\mathbf{Q}_{v2}$  的非零元素为

$$\begin{cases} \mathbf{Q}_{v2}(2,2) = -0.5G_\theta(s-j\omega_1)G_f(s-j\omega_1)V_g + G_f(s-j\omega_1) \\ \mathbf{Q}_{v2}(2,4) = 0.5G_\theta(s-j\omega_1)G_f(s-j\omega_1)V_g e^{-j\varphi_1} \\ \mathbf{Q}_{v2}(4,2) = 0.5G_\theta(s-j\omega_1)G_f(s-j\omega_1)V_g e^{j\varphi_1} \\ \mathbf{Q}_{v2}(4,4) = -0.5G_\theta(s-j\omega_1)G_f(s-j\omega_1)V_g + G_f(s-j\omega_1) \end{cases} \quad (\text{A4})$$

式中:  $G_f(s-j\omega_1)$  为电压前馈控制传递函数;  $V_g$  为 MMC 输出电压幅值。

计及直流电压控制后, 式(2)表征交直流侧功率守恒方程中的中间变量  $\mathbf{T}_1$ — $\mathbf{T}_5$  均为  $5 \times 5$  阶矩阵, 其中非零元素如式(A5)所示:

$$\begin{cases} \mathbf{T}_1(2,1) = \frac{1}{2}\dot{V}_{1p} \\ \mathbf{T}_1(2,3) = \frac{1}{2}\dot{V}_{1n} \\ \mathbf{T}_2(2,1) = \frac{1}{2}\dot{I}_{1p} \\ \mathbf{T}_2(2,3) = \frac{1}{2}\dot{I}_{1n} \\ \mathbf{T}_3(2,1) = (s-j\omega_1)L\frac{\dot{I}_{1p}}{2} \\ \mathbf{T}_3(2,2) = (s-j\omega_1)L\frac{\dot{I}_{dc}}{2} \\ \mathbf{T}_3(2,3) = (s-j\omega_1)L\frac{\dot{I}_{1n}}{2} \\ \mathbf{T}_3(2,4) = (s-j\omega_1)L\frac{\dot{I}_{2n}}{2} \\ \mathbf{T}_4(2,1) = (s-j\omega_1)C_m\frac{\dot{V}_{C1p}}{2} \\ \mathbf{T}_4(2,2) = (s-j\omega_1)C_mV_{Cdc} \\ \mathbf{T}_4(2,3) = (s-j\omega_1)C_m\frac{\dot{V}_{C1n}}{2} \\ \mathbf{T}_4(2,4) = (s-j\omega_1)C_m\frac{\dot{V}_{C2n}}{2} \\ \mathbf{T}_5(2,2) = 3 \end{cases} \quad (\text{A5})$$

式中:  $V_{1p}$ 、 $V_{1n}$  分别为输出电压信号的正基频和负基频傅里叶系数;  $I_{1p}$ 、 $I_{dc}$ 、 $I_{1n}$  和  $I_{2n}$  分别为 a 相上桥臂电流信号的正基频、直流、负基频和负二倍频傅里叶系数;  $V_{C1p}$ 、 $V_{Cdc}$ 、 $V_{C1n}$  和  $V_{C2n}$  分别为 a 相上桥臂等效模块电容电压信号的正基频、直流、负基频和负二倍频傅里叶系数。



黄通

在线出版日期: 2022-12-07。

收稿日期: 2022-07-05。

作者简介:

黄通(1991), 女, 博士研究生, 研究方向为 MMC 柔性直流输电系统建模及稳定性分析, huangtong0724@nuaa.edu.cn;

\*通信作者: 陈新(1973), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为分布式发电和微电网系统的建模、控制与稳定性等, chen.xin@nuaa.edu.cn;

张东辉(1994), 男, 博士研究生, 研究方向为新能源发电并网系统控制与稳定性, ceozdhcco@nuaa.edu.cn。

(责任编辑 吕鲜艳)