

# 柔性直流输电系统多端异构通用化阻抗建模与分析

周国梁<sup>1</sup>, 高丽萍<sup>2</sup>, 梁言桥<sup>1</sup>, 李文津<sup>1</sup>, 王鑫<sup>1</sup>

(1. 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 湖北 武汉 430061; 2. 可再生能源并网全国重点实验室 (中国电力科学研究院有限公司), 北京 100192)

**摘要:** 新能源、基于模块化多电平换流器的多端柔性直流 (modular multilevel converter-based multi-terminal high voltage direct current, MMC-MTDC) 以及交流电网之间宽频振荡风险凸出, 严重制约 MMC-MTDC 安全稳定运行和新能源高效消纳。MMC-MTDC 各换流站呈现定交流电压、定直流电压、定功率等异构化控制方式, 多端换流站之间又存在强非线性耦合, 给系统振荡建模与分析带来挑战。为此, 首先提出计及正负序控制的 MMC-MTDC 控制系统模块化建模方法。然后, 针对复杂交直流网架结构, 建立计及多端非线性耦合的 MMC-MTDC 不同断面通用化阻抗模型。最后, 以三端 MMC-MTDC 环网为例, 仿真验证通用化阻抗建模的准确性和有效性, 并分析多端互联系统及正负序控制对阻抗特性的耦合影响, 为新能源基地经 MMC-MTDC 互联系统振荡分析提供基础。

**关键词:** MMC-MTDC; 通用化阻抗模型; 宽频振荡; 正负序控制; 多端耦合

**DOI:** 10.11930/j.issn.1004-9649.202405012

## 0 引言

模块化多电平换流器 (modular multi-level converter, MMC) 凭借其模块化设计、可拓展性强、能够独立构建交流电压和频率诸多优点广泛应用于高压直流输电场合<sup>[1-4]</sup>。随着沙漠、戈壁、荒漠地区大型风光基地建设, 基于模块化多电平换流器的多端柔性直流 (modular multilevel converter-based multi-terminal high voltage direct current, MMC-MTDC) 输电能够实现广域资源优化互补、大规模新能源可靠接入与高效消纳, 成为新能源基地开发送出重要方式<sup>[5-7]</sup>。随着国内外新能源经柔直送出工程的投运, 宽频振荡事故频繁发生, 例如张北柔直工程 58 Hz 负序振荡<sup>[8]</sup>、德国北海柔直工程 250~350 Hz 中频振荡<sup>[9]</sup>、江苏如东柔直上千赫兹高频振荡<sup>[10-11]</sup>, 宽频振荡严重

影响系统的安全稳定运行<sup>[12-15]</sup>。

近年来, 阻抗法成为学术界和工业界广泛采用的一种分析与解决宽频振荡问题的有效手段<sup>[16-19]</sup>。文献<sup>[20-22]</sup>采用多谐波线性化方法, 建立了计及锁相环、电流控制环节影响的 MMC 交流阻抗模型。文献<sup>[23]</sup>分析发现, 当 MMC 未采用零序环流控制时, 交流阻抗存在谐振峰, 易与弱电网产生振荡风险, 为此提出了零序环流控制回路的参数整体方法, 提升系统稳定性。鉴于 MMC 控制灵活多样, 针对联网运行的 MMC, 文献<sup>[24-25]</sup>建立了考虑直流电压控制、电压前馈影响的联网站 MMC 交流阻抗模型, 阐明了直流电压控制、电压前馈对 MMC 并网系统稳定性的影响规律。对于新能源接入的孤岛运行 MMC, 文献<sup>[26]</sup>建立了计及交流电压控制的孤岛站 MMC 交流阻抗模型, 分析了风电场接入孤岛柔直系统的稳定性。考虑电网不平衡的影响, 文献<sup>[27-28]</sup>在现有 MMC 典型控制基础上, 建立了计及正负序电流控制的 MMC 交流阻抗模型, 分析了正负序控制对阻抗波动特性的作用规律, 提升了中高频段系统稳定性分析精度。

然而, 上述研究仅考虑了单端场景, 忽略了 MMC 交直流系统之间交互影响。为此, 文献<sup>[29-</sup>

**收稿日期:** 2024-05-07; **修回日期:** 2025-02-08。

**基金项目:** 中国电力工程顾问集团科技项目 (海上风电场柔性直流送出系统宽频谐振机理与抑制方案研究, DG2-D03-2022); 国家电网有限公司科技项目 (100% 新能源发电基地经二极管整流送出组网拓扑与运行控制技术研究, 5108-202218280A-2-307-XG)。

30] 建立了考虑风电场动态特性的 MMC 直流阻抗模型, 分析了风电机组并网台数、控制参数等交流侧阻抗特性对直流侧系统稳定性的影响。文献 [31] 建立了考虑直流系统影响的海上 MMC 交流阻抗模型, 揭示了陆上换流站、直流电缆对海上交流系统稳定性的耦合影响。并且, 研究指出 MMC 交直流系统阻抗耦合强度与柔直控制参数紧密相关, 对系统稳定性产生重要影响。

综上所述, 一方面 MMC 正负序控制对阻抗特性影响显著, 另一方面 MMC 交、直流侧动态特性存在交互耦合显著。随着 MMC-MTDC 输送容量增大、换流站接入数量增多, 各端换流站控制结构呈现定交流电压、定直流电压、定功率等多样化控制特征。现有研究主要是针对特定控制方式 MMC 开展阻抗建模, 在多端异构 MMC 时存在建模复杂度高、效率低等难题。并且, 换流站交直流端口之间、不同换流站之间耦合特性更为复杂, 多端互联系统网架结构繁杂、节点庞大, 导致 MMC-MTDC 不同断面振荡特性不明确, 多端换流站控制特性对系统稳定性影响机理不清晰。亟须深入开展 MMC-MTDC 互联系统稳定性分析及耦合影响规律研究。

为此, 本文首先给出了 MMC-MTDC 互联系统结构, 归纳划分子系统类型, 为通用化建模提供基础。其次, 考虑不同换流站异构化控制策略, 提出控制环节模块化建模思路, 建立计及正负序控制的 MMC-MTDC 控制系统小信号模型。然后, 针对复杂交、直流网架结构, 提出计及多端互联系统耦合影响的通用化阻抗建模方法, 建立考虑多端口正负序控制、交直流耦合影响的不同断面阻抗模型。最后, 以三端 MMC-MTDC 环网为例, 仿真验证不同断面阻抗模型准确性, 并分析多端互联系统、正负序控制对阻抗特性的耦合影响。

### 1 MMC-MTDC 互联系统结构

本文以 MMC 换流站为节点, 根据换流站交直流侧接入系统场景, 将图 1 所示 MMC-MTDC 互联系统归类划分为以下子系统类型, 1) 孤岛新能源系统, MMC 换流站采用  $V/f$  控制模式; 2) 联网新能源系统, MMC 换流站采用  $PQ$  控制

模式并网运行; 3) 联网系统, MMC 换流站采用  $V_{dc}$  或  $PQ$  控制模式; 4) 负荷系统, MMC 换流站采用  $V/f$  控制模式; 5) 直流电网。

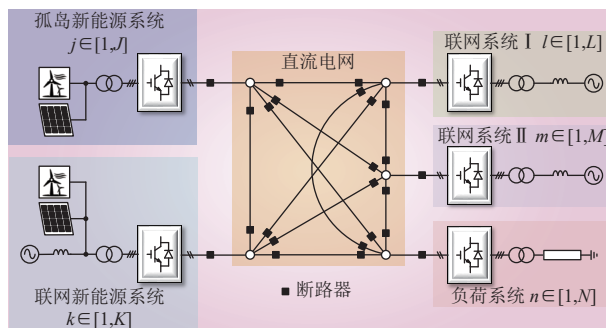


图 1 MMC-MTDC 互联系统结构  
Fig. 1 MMC-MTDC interconnection system topology

### 2 MMC 控制系统建模

本章根据 MMC-MTDC 不同类型子系统多样化控制, 提出控制环节模块化建模思路, 建立适用于不同控制方式下计及正负序控制的 MMC 控制系统小信号模型。

#### 2.1 正负序分离环节建模

正负序分离控制如图 2 所示, 采用延时信号消除方法对电压、电流进行正负序分离。图中: 旋转角  $\omega_1 t$  为给定理想锯齿波;  $T$  为基波周期。

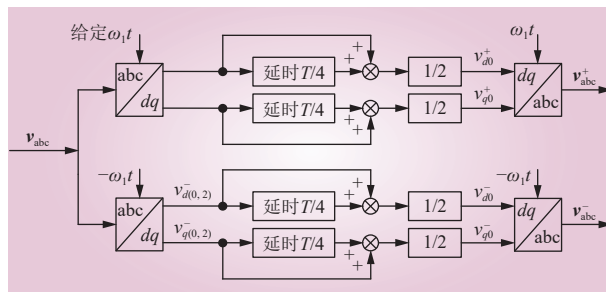


图 2 基于延时信号消除的正负序分离控制框图  
Fig. 2 Positive- and negative-sequence separation control block diagram based on delayed signal cancellation

经过正负序分离后, 交流电压  $\hat{v}_{abc}$  正序、负序小信号分量可以分别表示为

$$\begin{cases} \hat{v}_{abc}^+ = T_{sp} \hat{v}_{abc} \\ \hat{v}_{abc}^- = T_{sn} \hat{v}_{abc} \end{cases} \quad (1)$$

式中: 上标 “+” “-” 分别表示正序和负序;  $T_{sp}$ 、 $T_{sn}$  分别为正序、负序分量提取传递函数矩阵。

根据式 (1)，同理可对交流电流  $\hat{i}_{abc}$  进行正负序分离，得到  $\hat{i}_{abc}^+ = T_{sp}\hat{i}_{abc}$ ， $\hat{i}_{abc}^- = T_{sn}\hat{i}_{abc}$ 。

### 2.2 同步环节建模

对于孤岛新能源系统和负荷系统而言，MMC 换流站采用  $V/f$  控制模式，频率  $f_1$  给定，同步旋转角  $\theta$  生成方式如图 3 a) 所示，不受系统小信号影响。

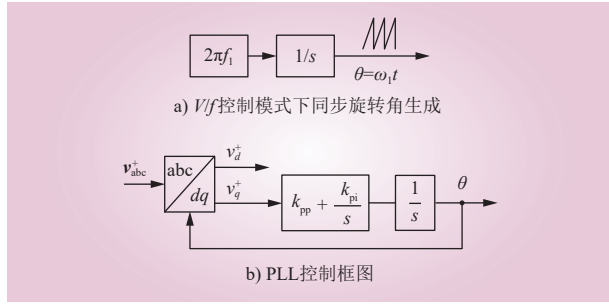


图 3 同步旋转角获取框图

Fig. 3 Block diagram of synchronous rotation angle generation

对于联网新能源系统、 $V_{dc}$  模式联网系统、 $PQ$  模式联网系统，MMC 换流站采用 PLL 跟踪电网电压相位，其控制框图如图 3 b) 所示。对 PLL 谐波线性化处理，可以得到锁相角小信号  $\hat{\theta}$  为

$$\hat{\theta} = T_{PLL}\hat{v}_a^+ = H_{PLL}(U + V_1^+ H_{PLL})^{-1}G_{pqp}\hat{v}_a^+ \quad (2)$$

式中： $T_{PLL}$  为 PLL 闭环传递函数矩阵； $U$  为单位矩阵； $V_1^+$  为正序基频电压幅值； $G_{pqp}$  表示由正序电压通过正序 Park 变换至  $q$  轴的传递函数矩阵； $H_{PLL}$  为 PLL 开环传递函数矩阵。

### 2.3 外环控制建模

#### 2.3.1 $V/f$ 控制模式

对于孤岛新能源系统和负荷系统而言， $V/f$  控制模式控制结构如图 4 所示。

正序电流  $dq$  轴参考指令小信号  $\hat{i}_{dref}^+$ 、 $\hat{i}_{qref}^+$  为

$$\begin{cases} \hat{i}_{dref}^+ = -H_{vacp}G_{pdp}\hat{v}_a^+ \\ \hat{i}_{qref}^+ = -H_{vacp}G_{pqp}\hat{v}_a^+ \end{cases} \quad (3)$$

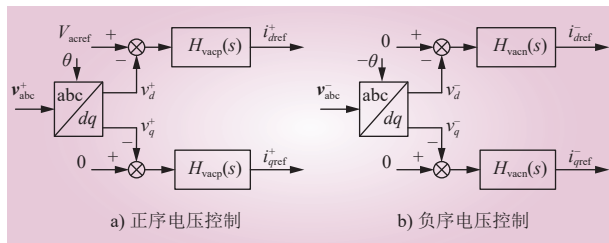


图 4  $V/f$  控制模式下交流电压控制框图

Fig. 4 AC voltage control diagram in  $V/f$  control mode

式中： $H_{vacp}$  为正序电压 PI 控制器传递函数矩阵； $G_{pdp}$  为正序电压通过正序 Park 变换至  $d$  轴传递函数矩阵。

负序电流  $dq$  轴参考指令小信号  $\hat{i}_{dref}^-$ 、 $\hat{i}_{qref}^-$  为

$$\begin{cases} \hat{i}_{dref}^- = -H_{vacn}G_{ndn}\hat{v}_a^- \\ \hat{i}_{qref}^- = -H_{vacn}G_{nqn}\hat{v}_a^- \end{cases} \quad (4)$$

式中： $H_{vacn}$  为负序电压 PI 控制器传递函数矩阵； $G_{ndn}$ 、 $G_{nqn}$  分别为负序电压通过负序 Park 变换至  $d$ 、 $q$  轴传递函数矩阵。

#### 2.3.2 $PQ$ 控制模式

对于新能源联网系统和  $PQ$  模式联网系统， $PQ$  控制模式控制结构如图 5 所示。正序电流  $dq$  轴参考指令小信号分别为

$$\begin{cases} \hat{i}_{dref}^+ = -k_p G_{pdp}\hat{v}_a^+ \\ \hat{i}_{qref}^+ = k_Q G_{pqp}\hat{v}_a^+ \end{cases} \quad (5)$$

式中： $k_p = 2P_{ref}/3(V_1^+)^2$ ， $k_Q = 2Q_{ref}/3(V_1^+)^2$ ，分别为有功、无功系数， $P_{ref}$ 、 $Q_{ref}$  分别为有功、无功参考值。负序电流参考指令设为 0。

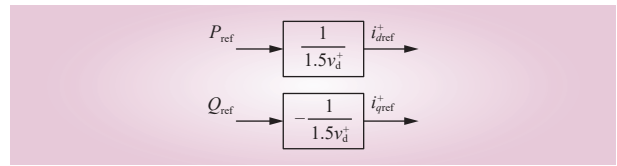


图 5  $PQ$  控制框图

Fig. 5  $PQ$  control diagram

#### 2.3.3 $V_{dc}$ 控制模式

$V_{dc}$  模式联网系统外环控制结构如图 6 所示。正序电流  $d$  轴参考指令小信号为

$$\hat{i}_{dref}^+ = -H_{vdc}\hat{v}_{dc} \quad (6)$$

式中： $H_{vdc}$  为直流电压 PI 控制器传递函数矩阵； $\hat{v}_{dc}$  为直流电压。

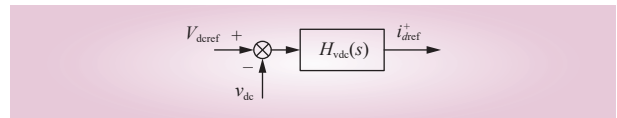


图 6  $V_{dc}$  控制框图

Fig. 6 DC voltage control diagram

### 2.4 内环控制建模

#### 2.4.1 交流电流控制

正负序交流电流控制结构如图 7 所示。

由正序电流控制，可得交流正序调制小信号  $\hat{m}_a^+$  为

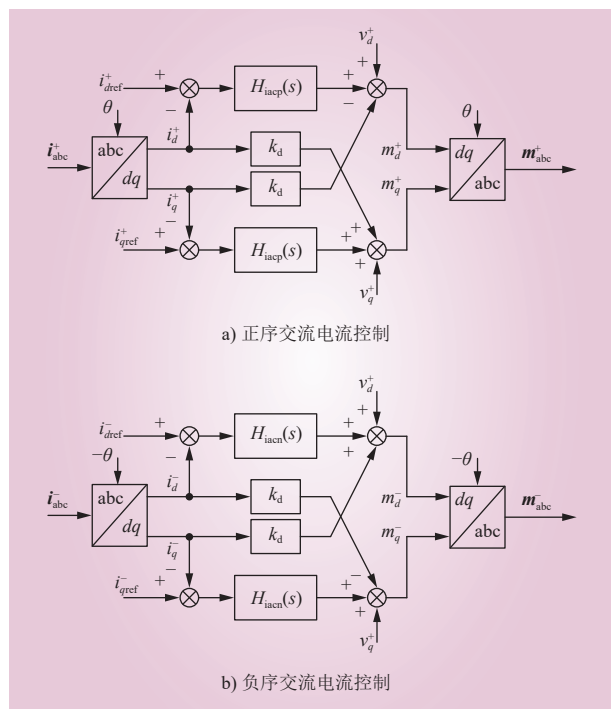


图 7 交流电流控制框图

Fig. 7 AC current control diagram

$$\hat{m}_a^+ = G_{da}H_{iacp}\hat{i}_{dref}^+ - G_{qa}H_{iacp}\hat{i}_{qref}^+ - (\eta_{1p}G_{pdp} - \eta_{2p}G_{pqp})\hat{i}_a^+ + (G_{da}G_{pdp} - G_{qa}H_{PLL}^{-1}T_{PLL})\hat{v}_a^+ - \eta_{3p}\hat{\theta} \quad (7)$$

式中： $H_{iacp}$ 为正序交流电流传递函数矩阵； $G_{da}$ 、 $G_{qa}$ 分别为 Park 反变换  $d$ 、 $q$  轴传递函数矩阵； $\eta_{1p}$ 、 $\eta_{2p}$ 、 $\eta_{3p}$ 分别为正序电流系数矩阵。

由负序电流控制，可得交流负序调制小信号  $\hat{m}_a^-$  为

$$\hat{m}_a^- = G_{da}H_{iacn}\hat{i}_{dref}^- + G_{qa}H_{iacn}\hat{i}_{qref}^- - (\eta_{1n}G_{ndn} + \eta_{2n}G_{nqn})\hat{i}_a^- + (G_{da}G_{ndn} + G_{qa}G_{nqn})\hat{v}_a^- + \eta_{3n}\hat{\theta} \quad (8)$$

式中： $H_{iacn}$ 为负序交流电流控制传递函数矩阵； $\eta_{1n}$ 、 $\eta_{2n}$ 、 $\eta_{3n}$ 为负序电流系数矩阵。

#### 2.4.2 环流控制

MMC 正、负序环流控制框图如图 8 所示。

由正序环流控制，可得环流正序调制小信号  $\hat{m}_{ca}^+$  为

$$\hat{m}_{ca}^+ = (\lambda_{1p}G_{2adp} + \lambda_{2p}G_{2aqp})\hat{i}_{ca} + \lambda_{3p}\hat{\theta} \quad (9)$$

式中： $G_{2adp}$ 、 $G_{2aqp}$ 分别为正序二倍频 Park 变换下  $dq$  轴传递函数矩阵； $\lambda_{1p}$ 、 $\lambda_{2p}$ 、 $\lambda_{3p}$ 为正序环流系数矩阵； $\hat{i}_{ca}$ 为环流小信号。

由负序环流控制，可得环流负序调制小信号  $\hat{m}_{ca}^-$  为

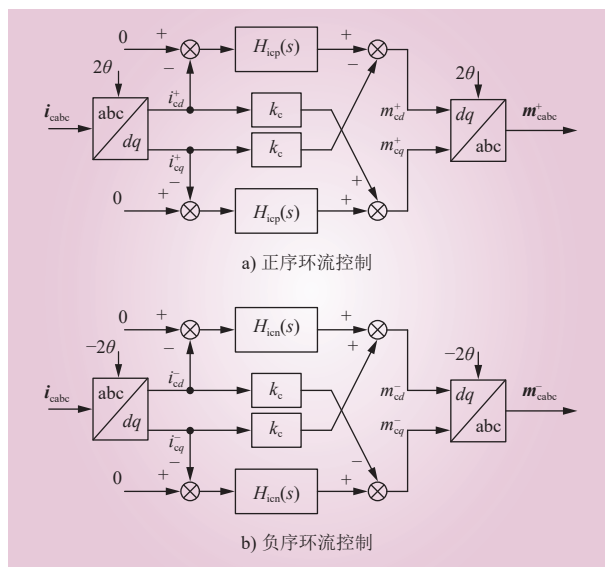


图 8 环流控制框图

Fig. 8 Circulating current control diagram

$$\hat{m}_{ca}^- = (\lambda_{1n}G_{2adn} + \lambda_{2n}G_{2aqn})\hat{i}_{ca} + \lambda_{3n}\hat{\theta} \quad (10)$$

式中： $G_{2adn}$ 、 $G_{2aqn}$ 分别为负序二倍频 Park 变换下  $d$ 、 $q$  轴传递函数矩阵； $\lambda_{1n}$ 、 $\lambda_{2n}$ 、 $\lambda_{3n}$ 为负序环流系数矩阵。

#### 2.5 调制信号小信号模型

MMC 桥臂调制信号形成如图 9 所示。

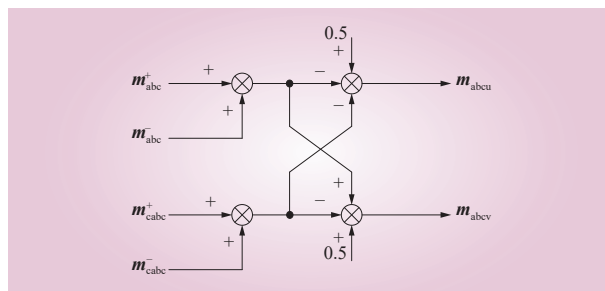


图 9 桥臂调制信号形成框图

Fig. 9 Arm modulation signal generation diagram

根据 2.1~2.4 节各控制环节模块化建模，推导出桥臂调制信号小信号  $\hat{m}_{au}$  模型一般化表达式为

$$\hat{m}_{au} = G_i\hat{i}_a + G_{ic}\hat{i}_{ca} + G_v\hat{v}_a + G_{vdc}\hat{v}_{dc} \quad (11)$$

式中： $G_i$ 为交流电流控制传递函数矩阵； $G_{ic}$ 为环流控制传递函数矩阵； $G_v$ 为 PLL、交流电压控制，或者  $PQ$  功率控制传递函数矩阵； $G_{vdc}$ 为直流电压控制传递函数矩阵。

对于多端 MMC-HVDC，内环控制为共有环节，各换流站  $G_i$ 、 $G_{ic}$  表达形式一致。同步环节、外环控制为特有环节，各换流站  $G_v$ 、 $G_{vdc}$  不同。

根据控制方式对应选择模块化建模结果，由此建立 MMC-MTDC 控制系统小信号模型。

### 3 MMC-MTDC 系统通用化阻抗建模

#### 3.1 MMC 交直流阻抗建模

根据 MMC 平均值模型，可以建立 MMC 桥臂回路小信号模型为

$$\begin{cases} \mathbf{Y}_{\text{Ceq}} \hat{\mathbf{v}}_{\text{cau}} = (\mathbf{i}_{\text{au}} \hat{\mathbf{m}}_{\text{au}} + \mathbf{m}_{\text{au}} \hat{\mathbf{i}}_{\text{au}}) \\ \mathbf{Z}_{\text{Larm}} \hat{\mathbf{i}}_{\text{au}} = -\left( \mathbf{v}_{\text{cau}} \hat{\mathbf{m}}_{\text{au}} + \mathbf{m}_{\text{au}} \hat{\mathbf{v}}_{\text{cau}} + \hat{\mathbf{v}}_{\text{a}} - \frac{1}{2} \hat{\mathbf{v}}_{\text{dc}} \right) \end{cases} \quad (12)$$

式中： $\mathbf{i}_{\text{au}}$ 、 $\mathbf{v}_{\text{cau}}$ 、 $\mathbf{m}_{\text{au}}$  分别为 MMC 桥臂电流、电容电压、桥臂调制信号稳态矩阵； $\mathbf{Y}_{\text{Ceq}}$  为等效电容导纳矩阵； $\mathbf{Z}_{\text{Larm}}$  为桥臂电感阻抗矩阵。

MMC 交流电流、环流以及直流电流与桥臂电流间小信号传递关系满足

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{i}}_{\text{a}} = \mathbf{A}_{\text{d}} \hat{\mathbf{i}}_{\text{au}} \\ \hat{\mathbf{i}}_{\text{ca}} = \mathbf{A}_{\text{c}} \hat{\mathbf{i}}_{\text{au}} \\ \hat{\mathbf{i}}_{\text{dc}} = \mathbf{A}_{\text{c0}} \hat{\mathbf{i}}_{\text{au}} \end{cases} \quad (13)$$

式中： $\mathbf{A}_{\text{d}}$  为差模矩阵； $\mathbf{A}_{\text{c}}$  为共模矩阵； $\mathbf{A}_{\text{c0}}$  为共模零序矩阵。

联立式 (1) ~ (13)，推导得到 MMC 换流站直流阻抗和交流阻抗解析模型。

MMC 直流阻抗  $\mathbf{Y}_{\text{dc}}$  为从直流端口看向换流站的阻抗，含换流站所接入交流系统的影响，表达式为

$$\mathbf{Y}_{\text{dc}} = -\mathbf{A}_{\text{c0}} \left[ \mathbf{\Gamma}_1 \mathbf{G}_i \mathbf{A}_{\text{d}} + \mathbf{\Gamma}_1 \mathbf{G}_{\text{ic}} \mathbf{A}_{\text{c}} + \mathbf{\Gamma}_2 + (\mathbf{\Gamma}_1 \mathbf{G}_{\text{v}} + \mathbf{U}) \mathbf{Z}_{\text{sys}}^{\text{ac}} \mathbf{A}_{\text{d}} \right]^{-1} (\mathbf{\Gamma}_1 \mathbf{G}_{\text{vdc}} - \mathbf{U}/2) \quad (14)$$

式中： $\mathbf{Z}_{\text{sys}}^{\text{ac}}$  为换流站所接入的交流系统阻抗，反映交流系统阻抗对直流阻抗的耦合影响； $\mathbf{\Gamma}_1$ 、 $\mathbf{\Gamma}_2$  表示稳态工作点和桥臂电感对 MMC 端口阻抗的影响，表达式分别为

$$\begin{cases} \mathbf{\Gamma}_1 = \mathbf{m}_{\text{au}} \mathbf{Y}_{\text{Ceq}}^{-1} \mathbf{i}_{\text{au}} + \mathbf{v}_{\text{cau}} \\ \mathbf{\Gamma}_2 = \mathbf{m}_{\text{au}} \mathbf{Y}_{\text{Ceq}}^{-1} \mathbf{m}_{\text{au}} + \mathbf{Z}_{\text{Larm}} \end{cases} \quad (15)$$

MMC 交流阻抗  $\mathbf{Y}_{\text{ac}}$  为从交流端口看向换流站的阻抗，含换流站所接入直流系统的影响，表达式为

$$\mathbf{Y}_{\text{ac}} = \mathbf{A}_{\text{d}} \left[ \mathbf{\Gamma}_1 \mathbf{G}_i \mathbf{A}_{\text{d}} + \mathbf{\Gamma}_1 \mathbf{G}_{\text{ic}} \mathbf{A}_{\text{c}} + \mathbf{\Gamma}_2 + (\mathbf{U}/2 - \mathbf{\Gamma}_1 \mathbf{G}_{\text{vdc}}) \mathbf{Z}_{\text{sys}}^{\text{dc}} \mathbf{A}_{\text{c0}} \right]^{-1} (\mathbf{\Gamma}_1 \mathbf{G}_{\text{v}} + \mathbf{U}) \quad (16)$$

式中： $\mathbf{Z}_{\text{sys}}^{\text{dc}}$  为换流站所接入的直流系统阻抗，反映交流系统阻抗对直流阻抗的耦合影响。由图 1 可知，对于任一换流站，其直流系统阻抗受直流电网、其余端换流站以及相应接入交流系统的影响。

#### 3.2 交直流系统阻抗网络聚合建模

针对复杂网架结构，本节将建立交直流系统阻抗网络聚合模型，以向更复杂系统建模推广。

对于任意交流系统和直流系统均采用  $N$  节点导纳网络表示，如图 10 所示。以任一换流站为例，将该目标换流站编号为节点 0，其余端换流站依次编号。 $h$  号节点对地支路导纳用  $\mathbf{Y}_{hG}$  表示， $h$  号节点与  $i$  号节点之间支路导纳用  $\mathbf{Y}_{hi}$  表示。

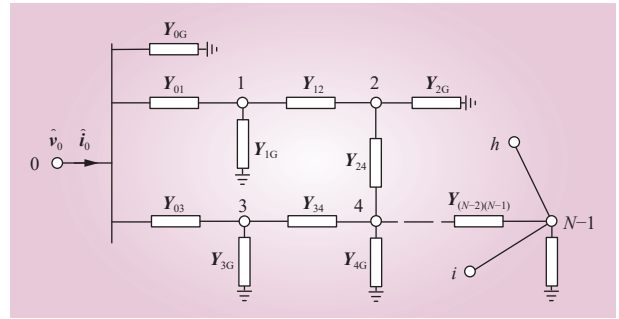


图 10 节点导纳网络

Fig. 10 Node admittance network

由此，建立  $N$  节点网络电压方程

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{00} & \mathbf{Y}_{0m}^T \\ \mathbf{Y}_{0m} & \mathbf{Y}_{\text{net}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{v}}_0 \\ \hat{\mathbf{v}}_{\text{net}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{i}}_0 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中： $\hat{\mathbf{v}}_0$ 、 $\hat{\mathbf{i}}_0$  分别为目标换流站电压、电流小信号， $\hat{\mathbf{v}}_{\text{net}}$  为除 0 号节点外其他节点电压矩阵； $\mathbf{Y}_{00}$  为 0 号节点所有支路导纳之和； $\mathbf{Y}_{0m}$  为 0 号节点与其他节点间导纳矩阵； $\mathbf{Y}_{\text{net}}$  为其他节点导纳矩阵。

$\mathbf{Y}_{0m}$  表达式为

$$\mathbf{Y}_{0m} = [-\mathbf{Y}_{01} \quad -\mathbf{Y}_{02} \quad \cdots \quad -\mathbf{Y}_{0(N-1)}]^T \quad (18)$$

$\mathbf{Y}_{\text{net}}$  表达式为

$$\mathbf{Y}_{\text{net}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{11} & -\mathbf{Y}_{12} & \cdots & -\mathbf{Y}_{1(N-1)} \\ -\mathbf{Y}_{21} & \mathbf{Y}_{22} & \cdots & -\mathbf{Y}_{2(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\mathbf{Y}_{(N-1)1} & -\mathbf{Y}_{(N-1)2} & \cdots & \mathbf{Y}_{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中：主对角元素  $\mathbf{Y}_{hh}$  为  $h$  号节点所有支路导纳之和，即

$$\mathbf{Y}_{hh} = \mathbf{Y}_{hG} + \sum_{i=0}^{h-1} \mathbf{Y}_{hi} + \sum_{i=h+1}^{N-1} \mathbf{Y}_{hi} \quad (20)$$

由式 (17) 可以推导得到目标换流站看向交流系统或者直流系统的导纳矩阵  $Y_{sys}$  为

$$Y_{sys} = \hat{i}_0 / \hat{v}_0 = Y_{00} - Y_{0m}^T Y_{net}^{-1} Y_{0m} \quad (21)$$

### 3.3 多断面通用化阻抗建模

结合 MMC 阻抗和交直流系统阻抗聚合建模, 建立计及多端耦合的 MMC-MTDC 任意断面通用化阻抗模型。

以孤岛新能源系统为例, 为分析系统稳定性, 首先要得到该目标换流站交流阻抗, 如图 11 所示。

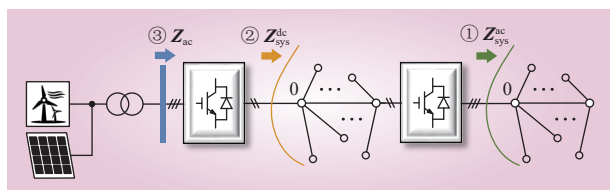


图 11 孤岛新能源系统直流送端交流阻抗构成  
Fig. 11 The structure of AC impedance of MMC in islanded renewable energy system

目标换流站通用化阻抗建模思路如下。

1) 根据式 (21) 分别建立除目标换流站外各端换流站所接入的交流系统阻抗  $Z_{sys}^{ac}$ ;

2) 将  $Z_{sys}^{ac}$  代入式 (14) 中分别得到每一端换流站的直流导纳  $Y_{dc}$ , 连同直流线路导纳一起构成节点导纳矩阵, 结合式 (21), 计算得到目标换流站直流系统阻抗  $Z_{sys}^{dc}$ ;

3) 将  $Z_{sys}^{dc}$  代入式 (16) 中, 建立目标换流站交流导纳模型  $Y_{ac}$ , 由此得到交流阻抗解析模型  $Z_{ac} = Y_{ac}^{-1}$ 。

交流阻抗解析模型  $Z_{ac}$  为  $(2g+1) \times (2g+1)$  矩阵, 反映的是目标换流站不同频率电压、电流间的耦合响应关系。由电力电子装置所构成的系统, 阻抗交互的主要元素为

$$\begin{bmatrix} Z_{pp} & Z_{pn} \\ Z_{np} & Z_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{ac}(g+1, g+1) & Z_{ac}(g+1, g-1) \\ Z_{ac}(g-1, g+1) & Z_{ac}(g-1, g-1) \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中:  $Z_{pp}$  为正序阻抗;  $Z_{pn}$  为正序耦合阻抗;  $Z_{nn}$  为负序阻抗;  $Z_{np}$  为负序耦合阻抗。

根据通用化建模思路, 可以建立计及正负序控制、多端耦合的 MMC-MTDC 任意断面阻抗模型。

## 4 MMC-MTDC 耦合影响分析

为验证计及正负序控制 MMC-MTDC 阻抗模型的正确性以及多端耦合影响, 以图 12 所示三端 MMC-MTDC 环网系统为例, 开展仿真验证。直流电压为  $\pm 320$  kV, 1#孤岛新能源系统 MMC (记为 1#孤岛站) 容量为  $500$  MV·A, 2#孤岛新能源系统 MMC (记为 2#孤岛站) 容量为  $500$  MV·A,  $V_{dc}$  模式联网系统 MMC (记为联网站) 容量为  $1000$  MV·A, 所接入交流电网短路比  $R_{sc}=5.0$ 。

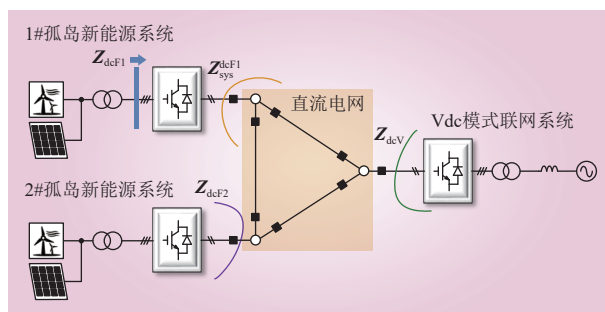


图 12 三端 MMC-MTDC 环网系统  
Fig. 12 Three-terminal MMC-MTDC ring system

### 4.1 多端耦合影响分析

首先分析不同换流站之间阻抗耦合影响。基于所建立的阻抗解析模型, 图 13 给出了 2# 孤岛新能源系统对 1# 孤岛站交流阻抗特性的耦合影响。由图 13 可知, 考虑 2# 孤岛新能源场站阻抗特性影响前后, 1# 孤岛站基频附近交流正序阻抗和负序阻抗特性均存在明显差别, 表明不同换流站之间阻抗特性存在耦合, 并且换流站所接入的新能源场站动态特性会对其他端换流站交流系统稳定性产生耦合影响。

图 14 给出了联网站电网强度对 1# 孤岛站交流阻抗特性的影响。由图 14 可知, 联网站电网强度变化主要对 1# 孤岛站基频附近及超同步频段阻抗特性产生耦合影响, 并会影响孤岛新能源系统稳定性。

上述研究表明, 孤岛站与联网站之间、不同孤岛站之间阻抗特性存在耦合影响, 进一步验证了计及多端耦合影响阻抗建模的重要性。

### 4.2 正负序控制影响分析

图 15 给出了考虑正负序控制前后 1# 孤岛站交流阻抗对比结果。由图 15 可知, 2 种情况下交流阻抗特性在宽频范围内均存在明显差异。采用正

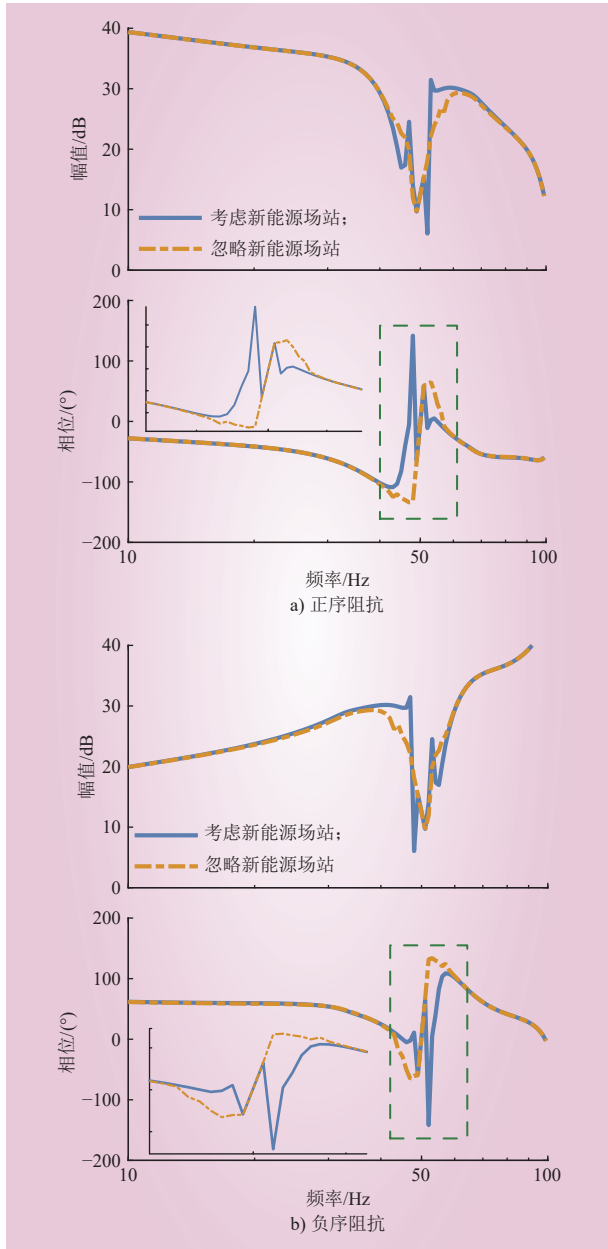


图 13 2#孤岛新能源系统对1#孤岛站交流阻抗耦合影响  
 Fig. 13 Influence of 2# renewable energy system on the AC impedance of 1# islanded converter station

负序控制后，交流阻抗出现多个谐振峰，表明正负序控制对阻抗特性影响显著，验证了计及正负序控制阻抗建模的必要性。

图 16 给出了联网站正负序控制对1#孤岛站交流阻抗影响分析。由图 16 可知，在联网站采用正负序控制和仅采用正序控制 2 种情况下，1#孤岛站交流阻抗基频附近阻抗特性存在差异，表明联网站正负序控制将会影响孤岛系统的稳定性。

上述研究表明，MMC 阻抗特性除受自身换流

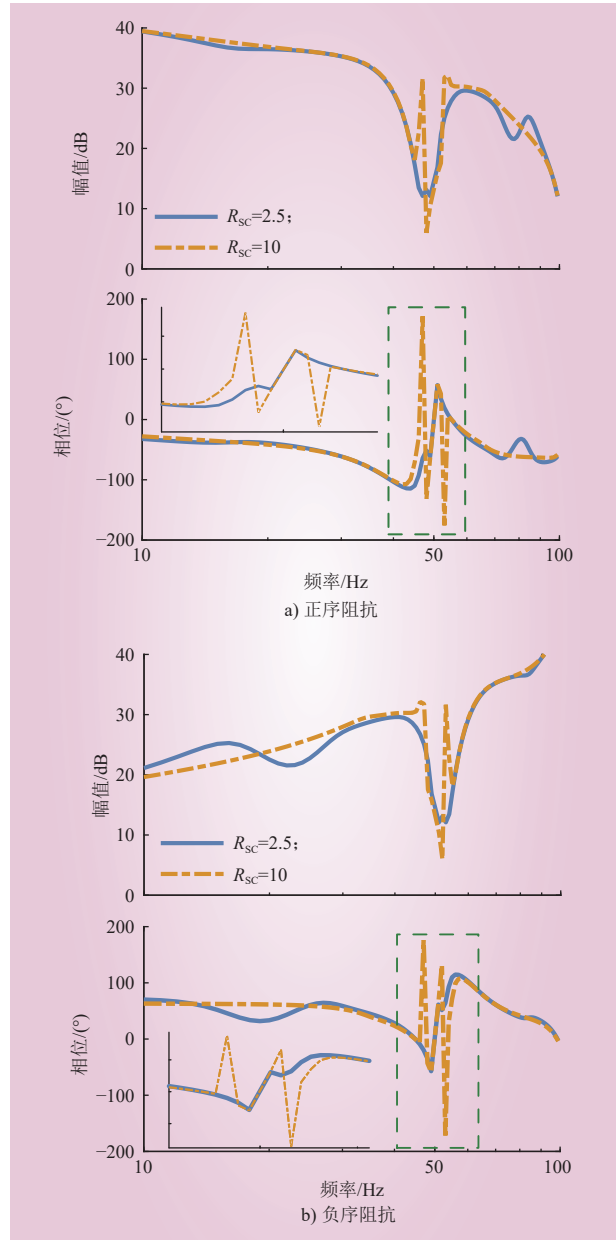


图 14 联网站电网强度对1#孤岛站交流阻抗耦合影响  
 Fig. 14 Influence of grid strength of grid-connected station on AC impedance of 1# islanded converter station

站正负序控制影响外，同时还受其他端换流站正负序控制的耦合影响。

#### 4.3 耦合影响频段分析

基于阻抗解析模型和 4.1、4.2 节分析可知，在 MMC-MTDC 系统中，与仅采用正序控制相比，目标端换流站正负序控制对其交流阻抗宽频范围内阻抗均产生重要影响。换流站与换流站之间的多端耦合影响主要影响基频附近次超同步频段阻抗特性。其他端换流站的正负序控制及电网强度影响目标换流站基频附近阻抗特性。由于基

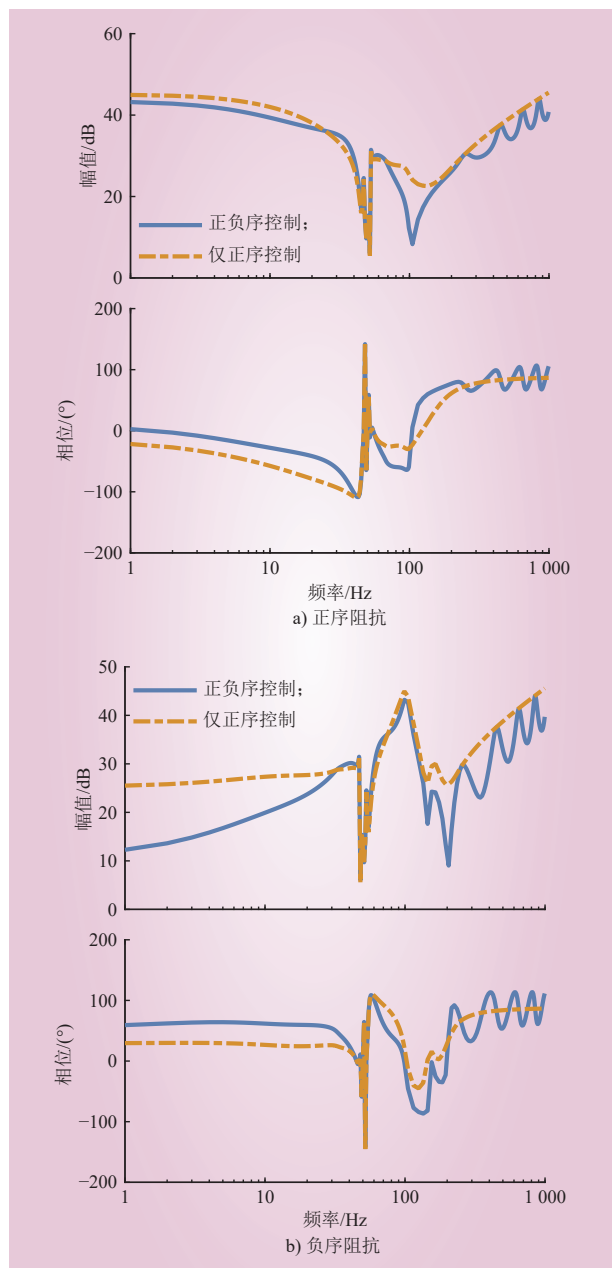


图 15 考虑正负序控制前后 1#孤岛站交流阻抗对比  
Fig. 15 Comparison of AC impedance of 1# islanded converter station before and after adopting positive and negative control

频附近为振荡风险高发频段，所以多端耦合影响在振荡风险评估定位时不容忽视，并且各端换流站的正负序控制设计不当会加剧系统振荡风险。

## 5 模型验证

### 5.1 孤岛站交流阻抗模型校核

为建立 1#孤岛站交流阻抗模型，首先根据

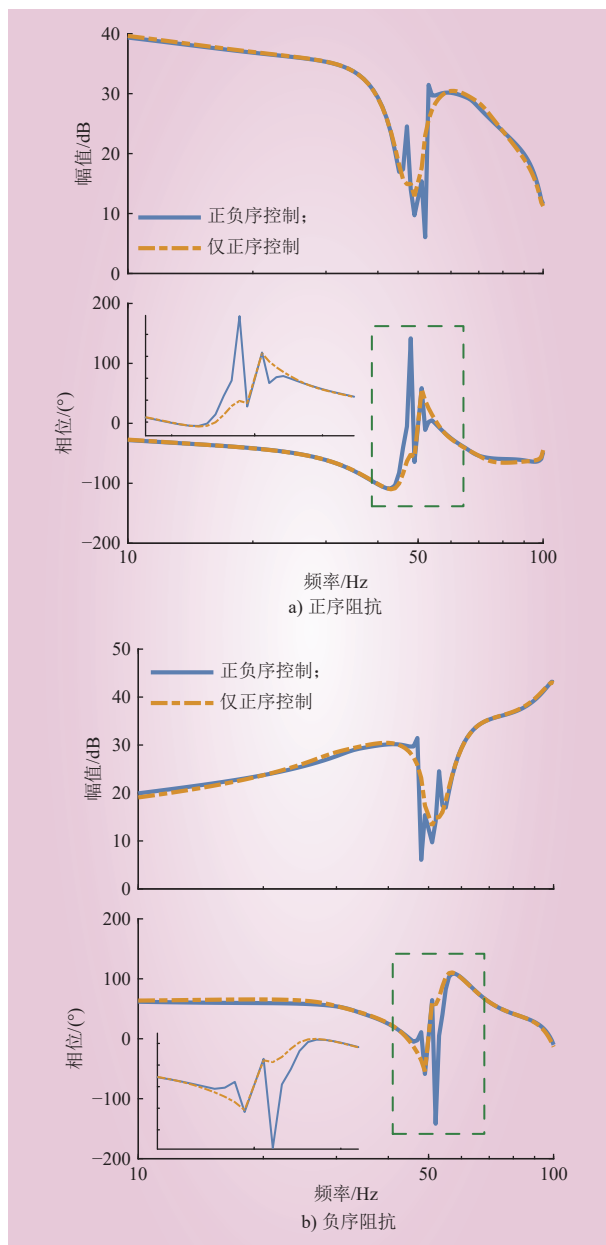


图 16 联网站正负序控制对 1#孤岛站交流阻抗影响  
Fig. 16 Influence of positive- and negative-sequence control of grid-connected station on AC impedance of 1# islanded converter station

2#孤岛站和联网站交流系统阻抗，结合式（14），分别计算得到 2#孤岛站直流阻抗  $Z_{dcF2}$  和联网站直流阻抗  $Z_{dcV}$  解析结果。2#孤岛站交流系统阻抗为新能源场站阻抗，联网站交流系统阻抗为交流电网阻抗。

2#孤岛站和联网站直流阻抗的解析与仿真结果如图 17 所示，其中实线为解析结果，离散点为仿真结果。由图可知，两个换流站直流阻抗解析结果与仿真结果高度吻合，验证了直流阻抗解析

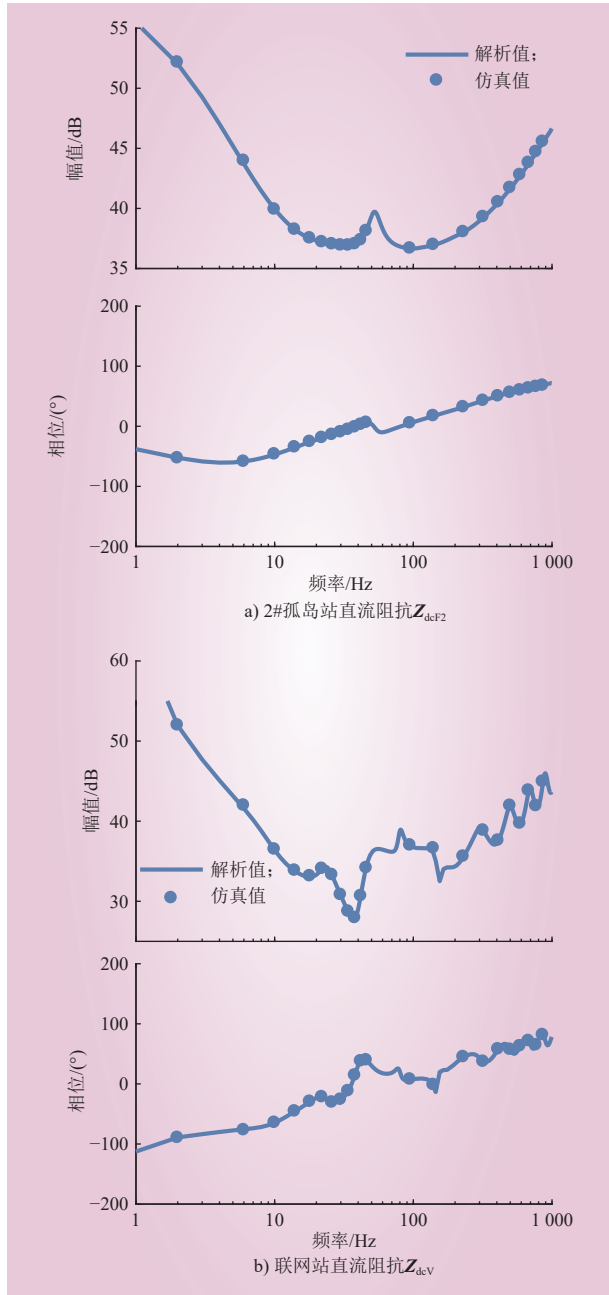


图 17 MMC 直流阻抗模型校核 Bode 图  
Fig. 17 Bode diagram of MMC DC impedance model verification

模型的正确性。

随着频率逐渐增大，2#孤岛站和联网站直流阻抗幅值总体上先减小后增大，相位特性在基频以下呈容性，基频以上呈感性。由于两个换流站外环控制不同，直流阻抗存在差异，联网站直流阻抗中高频段出现多个谐振峰。

然后，结合上述两个换流站直流阻抗模型，构建三端 MMC-MTDC 直流系统节点导纳网络。

根据式 (19) ~ (21)，代入  $Z_{dcV}$ 、 $Z_{dcF2}$  及直流线路参数，计算得到 1# 孤岛站接入的直流系统阻抗  $Z_{sys}^{dcF1}$  解析结果。直流系统阻抗校核结果如图 18 所示。由图 18 可知，直流系统阻抗解析结果与仿真结果吻合良好，验证了 3.2 节阻抗网络聚合建模方法的正确性。

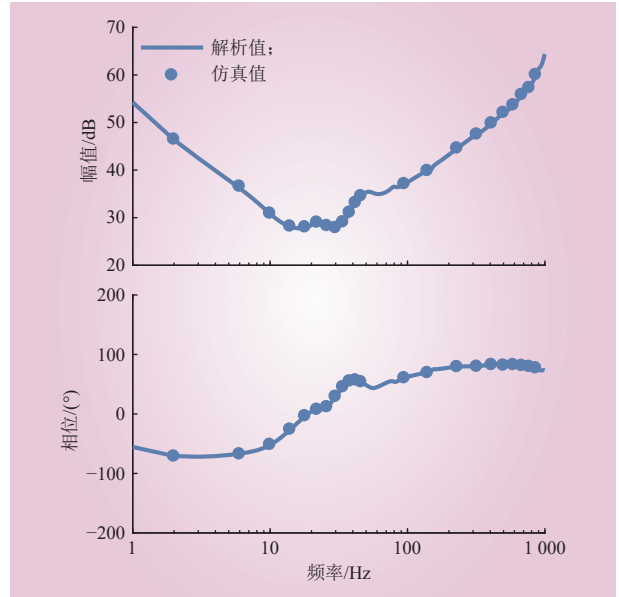


图 18 1# 孤岛站接入的直流系统阻抗校核 Bode 图  
Fig. 18 Impedance verification Bode diagram of DC system connected to 1# station

最后，将 1# 孤岛站直流系统阻抗  $Z_{sys}^{dcF1}$  代入式 (16) 中，并结合式 (22) 得到 1# 孤岛站交流正负序频率耦合阻抗模型，校核结果如图 19 所示。由图 19 可知，1# 孤岛站正序阻抗  $Z_{pp}^{acF1}$ 、正序耦合阻抗  $Z_{np}^{acF1}$ 、负序阻抗  $Z_{nn}^{acF1}$ 、负序耦合阻抗  $Z_{pn}^{acF1}$  4 条阻抗解析曲线分别与仿真扫描离散点均吻合良好，充分验证了计及正负序控制、多端耦合影响的阻抗解析模型的正确性。

### 5.2 联网站交流阻抗模型校核

为验证本文所提多断面通用化阻抗解析模型的有效性，本节对联网站开展阻抗模型校核。

图 20 给出了联网站交流正负序频率耦合阻抗模型校核结果。由图 20 可知，考虑 2 个孤岛站、直流电网影响，联网站正序、负序及耦合阻抗解析结果均分别与仿真扫描离散点吻合一致，验证了所提多断面通用化阻抗建模的有效性及其准确性。

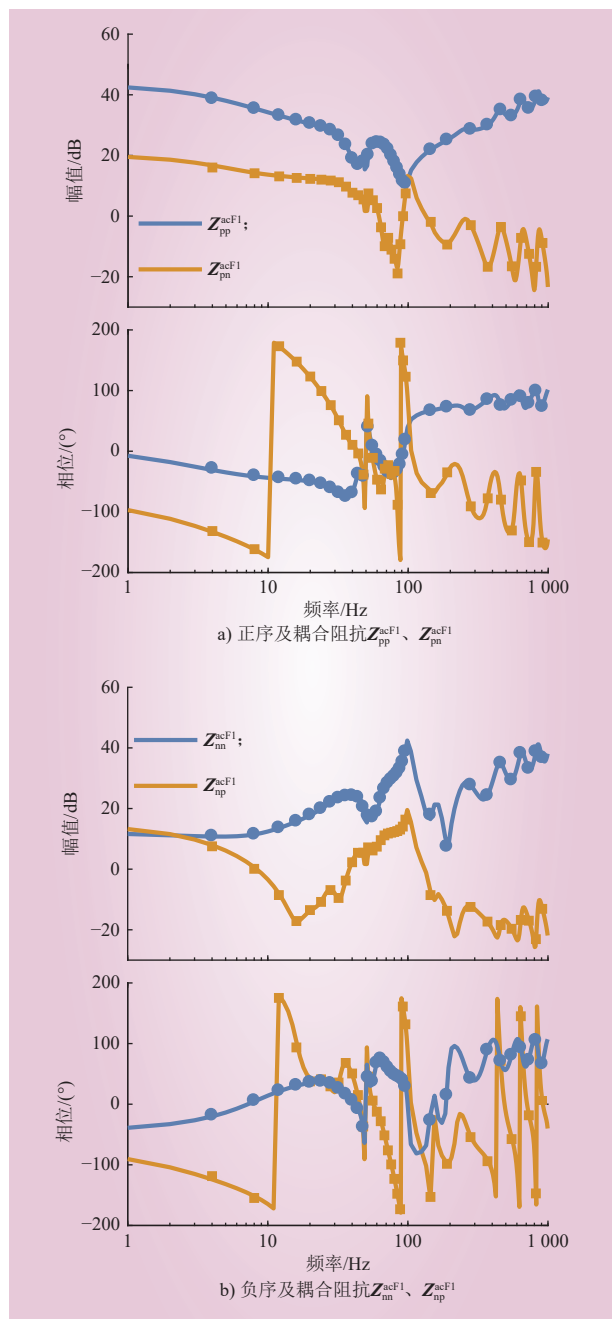


图 19 1#孤岛站交流阻抗校核 Bode 图

Fig. 19 AC impedance verification Bode diagram of 1# islanded converter station

## 6 结论

针对 MMC-MTDC 不同换流站多样化控制、换流站间强非线性耦合特征，本文基于控制环节模块化建模思路，提出了计及正负序控制、多端耦合的 MMC-MTDC 通用化阻抗建模方法，开展了仿真验证，并分析了不同换流站阻抗耦合影响，得到以下结论。

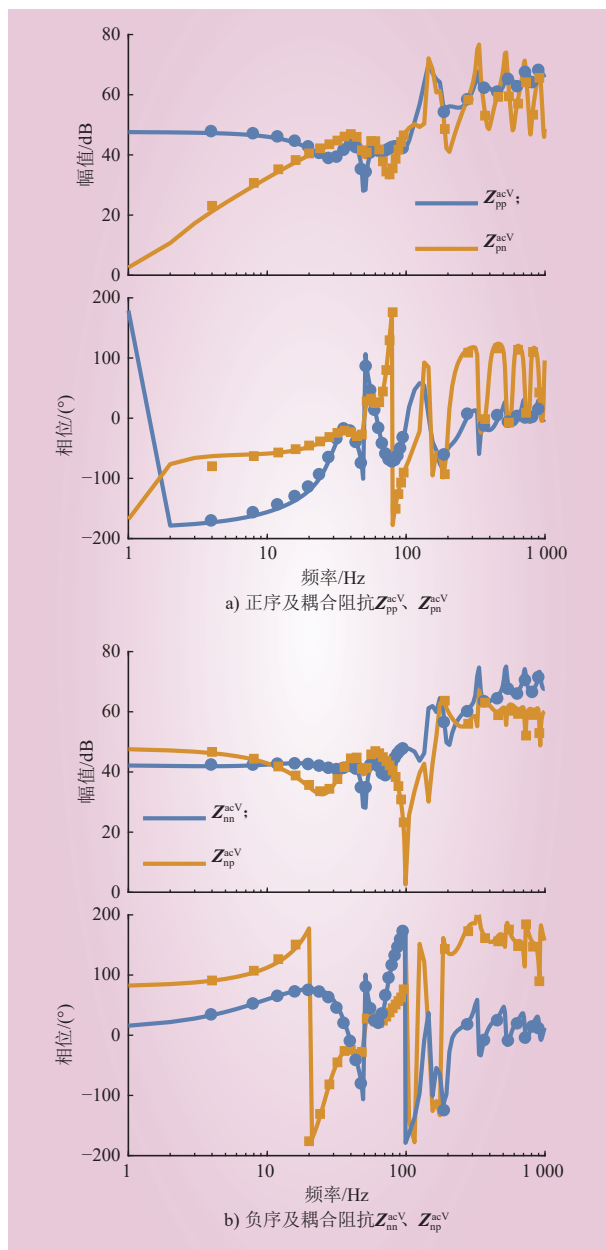


图 20 联网站交流阻抗校核 Bode 图

Fig. 20 AC impedance verification Bode diagram of grid-connected converter station

1) 所提计及正负序控制、多端耦合的通用化阻抗建模方法适用于获取 MMC-MTDC 交、直流不同断面阻抗模型，提高了模型精度，为系统稳定性分析提供基础。

2) MMC-MTDC 直流电网为跨区交流系统阻抗耦合提供通路。新能源基地经 MMC-MTDC 送出系统稳定性受其他端换流站新能源场站动态特性以及交流电网强度交互影响。

3) 正负序控制对 MMC-MTDC 阻抗特性及稳

定性产生重要影响。MMC阻抗特性除受自身换流站正负序控制影响外，同时还受其他端换流站正负序控制的耦合影响。

在未来柔性直流电网构建中，多端跨区耦合影响不容忽视，各端换流站控制设计需兼顾本地电源或负荷特性与其余端换流站控制特性、电网强度及新能源接入情况的影响。下一步，将基于本文所建通用化阻抗模型，重点分析不同断面高发振荡风险频段、主导因素以及不同断面振荡风险差异来源。

### 参考文献：

- [1] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760–1771.  
TANG Guangfu, PANG Hui, HE Zhiyuan. R&D and application of advanced power transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760–1771.
- [2] 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.
- [3] 赵成勇, 宋冰倩, 许建中. 柔性直流电网故障电流主动控制典型方案综述[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 3–13.  
ZHAO Chengyong, SONG Bingqian, XU Jianzhong. Overview on typical schemes for active control of fault current in flexible DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 3–13.
- [4] 刘昕宇, 王国腾, 徐政, 等. 含 MMC 的交直流输电系统短路电流统一求解方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 184–189.  
LIU Xinyu, WANG Guoteng, XU Zheng, et al. Unified solution method of short circuit current for AC/DC transmission system with MMC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 184–189.
- [5] 辛保安, 郭铭群, 王绍武, 等. 适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 1–8.  
XIN Baoan, GUO Mingqun, WANG Shaowu, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large-scale renewable energy and their engineering practice[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 1–8.
- [6] 刘昊宇, 刘崇茹, 蒋思雯. 多端柔性直流输电系统动态附加频率控制策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(1): 164–170.  
LIU Haoyu, LIU Chongru, JIANG Siwen. Dynamic additional frequency control strategy for VSC-MTDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 164–170.
- [7] 付强, 杜文娟, 王海风. 多端柔性直流输电控制引发的开环模式谐振及其传播[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4379–4389, 4638.  
FU Qiang, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Open-loop modal resonance and propagation of VSC-MTDC with different control[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4379–4389, 4638.
- [8] WANG W S, LI G H, GUO J B. Large-scale renewable energy transmission by HVDC: challenges and proposals[J]. Engineering, 2022, 19: 252–267.
- [9] 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.
- [10] 刘涛, 李婧靓, 李明, 等. 南方电网鲁西背靠背直流异步联网工程控制保护系统设计方案[J]. 南方电网技术, 2014, 8(6): 18–22.  
LIU Tao, LI Jingjing, LI Ming, et al. Control and protection system design of Luxi back-to-back asynchronous interconnection HVDC project of China southern power grid[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(6): 18–22.
- [11] 赵峥, 李明, 田园园, 等. 江苏如东海上风电柔直工程系统谐振分析与抑制[J]. 电力建设, 2023, 44(6): 144–152.  
ZHAO Zheng, LI Ming, TIAN Yuanyuan, et al. Resonance analysis and suppression in Jiangsu Rudong offshore wind power flexible DC system[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(6): 144–152.
- [12] 马宁宁, 谢小荣, 贺静波, 等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4720–4732.  
MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720–4732.
- [13] LIU H K, XIE X R, HE J B, et al. Subsynchronous interaction between direct-drive PMSG based wind farms and weak AC networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6):

- 4708–4720.
- [14] 朱廷猛, 孙海顺, 秦世耀, 等. 弱电网下双馈风机并网系统的次同步振荡研究[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1641–1648.
- ZHU Tingmeng, SUN Haishun, QIN Shiyao, *et al.* Sub-synchronous oscillation in DFIG system connected to weak grid[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(5): 1641–1648.
- [15] 官泽旭, 艾力西尔·亚尔买买提, 辛焕海, 等. 新能源电力系统并网设备小扰动稳定分析(二): 导出机理与稳定性分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5126–5140.
- GONG Zexu, YAERMAIMAITI Ailixier, XIN Huanhai, *et al.* Small signal stability analysis of grid-connected equipment in power system(part II): discussion on mechanism derivation and classification of stability[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(14): 5126–5140.
- [16] 陈新, 王贇程, 龚春英, 等. 采用阻抗分析方法的并网逆变器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2082–2094, 2223.
- CHEN Xin, WANG Yuncheng, GONG Chunying, *et al.* Overview of stability research for grid-connected inverters based on impedance analysis method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(7): 2082–2094, 2223.
- [17] 刘斌, 呼斯乐, 王甲军, 等. 直驱风电场经 LCC-HVDC 外送系统阻抗建模及振荡机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(10): 3492–3504, 3674.
- LIU Bin, HU Sile, WANG Jiajun, *et al.* Impedance modeling and oscillation mechanism analysis of D-PMSG-based wind farms integration through LCC-HVDC system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(10): 3492–3504, 3674.
- [18] 伍文华, 周乐明, 陈燕东, 等. 序阻抗视角下虚拟同步发电机与传统并网逆变器的稳定性对比分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1411–1421.
- WU Wenhua, ZHOU Leming, CHEN Yandong, *et al.* Stability comparison and analysis between the virtual synchronous generator and the traditional grid-connected inverter in the view of sequence impedance[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(5): 1411–1421.
- [19] SUN J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 26(11): 3075–3078.
- [20] SUN J, LIU H C. Sequence impedance modeling of modular multilevel converters[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2017, 5(4): 1427–1443.
- [21] 杜程茂, 杜雄, 邹小明, 等. 考虑频率耦合效应的并网模块化多电平变流器阻抗建模及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2866–2877.
- DU Chengmao, DU Xiong, ZOU Xiaoming, *et al.* Impedance modeling and stability analysis of grid-connected modular multilevel converter considering frequency coupling effect[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(9): 2866–2877.
- [22] 年珩, 朱茂玮, 徐韵扬, 等. 基于谐波传递矩阵的 MMC 换流站频率耦合特性建模与分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(6): 75–83.
- NIAN Heng, ZHU Maowei, XU Yunyang, *et al.* Modeling and analysis of frequency coupling characteristic for MMC station based on harmonic transfer matrices[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(6): 75–83.
- [23] WU H, WANG X F. Dynamic impact of zero-sequence circulating current on modular multilevel converters: complex-valued AC impedance modeling and analysis[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2020, 8(2): 1947–1963.
- [24] 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.
- [25] 黄通, 陈新, 张东辉, 等. 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[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(23): 8987–8999.
- HUANG Tong, CHEN Xin, ZHANG Donghui, *et al.* MMC-HVDC integrated system stability analysis and impedance optimization method with consideration of voltage feed-forward control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(23): 8987–8999.
- [26] LYU J, ZHANG X, CAI X, *et al.* Harmonic state-space based small-signal impedance modeling of a modular multilevel converter with consideration of internal harmonic dynamics[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(3): 2134–2148.
- [27] YIN T Y, WANG Y, SUN J, *et al.* Impedance-based characterization of positive-negative sequence separation and its effects on MMC-HVDC stability[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2022, 10(4): 4395–4412.
- [28] 尹太元, 王跃, 王晓雷, 等. 正负序电流环对柔直系统交流阻抗波动

特性影响机理分析[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(10): 149–158.

YIN Taiyuan, WANG Yue, WANG Xiaolei, *et al.* Analysis of influence mechanism of positive-negative sequence current control loops on AC impedance fluctuation characteristics of HVDC system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(10): 149–158.

[29] JI K, TANG G F, YANG J, *et al.* Harmonic stability analysis of MMC-based DC system using DC impedance model[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2020, 8(2): 1152–1163.

[30] JI K, PANG H, YANG J, *et al.* DC side harmonic resonance analysis of MMC-HVDC considering wind farm integration[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021, 36(1): 254–266.

[31] JI K, TANG G F, PANG H, *et al.* Impedance modeling and analysis of MMC-HVDC for offshore wind farm integration[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020, 35(3): 1488–1501.



周国梁

#### 作者简介：

周国梁（1980），通信作者，男，博士，高级工程师（教授级），从事直流输电及新能源发电研究，E-mail: [zhouguoliang@csepedi.com](mailto:zhouguoliang@csepedi.com);

高丽萍（1982），女，硕士，从事新能源发电与直流输电宽频振荡建模、分析与控制，E-mail: [gaoliping@epri.sgcc.com.cn](mailto:gaoliping@epri.sgcc.com.cn);

[epri.sgcc.com.cn](mailto:epri.sgcc.com.cn);

梁言桥（1965），男，高级工程师（教授级），从事直流输变电工程设计及管理研究，E-mail: [liangyanqiao@csepedi.com](mailto:liangyanqiao@csepedi.com);

李文津（1984），男，博士，工程师，从事柔性直流及其在新能源并网中应用研究，E-mail: [178465272@qq.com](mailto:178465272@qq.com).

（责任编辑 许晓艳）

## Multi-terminal Heterogeneous Generalized Impedance Modeling and Analysis of MMC-MTDC Transmission Systems

ZHOU Guoliang<sup>1</sup>, GAO Liping<sup>2</sup>, LIANG Yanqiao<sup>1</sup>, LI Wenjin<sup>1</sup>, WANG Xin<sup>1</sup>

(1. China Power Engineering Consultant Group Zhongnan Electric Power Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430061, China; 2. National Key Laboratory of Renewable Energy Grid-Integration (China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China)

**Abstract:** The prominent risks of broadband oscillation among renewable energy, modular multilevel converter-based multi-terminal high voltage direct current (MMC-MTDC) and AC grid severely constrain the safe and stable operation and efficient accommodation of renewable energy. The control strategies of different converter stations of MMC-MTDC are various such as constant AC voltage, constant DC voltage and constant power control, and there is a strong nonlinear coupling between the multi-terminal converter stations, which brings challenges to the modeling and analysis of the system oscillation. Therefore, a modular modeling method of MMC-MTDC control system considering positive- sequence and negative-sequence control is firstly proposed in this paper. And then, aiming to the complex AC and DC grid structures, a generalized impedance model of different sections of MMC-MTDC is established with the multi-terminal nonlinear coupling considered. Finally, taking the three-terminal MMC-MTDC ring network as an example, simulation is conducted to verify the accuracy and validity of the generalized impedance model. The coupling effects of the multi-terminal interconnection system and the positive-sequence control and negative-sequence control on the impedance characteristics are analyzed, which will provide a basis for the oscillation analysis of renewable energy base connected into MMC-MTDC interconnection system.

This work is supported by China Electric Power Engineering Consulting Group Technology Project (Research on Broadband Resonance Mechanism and Suppression Scheme of Flexible DC Transmission System in Offshore Wind Farm, No.DG2-D03-2022), Science and Technology Project of SGCC (Research on Grid-Forming Topology and Operation Control Technology of 100% Renewable Energy Generation Base Connected into Diode Rectifier, No.5108-202218280A-2-307-XG).

**Keywords:** MMC-MTDC; generalized impedance model; broadband oscillation; positive- and negative- sequence control; multi-terminal coupling