

# 海上风电直流汇集系统阻抗建模及振荡特性分析

李彧野, 王伟胜, 何国庆

(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), 北京市 海淀区 100192)

## Impedance Modeling and Oscillation Characteristics Analysis of Offshore Wind Power DC Collection System

LI Yuye, WANG Weisheng, HE Guoqing

(National Key Laboratory of Renewable Energy Grid-integration (China Electric Power Research Institute),  
Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** The offshore wind power DC collection and transmission method has the advantages of avoiding reactive power charging and overvoltage issues caused by AC cables and the like, which will be the main development technique in the future. Different from modular multilevel converter-based high voltage DC (MMC-HVDC), offshore wind power DC collection and transmission system connects the wind power and the onshore MMC by the low and high ports of DC transformer (DCT), the broadband oscillation of which is unclear. So, impedance modeling and oscillation analysis of offshore wind power DC collection and transmission systems are needed. In this paper, the impedance models of system collection and transmission port voltage ports were first established, considering the effects of the onshore MMC on the collection port and the offshore wind power on the transmission port. Then, the impedance small signal coupling pathway which were quantitatively characterized, the dominant influencing factors of the negative damping characteristics were revealed, and the oscillation risks were analyzed. Finally, the electromagnetic transient platform of offshore wind power DC collection and transmission system was built based on Matlab/Simulink, and the simulation experiment verified the accuracy of the ports oscillation analysis, and it was found that the impedance coupling characteristics will affect the oscillation analysis results of the offshore wind power DC collection and transmission system.

**KEY WORDS:** offshore wind power; DCT; board band oscillation; impedance modeling; oscillation analysis

**摘要:**海上风电直流汇集方式具有可避免交流电缆无功充电和过电压问题等优势,是未来主要发展方向之一。与柔性直流(modular multilevel converter based high voltage DC current, MMC-HVDC)不同,其通过直流变压器(DC

transformer, DCT)低、高压端口实现海上风电发电侧与岸上MMC送出侧互联,系统的宽频振荡风险尚不明确,亟须开展阻抗建模及振荡特性分析。首先分别建立了计及岸上MMC对汇集端口耦合与海上风电对送出端口耦合的海上风电汇集系统阻抗模型;然后定量刻画了汇集和送出端口的小信号耦合通路,揭示了端口负阻尼特性主导影响因素,并分析了振荡风险;最后,基于Matlab/Simulink构建海上风电直流汇集系统电磁暂态仿真平台,仿真实验验证了汇集和送出端口振荡分析的准确性,发现耦合特性将影响海上风电直流汇集送出系统振荡分析结果。

**关键词:**海上风电;直流变压器;宽频振荡;阻抗建模;振荡分析

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0144

## 0 引言

在“双碳”目标驱动下,我国海上风电发展提速<sup>[1-3]</sup>。海上风电可通过交流、柔性直流和分频输电等多种方式汇集送出。近年来,直流汇集送出方式因其可避免海底电缆无功充电和过电压问题,得到了广泛关注,具有良好的应用前景<sup>[4-8]</sup>。

海上风电并网系统存在振荡问题,德国的北海Borwin1,我国的南澳和南汇海上风电经柔性直流送出工程出现了不同频率的交直流振荡,影响了系统的安全稳定<sup>[9-11]</sup>。阻抗法物理意义清晰,被广泛应用于分析和解决海上风电振荡问题<sup>[12-15]</sup>。研究表明,海上风电振荡与模块化多电平变换器(modular multilevel converter, MMC)等电力电子设备之间以及与系统内无源设备之间的交互作用有关。

目前主要研究的海上风电经柔直送出方式通过交流变压器实现风电的升压汇集,接入海上MMC;而直流汇集送出方式则是通过直流变压器(DC transformer, DCT)实现风电的升压汇集<sup>[16-17]</sup>,其相关建模和振荡研究还较少。2种方式的区别在

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(4000-202255285A-2-0-QZ)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (4000-202255285A-2-0-QZ).

于风电交、直流汇集方式的不同以及系统内电力电子设备拓扑和控制的差异，主要体现在 DCT 和海上 MMC。因此，为分析海上风电直流汇集系统的振荡问题，DCT 的阻抗建模是关键。

文献[18]推导了双输入双向有源桥 DCT 的阻抗模型，双 PI 控制模式会导致其高频段阻抗呈现谐振峰。文献[19-20]推导了双向 Boost 结构 DCT 的阻抗模型，其阻抗在固有频率以下呈感性，固有频率以上呈容性。文献[21]推导了两级 Buck 结构 DCT 的阻抗模型，前级变换器在中高频段呈现感性负阻尼特性，与滤波装置和后级恒功率负载作用导致振荡。文献[22]推导了双向 buck-boost 结构 DCT 的阻抗模型，其中频段呈现感性负阻尼特性，与光伏 DCT 和移相全桥 DCT 作用导致振荡。文献[23]推导了考虑孤岛检测的光伏发电单元 DCT 的阻抗模型，减小电压外环带宽会降低其中频段的阻抗幅值，使其易与直流电网作用导致振荡。文献[24]推导了独立输入、串联输出型级联 DCT 的阻抗模型，当工作在过电压调节模式时，其阻抗在中高频段呈现感性负阻尼特性，与光伏汇集系统作用导致振荡。

上述 DCT 主要适用于直流电源系统、直流微网和光伏汇集系统等场景，电压等级和容量较低，拓扑与控制与海上风电 DCT 差异较大，阻抗特性不一致。

海上风电 DCT 需要适应大容量高电压等级，因此通常采取电力电子级联方式实现，包括输入并联输出串联型拓扑和 MMC 拓扑等<sup>[17]</sup>。文献[25]提出一种基于移相多重化调制策略的 DCT 拓扑，低压侧并联若干组 MMC，交流侧通过中频变压器升压，再通过若干台不控整流桥直流端口串联实现电压抬升。文献[26]提出面对面 MMC 的结构，2 个 MMC 的交流侧通过变压器连接，低压端口 MMC 交流电压通过变压器升压再由高压端口 MMC 转换为直流。文献[27]提出 T 型 MMC 拓扑结构的 DCT，通过协调控制 T 型连接的三组桥臂，实现直流升压，如图 1 所示。该拓扑通过桥臂复用，省去中频交流变压器和桥臂子模块，节约了成本，具有体积小和重量小和经济性强等优势，工程应用价值较高，因此本文选取该拓扑作为海上风电 DCT。

目前关于 MMC 建模方面的研究主要针对柔直 MMC 和静止无功发生器(static var generator, SVG)<sup>[28-30]</sup>，其拓扑结构及控制与 T 型 DCT 区别较大，阻抗特性也不一致。相对而言，T 型结构三组桥臂之间不对称，且控制相互耦合，阻抗建模难度更大，具体如下：

1) T 型 DCT 三组桥臂之间不存在相间或者上下桥臂对称关系，电气部分的小信号建模比柔直 MMC 和 SVG 更为复杂<sup>[30-31]</sup>。

2) T 型 DCT 实现“直-交-直”转换，连接点处由中间桥臂控制交流电压，并参与高低压桥臂的控制<sup>[27]</sup>，使得三组控制相耦合，控制部分建模难度大。

综上所述，目前海上风电 DCT 的研究主要关注其拓扑、控制策略以及升压功能的实现，而关于含 DCT 的海上风电直流汇集系统的阻抗建模以及振荡分析研究还较少。为了保障海上风电直流汇集系统的安全稳定运行，有必要开展阻抗建模和振荡分析工作。

本文首先分别建立了计及岸上 MMC 对汇集端口耦合与海上风电对送出端口耦合的海上风电汇集系统阻抗模型；然后定量刻画了汇集和送出端口的小信号耦合通路，揭示了端口负阻尼特性主导影响因素，并分析了振荡风险；最后，仿真实验验证了汇集和送出端口振荡分析的准确性，发现耦合特性将影响海上风电直流汇集送出系统的振荡分析结果。

## 1 系统拓扑和控制策略

本节首先给出海上风电直流汇集系统拓扑结构，然后概述控制策略。

### 1.1 拓扑结构

海上风电直流汇集系统拓扑结构如图 1 所示。直流风电机组通过串并联构成直流风电场，直流风电场经汇集线路接入 DCT 低压端口；DCT 直流升压后经直流线路接入岸上 MMC，最终并入交流电网。岸上 MMC 的直流电压等级设计为 640kV，容量 1000MW，考虑直流风电机组的绝缘耐压水平，串联风电机组直流电压设计为 200kV，DCT 的变比为 200kV/640kV。

本文 DCT 选用 T 型 MMC 拓扑，该拓扑通过桥臂复用的方式，省去了交流变压器和一组桥臂，减小装置体积和重量，节约了成本<sup>[27]</sup>。其中，L 和 W 桥臂构成低压端口，H 和 W 桥臂构成高压端口，W 桥臂为复用桥臂。 $u_{dcL}$  为低压端口直流电压， $u_{dcH}$  为高压端口直流电压； $i_{z}$  为桥臂电流，其中  $x = a, b, c$  表示三相， $Z = L, H, W$  表示三组桥臂， $L_{armz}$ 、 $R_{armz}$  分别为桥臂电感、电阻， $C_{armz}$  为子模块电容， $n_z$  为桥臂子模块数。直流风电机组变换器采用 MMC 拓扑，优势在于可以通过单级电力电子变换实现交直流转换和升压，同时通过 MMC 子模块全半桥混合以及冗余设置，可以宽范围调节直流

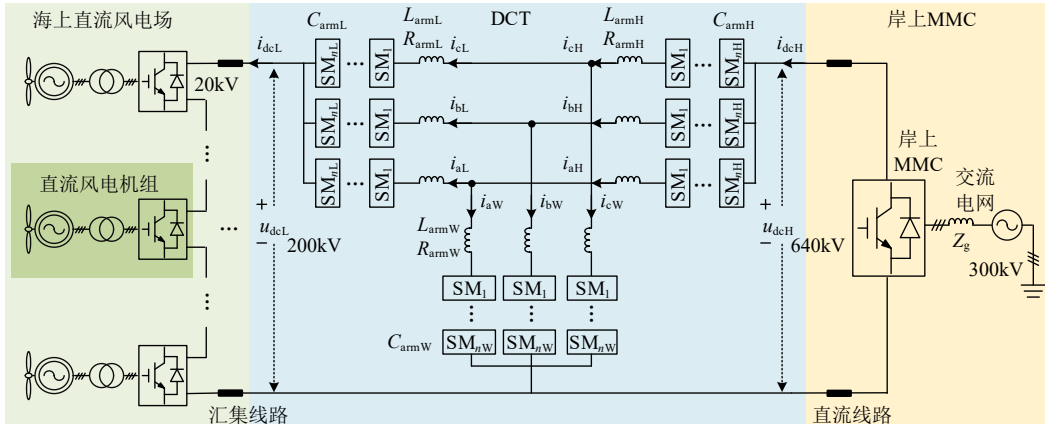


图 1 海上风电直流汇集送出系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of offshore wind power DC collection and transmission system

端口的电压，以适应串联风电机组运行的不同工况。本文风电机组拓扑如图 2 所示<sup>[32]</sup>，其与风电机组与文献[32]区别通过交流变压器升压，使得 MMC 可以在高调制比状态下工作，效率更高。

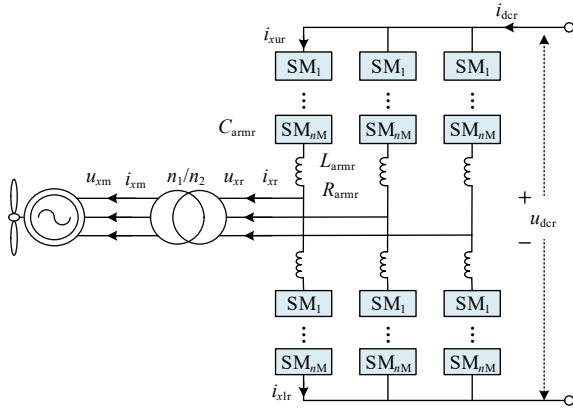


图 2 直流风电机组拓扑结构

Fig. 2 Topology of the DC wind turbine

图中： $u_{xm}$ 、 $i_{xm}$  ( $x = a, b, c$ ) 分别为机侧三相交流电压、电流； $u_{xr}$ 、 $i_{xr}$  ( $x = a, b, c$ ) 分别为阀侧三相交流电压、电流；变压器变比为  $n_1/n_2$ ；MMC 直流电压、电流分别为  $u_{dcr}$ 、 $i_{dcr}$ ；三相上、下桥臂电流为  $i_{xyr}$ ， $y = u, l$  分别表示上、下桥臂； $L_{armr}$ 、 $R_{armr}$  分别为桥臂电感、电阻； $C_{armr}$  为子模块电容； $n_M$  为桥臂子模块数。

岸上 MMC 拓扑结构与风电机组侧 MMC 类似。直流电压、电流分别为  $u_{deg}$ 、 $i_{deg}$ ，交流电压、电流分别为  $u_{xg}$ 、 $i_{xg}$ ，三相上、下桥臂电流为  $i_{xyg}$ ， $L_{armg}$  和  $R_{armg}$  分别为桥臂电感、电阻， $C_{armg}$  为子模块电容， $n_N$  为子模块数。

### 1.2 控制策略

本小节概述 DCT、直流风电机组和岸上 MMC 的控制策略。

#### 1.2.1 DCT 控制策略

W 桥臂作为复用桥臂，为 DCT 内部建立稳定

的交流电压；L 桥臂控制低压端口直流电压；H 桥臂控制桥臂直流电压；L 和 H 桥臂引入全局电压控制，实现子模块电容电压平衡和功率平衡<sup>[27]</sup>。

DCT 各桥臂均采用电流内环控制，在  $dq0$  同步旋转坐标系下实现，同步旋转参考角为  $\theta_s$ ，控制框图如图 A1 所示。 $dq$  电流参考指令  $i_{dZref}$ 、 $i_{qZref}$  与实际值  $i_{dZ}$ 、 $i_{qZ}$  的差值，输入到电流控制器  $H_{iZ}(s)$ ，经由 Park 反变换，产生交流调制信号  $m_{xZ}$ 。其中， $u_{dsW}$ 、 $u_{qsW}$  为公共连接点  $dq$  轴电压， $K_{vZ}$  为电压前馈系数， $K_{dZ}$  为电流解耦系数。L 桥臂控制 0 轴电流，参考指令  $i_{0Lref}$  与实际值  $i_{0L}$  作差后，输入到直流电流控制器  $H_{i0L}(s)$ ，经由 Park 反变换产生直流调制信号  $m_{dcL}$ 。

DCT 各桥臂电压外环控制框图如图 A2 所示。对于 W 桥臂， $H_{vW}(s)$  为交流电压控制器， $u_{dsWref}$ 、 $u_{qsWref}$  为  $dq$  轴电压参考指令，外环输出为  $i_{dWref}$ 、 $i_{qWref}$ 。对于 L 桥臂， $H_{vcl}(s)$  为全局电压控制器， $u_{cl}$  为三相桥臂子模块电容电压之和， $u_{clref}$  为其参考值，外环输出为  $i_{dLref}$ 。对于 H 桥臂，其全局电压控制定义与 L 桥臂一致， $u_{Href}$  为桥臂直流电压参考指令，与单桥臂子模块电容电压之比为直流调制信号  $m_{dcH}$ 。

根据 W、L、H 各桥臂交流与直流调制信号，可得各桥臂最终调制信号为

$$m_{xZ\Sigma} = m_{xZ} + m_{dcZ} \quad (1)$$

#### 1.2.2 直流风电机组控制策略

串联风电机组的机端电压与输出功率成正比，本文采用 MMC 型直流风机，通过冗余设置子模块以及全半桥混合模式，宽范围调节机端电压。本文采用定有功功率和最大功率跟踪结合的控制方式，通过检测 MMC 直流电压，低于最高耐压时，采用最大功率跟踪控制以提升风能利用率，高于最高电

压，采用定有功功率控制限制其功率。

风电机组的最大功率跟踪控制是根据风速经过运算得到该风速下的最优输出功率，工程中常采用查表法，给定有功功率指令值，在小信号建模层面，与有功功率控制的推导相同。

机侧 MMC 外环为有功功率控制，内环为电流控制，并附加环流控制，如图 A3 所示。 $\theta_r$  为同步旋转参考角，由位置传感器得到。风机有功功率参考指令  $P_{rref}$  与实际功率  $P_r$  的差值，经有功功率控制器  $H_{pr}(s)$ ，产生  $q$  轴电流参考指令  $i_{qref}$ 。电流控制与图 A1 结构相似。环流控制器为  $H_{icr}(s)$ ，经 Park 反变换产生环流调制信号  $m_{2xr}$ ，其中  $K_{2dr}$  为环流解耦系数。

根据机侧 MMC 交流调制信号  $m_{xr}$  和环流调制信号  $m_{2xr}$ ，可得直流风电机组 MMC 三相上、下桥臂调制信号  $m_{xur}$ 、 $m_{xlr}$  如下所示：

$$\begin{cases} m_{xur} = 0.5 - m_{xr} + m_{2xr} \\ m_{xlr} = 0.5 + m_{xr} + m_{2xr} \end{cases} \quad (2)$$

### 1.2.3 岸上 MMC 控制策略

岸上 MMC 用于将海上直流风电变换为交流电，并接入交流电网，同时为 DCT 高压端口建立直流电压。岸上 MMC 控制框图如图 B4 所示，通过 PLL 跟踪交流电网电压的相位，通过电压外环控制直流电压<sup>[26-27]</sup>。 $\theta_g$  为锁相角， $u_{dcref}$  为直流电压参考指令， $H_{vdcg}(s)$  为直流电压控制器， $i_{dcref}$  为  $d$  轴电流参考指令， $q$  轴电流参考指令  $i_{qref}$  设置为 0。电流控制与图 A1 结构相似，环流控制与图 A3 相似。

根据岸上 MMC 交流调制信号  $m_{xg}$  和环流控制产生的调制信号  $m_{2xg}$ ，可得岸上 MMC 三相上、下桥臂调制信号  $m_{xug}$ 、 $m_{xlg}$  如下所示：

$$\begin{cases} m_{xug} = 0.5 - m_{xg} + m_{2xg} \\ m_{xlg} = 0.5 + m_{xg} + m_{2xg} \end{cases} \quad (3)$$

## 2 计及耦合的汇集系统阻抗建模

基于 MMC 桥臂平均值模型，本节首先建立 DCT 小信号频域模型。然后，计及岸上 MMC、交流电网和直流线路与 DCT 耦合，建立系统汇集端口阻抗模型。最后，计及直流风电场、汇集线路与 DCT 耦合，建立系统送出端口阻抗模型。

### 2.1 DCT 小信号频域建模

MMC 桥臂平均值模型如图 3 所示，根据桥臂输出电压和子模块电容电压动态特性，可得桥臂回路频域小信号模型如下：

$$\begin{cases} \hat{u}_m = Z_{pL} \hat{i}_m + U_{cm} \hat{m}_m + M_m \hat{u}_{cm} \\ Y_{pC} \hat{u}_{cm} = I_m \hat{m}_m + M_m \hat{i}_m \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\hat{u}_m$ 、 $\hat{i}_m$ 、 $\hat{m}_m$  是桥臂电压、电流、调制信号小信号向量； $\hat{u}_{cm}$  是桥臂电容电压小信号向量<sup>[29]</sup>； $Z_{pL}$ 、 $Y_{pC}$  分别为桥臂电感、子模块电容的阻抗和导纳矩阵，其逆矩阵  $Y_{pL}$  和  $Z_{pC}$  表示桥臂电感、子模块电容的导纳和阻抗矩阵； $I_m$ 、 $M_m$ 、 $U_{cm}$  分别是桥臂电流、调制信号、电容电压的稳态向量矩阵，为托普利兹矩阵形式的各频率分量稳态值。

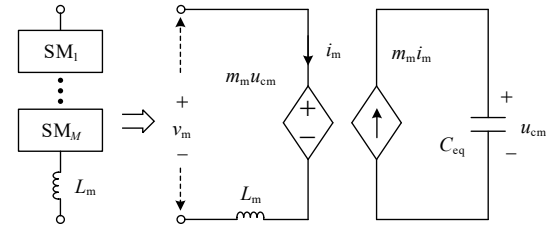


图 3 桥臂平均值模型

Fig. 3 Average value model of MMC arm

对于 W、L、H 桥臂，其端口电压、电流为三相桥臂电压、电流零序分量，可表示如下：

$$\begin{cases} \hat{u}_{out} = A_0 \hat{u}_m \\ \hat{i}_{out} = 3A_0 \hat{i}_m \end{cases} \quad (5)$$

式中： $A_0$  为零序矩阵，展开式见附录 A。

根据 DCT 中 W、L、H 桥臂连接关系，建立 DCT 主电路小信号模型。W、L、H 桥臂端口电流小信号传递关系满足：

$$\begin{cases} \hat{i}_{outL} = \hat{i}_{dcL} \\ \hat{i}_{outH} = \hat{i}_{dcH} \\ \hat{i}_{outW} = \hat{i}_{outH} - \hat{i}_{outL} \end{cases} \quad (6)$$

W、L、H 桥臂端口电压小信号传递关系满足：

$$\begin{cases} \hat{u}_{dcH} = \hat{u}_{outW} + \hat{u}_{outH} \\ \hat{u}_{dcL} = \hat{u}_{outW} - \hat{u}_{outL} \end{cases} \quad (7)$$

基于 DCT 桥臂控制策略，建立各组桥臂调制信号小信号模型。W 桥臂调制信号小信号模型为

$$\hat{m}_{aW\Sigma} = G_{iW} \hat{i}_{aW} + G_{vW} \hat{u}_{asW} \quad (8)$$

式中： $G_{iW}$  表示 W 桥臂电流控制传递函数矩阵； $G_{vW}$  表示 W 桥臂交流电压控制传递函数矩阵； $\hat{i}_{aW}$  为 W 桥臂电流小信号向量； $\hat{u}_{asW}$  为公共连接点电压小信号向量。

L 桥臂调制信号小信号模型为

$$\hat{m}_{aL\Sigma} = G_{iL} \hat{i}_{aL} + G_{vdcL} \hat{u}_{dcL} + G_{vcl} \hat{u}_{cl} \quad (9)$$

式中： $G_{iL}$  表示 L 桥臂电流控制传递函数矩阵； $G_{vdcL}$  表示低压直流电压控制传递函数矩阵； $G_{vcl}$  表示 L 桥臂全局电压控制传递函数矩阵。

H 桥臂调制信号小信号模型为

$$\hat{m}_{aH\Sigma} = \mathbf{G}_{iH}\hat{i}_{aH} + \mathbf{G}_{vCH}\hat{u}_{cH} \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{G}_{iH}$  表示 H 桥臂电流控制传递函数矩阵;  $\mathbf{G}_{vCH}$  表示 H 桥臂全局电压控制传递函数矩阵。各控制器传递函数矩阵展开式见附录 A。

联立 DCT 电路和控制小信号频域方程, 消去 W 桥臂有关量, 可得 DCT 小信号频域方程如下:

$$\begin{cases} \hat{u}_{dcH} = \mathbf{G}_{11}\hat{i}_{aH} + \mathbf{G}_{12}\hat{i}_{aL} + \mathbf{G}_{13}\hat{m}_{aH\Sigma} \\ \hat{u}_{dcL} = \mathbf{G}_{21}\hat{i}_{aH} + \mathbf{G}_{22}\hat{i}_{aL} + \mathbf{G}_{23}\hat{m}_{aL\Sigma} \\ \mathbf{G}_{30}\hat{m}_{aH\Sigma} = \mathbf{G}_{31}\hat{i}_{aH} + \mathbf{G}_{32}\hat{i}_{aL} \\ \mathbf{G}_{40}\hat{m}_{aL\Sigma} = \mathbf{G}_{41}\hat{i}_{aH} + \mathbf{G}_{42}\hat{i}_{aL} + \mathbf{G}_{43}\hat{u}_{dcL} \end{cases} \quad (11)$$

$\mathbf{G}_{11}$ 、 $\mathbf{G}_{12}$ 、 $\mathbf{G}_{13}$  等展开式见附录 A。

### 2.2 汇集端口阻抗建模

海上风电直流汇集送出系统阻抗建模示意图如图 4 所示, 其中, ①为汇集端口, ②为送出端口。从①向 DCT 注入电压小扰动, 根据电流响应, 可以建立汇集端口阻抗模型。

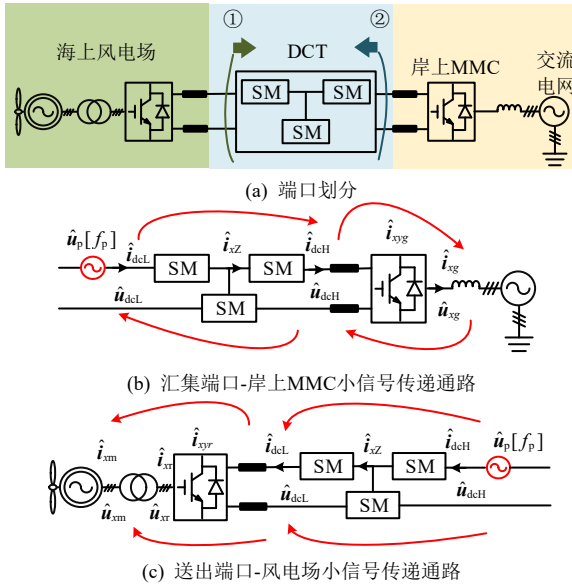


图 4 系统阻抗建模示意图

如图 4(b)所示, 由①向 DCT 注入频率为  $f_p$  的电压小扰动, 其与桥臂电压的压差以及控制作用使得 DCT 桥臂电流小信号向量  $\hat{i}_{xz}$  产生频率为  $f_p + kf_s$  的分量,  $\hat{i}_{xL}$  的零序分量即 DCT 低压端口电流响应小信号向量  $\hat{i}_{dcL}$ ,  $\hat{i}_{xH}$  的零序分量传递到 DCT 高压端口, 经高压直流线路流入岸上 MMC 直流端口。

在控制作用下, 频率为  $f_p$  的 DCT 高压端口小信号向量  $\hat{i}_{dcH}$  使得岸上 MMC 的桥臂电流小信号向量  $\hat{i}_{xyg}$  产生频率为  $f_p + kf_1$  的分量, 差模部分传递到交流端口电流小信号向量  $\hat{i}_{xg}$ , 并在电网阻抗作用下响应出交流端口电压小信号向量  $\hat{u}_{xg}$ 。  $\hat{u}_{xg}$  又将影响

岸上 MMC 直流端口电气量的小信号分量, 并经直流线路耦合至 DCT。

因此, 推导计及耦合的汇集端口阻抗模型, 要考虑 DCT 高压端口小信号电压、电流关系:

$$\hat{u}_{dcH} = -\mathbf{Z}_{CL}\hat{i}_{dcH} \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{Z}_{CL}$  为岸上 MMC 与高压直流线路阻抗, 其表达式见附录 A。

联立式(11)(12), 可得 DCT 低压端口阻抗为

$$\mathbf{Z}_{dcL} = \frac{1}{\mathbf{Y}_{dcL}} \quad (13)$$

式中:  $\mathbf{Y}_{dcL}$  表示 DCT 低压端口导纳, 表达式为

$$\mathbf{Y}_{dcL} = 3\mathbf{A}_0(\mathbf{G}_{21}\mathbf{G}_{iaH\_iaL} + \mathbf{G}_{22} + \mathbf{G}_{23}\mathbf{G}_{maL\_iaL})^{-1} \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{G}_{iaH\_iaL}$  和  $\mathbf{G}_{maL\_iaL}$  展开式见附录 A。

如果忽略耦合, 则式(12)改写为

$$\hat{u}_{dcH} = -\mathbf{Z}_0\hat{i}_{dcH} \quad (15)$$

重新代入求解可得忽略耦合的汇集端口阻抗。

图 5 所示是 DCT 低压端口小信号传递函数框图。如果忽略岸上 MMC 及交流电网耦合作用, DCT 高压端口阻抗等效为理想直流电压源, 等效阻抗  $\mathbf{Z}_0$  为 0, 高压端口电压小信号响应  $\hat{u}_{dcH}$  为 0。考虑耦合作用, 等效阻抗为  $\mathbf{Z}_{CL}$ , DCT 高压端口产生小信号响应  $\hat{u}_{dcH}$ 。  $\hat{u}_{dcH}$  通过  $\mathbf{G}_{HaL}^{-1}$  通路反馈回到  $\hat{i}_{aL}$ , 从而影响低压端口的阻抗特性,  $\mathbf{G}_{HaL}^{-1}$  与 H 桥臂全局电压控制和 W 桥臂电压和电流控制有关。

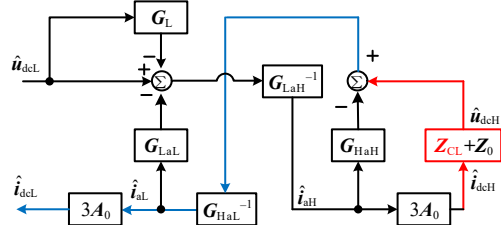


图 5 汇集端口小信号传递函数

Fig. 5 Small-signal transform function of collection port

图 5 中传递函数展开式如下:

$$\begin{cases} \mathbf{G}_L = \mathbf{G}_{23}\mathbf{G}_{40}^{-1}\mathbf{G}_{43} \\ \mathbf{G}_{LaL} = \mathbf{G}_{22} + \mathbf{G}_{23}\mathbf{G}_{40}^{-1}\mathbf{G}_{42} \\ \mathbf{G}_{LaH} = \mathbf{G}_{21} + \mathbf{G}_{23}\mathbf{G}_{40}^{-1}\mathbf{G}_{41} \\ \mathbf{G}_{HaH} = \mathbf{G}_{11} + \mathbf{G}_{13}\mathbf{G}_{30}^{-1}\mathbf{G}_{31} \\ \mathbf{G}_{HaL} = \mathbf{G}_{12} + \mathbf{G}_{13}\mathbf{G}_{30}^{-1}\mathbf{G}_{32} \end{cases} \quad (16)$$

### 2.3 送出端口阻抗建模

如图 4(c)所示, 由②向 DCT 注入频率为  $f_p$  的电压小扰动, 其与桥臂电压的压差以及控制作用使得 DCT 桥臂电流小信号向量  $\hat{i}_{xz}$  产生频率为  $f_p + kf_s$  的分量,  $\hat{i}_{xH}$  的零序分量即 DCT 高压端口电流响应小信号向量  $\hat{i}_{dcH}$ ,  $\hat{i}_{xL}$  的零序分量传递到 DCT 低压端

口，经汇集线路流入风电场。

在控制作用下，频率为  $f_p$  的 DCT 高压端口小信号向量  $\hat{i}_{dcL}$  使得机侧 MMC 的桥臂电流小信号向量  $\hat{i}_{yr}$  产生频率为  $f_p + kf_r$  的分量，差模部分传递到交流端口电流小信号向量  $\hat{i}_{xr}$ ，经过变压器和 PMSG 阻抗作用响应出交流端口电压小信号向量  $\hat{u}_{xr}$ 。 $\hat{u}_{xr}$  又将影响机侧 MMC 直流端口电气量的小信号分量，并经汇集线路耦合至 DCT。

低压端口小信号电压、电流关系满足：

$$\hat{u}_{dcL} = \mathbf{Z}_{WFL} \hat{i}_{dcL} \quad (17)$$

式中： $\mathbf{Z}_{WFL}$  为汇集线路与风电场阻抗，其表达式见附录 A。 $n_s$  台直流风电机组串联之后经过汇集母线并联接入 DCT 低压端口，并联支路数为  $n_p$ 。

根据式(17)(11)，可得送出端口阻抗为

$$\mathbf{Z}_{dcH} = \frac{1}{\mathbf{Y}_{dcH}} \quad (18)$$

式中： $\mathbf{Y}_{dcH}$  表示送出端口导纳，表达式为

$$\mathbf{Y}_{dcH} = 3\mathbf{A}_0 (\mathbf{G}_{11} + \mathbf{G}_{12} \mathbf{G}_{iaL\_iaH} + \mathbf{P}_3 \mathbf{G}_{maH\_iaH})^{-1} \quad (19)$$

式中： $\mathbf{G}_{iaL\_iaH}$ 、 $\mathbf{G}_{maH\_iaH}$  展开式见附录 A。

如果忽略耦合，则式(17)为

$$\hat{u}_{dcL} = \mathbf{Z}_{\infty} \hat{i}_{dcL} \quad (20)$$

重新代入求解可得忽略耦合的送出端口阻抗。

图 6 所示是送出端口小信号传递函数框图。如果忽略风电场与直流汇集线路耦合作用，DCT 低压端口阻抗等效为理想直流电流源，等效阻抗  $\mathbf{Z}_{\infty}$  为  $\infty$ ，考虑耦合作用，等效阻抗为  $\mathbf{Z}_{WFL}$ ，DCT 低压端口电流电压信号建立起传递函数关系  $\mathbf{Z}_{WFL}$ 。 $\hat{u}_{dcL}$  与通过  $\mathbf{G}_{LaH}^{-1}$  和  $\mathbf{G}_L$  支路反馈回到  $\hat{i}_{aH}$ ，从而影响高压端口的阻抗特性， $\mathbf{G}_{LaH}^{-1}$  与 L 桥臂全局电压、与 W 桥臂电压电流控制有关， $\mathbf{G}_L$  与直流电压、电流控制有关。

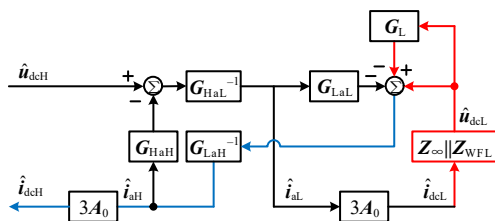


图 6 送出端口小信号传递函数

Fig. 6 Small-signal transform function of transmission port

## 2.4 阻抗建模校核

本节对前文建立的系统汇集和送出端口阻抗模型进行校核。基于图 1 建立电磁暂态仿真平台，DCT 参数见附录表 B1，直流风电机组参数见附录表 B2，岸上 MMC 参数见附录表 B3，汇集线路及

直流线路参数见表 B4。

附录图 B1 给出了系统汇集和送出端口阻抗解析与扫描结果。图中实线为阻抗解析结果，离散点通过仿真建模扫描得到。结果表明解析与扫描结果吻合良好，验证了本文阻抗解析模型的准确性。

## 3 振荡分析与仿真验证

针对汇集和送出端口，首先给出主导因素对其负阻尼特性的影响规律，然后根据稳定判据用考虑和忽略耦合的阻抗模型判别系统的振荡风险，最后基于 Matlab/Simulink 构建海上风电直流汇集系统电磁暂态仿真平台，仿真验证振荡分析的准确性。

### 3.1 汇集端口阻抗特性及振荡分析

附录图 B2 为高压直流线路、直流电流和电压控制对汇集端口阻抗  $\mathbf{Z}_{dcL}$  的影响。对于汇集端口，其输入端口为 DCT 高压端口，与高压直流汇集线路相连，经图 5 所示通路对汇集端口阻抗产生耦合影响。由于电气距离最为接近，耦合程度主要受高压直流线路参数影响。由图 B2(a)可知，直流线路增长使得  $\mathbf{Z}_{dcL}$  反谐振峰和容性负阻尼区间向低频移动。

由图 B2(b)可知，直流电流带宽影响宽频率范围  $\mathbf{Z}_{dcL}$  阻抗特性，直流电流带宽减小，使得  $\mathbf{Z}_{dcL}$  在 DCT 交流工作频率  $f_s$  附近的感性和容性负阻尼特性增强，在 10Hz 以上主要频段幅值减小。

由图 B2(c)可知，直流电压带宽影响宽频率范围  $\mathbf{Z}_{dcL}$  阻抗特性，直流电压带宽减小，使得  $\mathbf{Z}_{dcL}$  在  $f_s$  附近的感性和容性负阻尼特性增强，在全频段的幅值减小。

W、L、H 桥臂交流环流控制对  $\mathbf{Z}_{dcL}$  阻抗特性的影响如附录图 B3 所示， $\mathbf{Z}_{dcL}$  在  $f_s$  附近频段的阻抗特性受 W 桥臂交流环流控制主导影响，随着带宽的增大， $\mathbf{Z}_{dcL}$  在  $f_s$  附近的感性和容性增强，带宽较高时呈现负阻尼特性。L 桥臂交流环流带宽增大使  $\mathbf{Z}_{dcL}$  感性负阻尼增强，H 桥臂交流环流带宽增大使  $\mathbf{Z}_{dcL}$  感性负阻尼减弱。

H、L 桥臂全局电压控制对  $\mathbf{Z}_{dcL}$  阻抗特性的影响如附录图 B4 所示，由图可知，H、L 桥臂全局电压控制主要影响  $\mathbf{Z}_{dcL}$  低频段的阻抗特性。

风电场出力对  $\mathbf{Z}_{dcL}$  阻抗特性的影响如图附录 B5 所示，由图可知，随着风电场出力增大， $\mathbf{Z}_{dcL}$  在  $f_s$  附近频段的感性和容性负阻尼特性增强。

综上，对  $\mathbf{Z}_{dcL}$  进行频段划分，如图 7 所示。汇集端口由 W 和 L 桥臂电感和子模块电容串联组成，构成无源谐振回路，在控制的作用下，呈现谐振峰

和反谐振峰，第一个反谐振峰频率记作  $f_{LCL1}$ ，最后一个记作  $f_{LCL2}$ 。

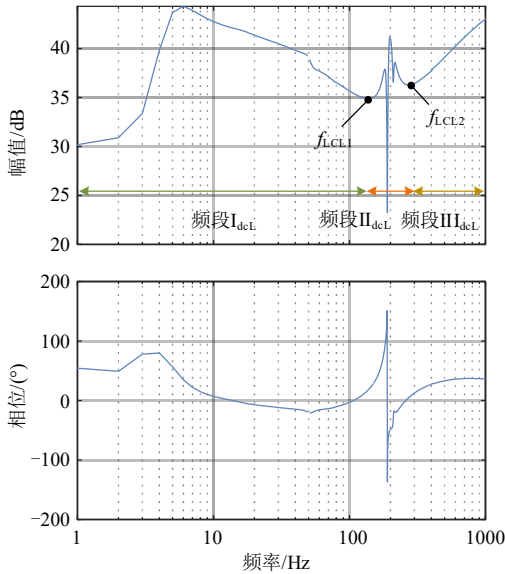


图 7 汇集端口频段划分

Fig. 7 Frequency band division of collection port

1) 频段  $I_{dcL}$  ( $1 < f < f_{LCL1}$ ) 受直流电压和电流控制的主要影响，低频段也受全局电压控制的影响。

2) 频段  $II_{dcL}$  ( $f_{LCL1} < f < f_{LCL2}$ ) 受 W 桥臂交流环流控制、直流电压、电流控制和有功功率主要影响，也受 L、H 桥臂交流环流控制的影响，并受高压直流线路耦合影响，在  $f_s$  附近存在感性和容性的负阻尼。

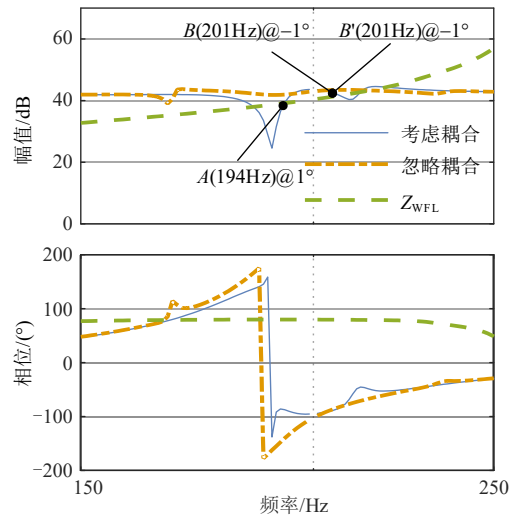
3) 频段  $III_{dcL}$  ( $f > f_{LCL2}$ ) 受直流电压和电流控制的主要影响。

图 8(a) 给出了考虑和忽略耦合时，DCT 低压端口阻抗  $Z_{dcL}$  和汇集线路与风电场阻抗  $Z_{WFL}$  的 Bode 图。考虑耦合时，阻抗交于点 A(194Hz) 和点 B(201Hz)，相位裕度分别为  $1^\circ$  和  $-1^\circ$ ，相位裕度不足，系统存在 194Hz 和 201Hz 的振荡风险；忽略耦合时，仅交于点 B'(201Hz)，无法判断系统在 194Hz 的振荡风险。

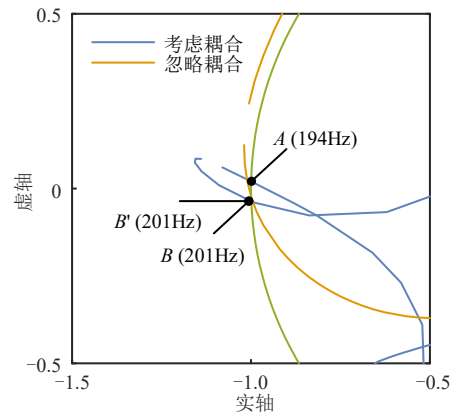
图 8(b) 为  $Z_{dcL} / Z_{WFL}$  的 Nyquist 曲线，考虑耦合时，Nyquist 曲线与单位圆交于点 A(194Hz) 和点 B(201Hz)，与  $(-1, j0)$  距离较近，系统存在 194Hz 和 201Hz 的振荡风险；若忽略耦合，则仅交于点 B'(201Hz)，无法判断系统在 194Hz 的振荡风险。图 13(c) 给出了汇集端口直流电流波形及 FFT，由图可知，直流电流存在 194Hz 和 201Hz 等多个频率的振荡分量，与考虑耦合的振荡分析一致。

### 3.2 送出端口阻抗特性及振荡分析

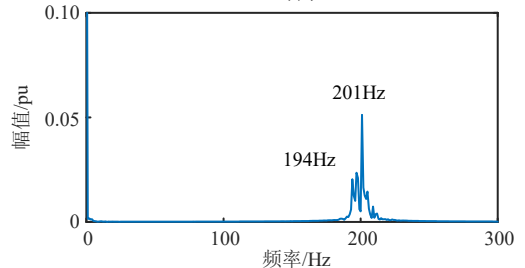
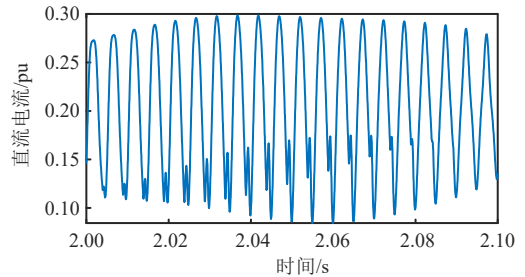
附录图 B6 为汇集线路和直流电流控制对送出端口阻抗  $Z_{dcH}$  的影响。对于送出端口，其输入端口为 DCT 低压端口，与汇集线路相连，其阻抗经图 6



(a) 汇集端口 Bode 图



(b) 汇集端口 Nyquist 曲线



(c) 汇集端口直流电流波形及 FFT

图 8 汇集端口振荡分析

Fig. 8 Oscillation analysis of collection port

所示通路对汇集端口阻抗  $Z_{dcH}$  产生耦合影响。由于电气距离最为接近，耦合程度主要受汇集线路参数影响。

由附录图 B6(a) 可知，汇集线路增长使得在工作频率附近  $Z_{dcH}$  的感性和容性负阻尼特性增强；由附录图 B6(b) 可知，直流电流带宽增大，使得  $Z_{dcH}$  在工作频率附近的感性负阻尼特性增强。

W、L、H 桥臂交流环流控制对  $Z_{dcH}$  阻抗特性的影响如附录图 B7 所示， $Z_{dcH}$  在  $f_s$  附近频段的阻抗特性受 W 桥臂交流环流控制主导影响，随着控制带宽的增大， $Z_{dcH}$  在  $f_s$  附近的感性负阻尼特性增强，电流带宽较高时呈现感性负阻尼特性。L 和 H 桥臂交流环流带宽增大会使得  $Z_{dcH}$  感性负阻尼增强。

H、L 桥臂全局电压控制对  $Z_{dcH}$  阻抗特性的影响如附录图 B8 所示，由图可知，H、L 桥臂全局电压控制主要影响  $Z_{dcH}$  低频段的阻抗特性。

风电场出力对  $Z_{dcH}$  阻抗特性的影响如附录图 B9 所示，由图可知，随着风电场出力增大， $Z_{dcH}$  在  $f_s$  附近频段的感性和容性负阻尼特性增强。

综上，对  $Z_{dcH}$  进行频段划分，如图 7 所示。送出端口由 W 和 H 桥臂电感和子模块电容串联组成，构成无源谐振回路，在控制的作用下，呈现谐振峰和反谐振峰，第 1 个反谐振峰频率记作  $f_{LCH1}$ ，最后一个记作  $f_{LCH2}$ 。

1) 频段  $I_{dcH}(1 < f < f_{LCH1})$  的低频段受全局电压控制的影响。

2) 频段  $II_{dcH}(f_{LCH1} < f < f_{LCH2})$  受 W 桥臂交流环流控制主要影响，也受 L、H 桥臂交流环流控制和有功功率影响，并受汇集直流线路耦合影响，在  $f_s$  附近存在感性负阻尼。

3) 频段  $III_{dcH}(f > f_{LCH2})$  受桥臂电感主要影响，呈感性。

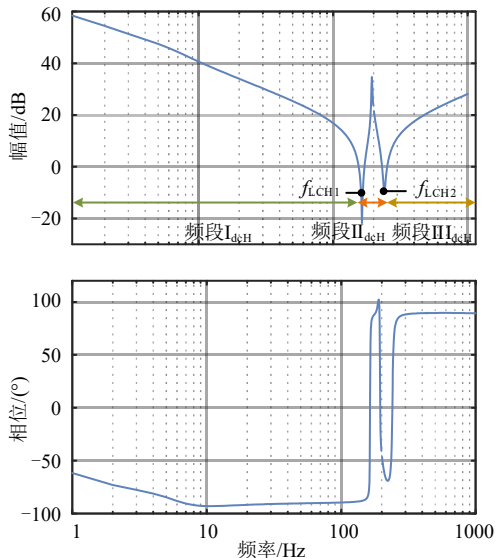
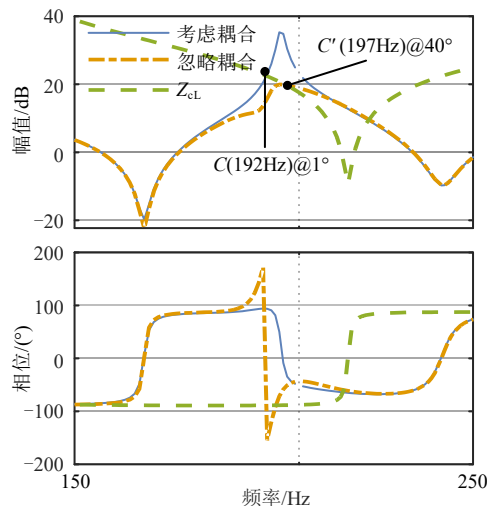


图 9 送出集端口频段划分

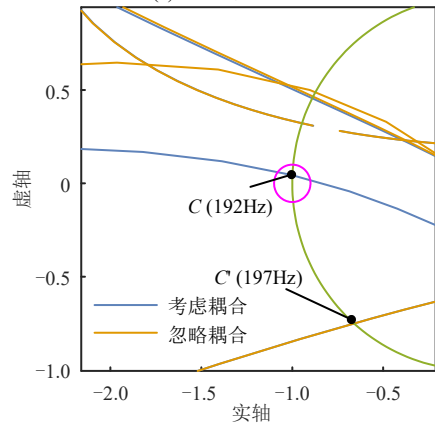
Fig. 9 Frequency band division of transmission port

图 10(a)给出了考虑和忽略耦合时，高压直流线路与岸上 MMC 阻抗  $Z_{CL}$  和送出端口阻抗  $Z_{dcH}$  的 Bode 图，考虑耦合时阻抗相交于点  $C(192\text{Hz})$ ，相位裕度为  $1^\circ$ ，相位裕度不足，系统存在振荡风险；忽略耦合则交于点  $C'(197\text{Hz})$ ，相位裕度为  $40^\circ$ ，无

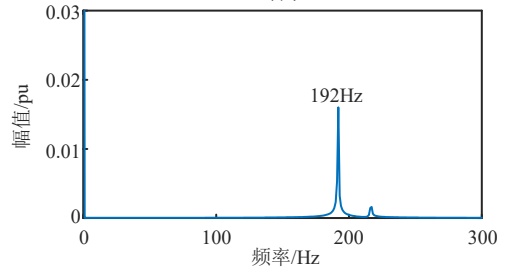
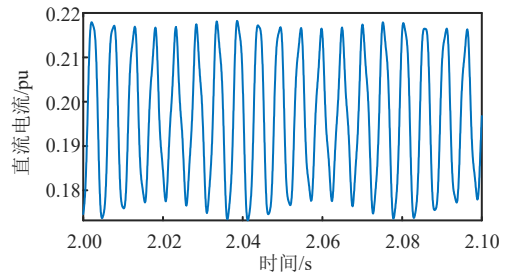
法判断振荡风险。



(a) 送出端口Bode图



(b) 送出端口Nyquist曲线



(c) 送出端口直流电流波形及FFT

图 10 送出端口振荡分析

Fig. 10 Oscillation analysis of transmission port

图 10(b)为  $Z_{CL} / Z_{dcH}$  的 Nyquist 曲线，考虑耦合时，Nyquist 曲线与单位圆交于点  $C(192\text{Hz})$ ，与  $(-1, j0)$  距离较近，系统存在振荡风险；忽略耦合时交于点  $C'(197\text{Hz})$ ，与  $(-1, j0)$  距离远，无法判断振荡风险。

图 10(c)给出了送出端口直流电流波形及 FFT，

直流电流存在 192Hz 的振荡分量,与考虑耦合的振荡分析一致。

## 4 结论

针对海上风电直流汇集系统,本文采用频域线性化方法,分别建立了计及岸上 MMC 和高压直流线路耦合的汇集端口阻抗模型和计及风电场和汇集线路耦合的送出端口阻抗模型,仿真验证了模型的准确性,并基于阻抗模型分析了端口的振荡特性,得到以下结论:

1) 计及耦合的系统汇集和送出端口阻抗解析模型在 1~3000Hz 范围与仿真模型吻合度高,结合稳定判据能准确判断振荡风险频率,忽略耦合的模型则会影响振荡分析准确性。

2) 系统汇集端口存在振荡风险,根据频段划分可知,汇集端口阻抗在  $f_s$  附近阻抗受 W 桥臂交流环流控制、直流电压、电流控制和有功功率主要影响,也受 L、H 桥臂交流环流控制影响,并受高压直流线路耦合影响,呈现感性和容性负阻尼,与汇集线路和直流风电场阻抗相交,相位裕度不足导致振荡。

3) 系统送出端口存在振荡风险,根据频段划分,其阻抗  $f_s$  附近阻抗受 W 桥臂交流环流控制主要影响,也受 L、H 桥臂交流环流控制和有功功率影响,并受汇集直流线路耦合影响,呈现感性负阻尼,与高压直流线路和岸上 MMC 阻抗相交,相位裕度不足导致振荡。

不同拓扑、控制、组网方式都可能影响风场+海缆的等值阻抗,本文选择了其中一种方式开展研究,整体方案的稳定性校核还需要考虑到风场直流组网实际采用的拓扑和控制策略。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要(草案)》(摘编)[N]. 人民日报, 2021-03-13(09).
- [2] FENG Shuanglei, SONG Zongpeng, YANG Qing, et al. Long-term changes of wind resources and its impact on wind power development under climate change in China[J]. Energy Internet, 2024, 1(1): 52-62.
- [3] GUO Jianbo, JING Yiran, HOU Weilin, et al. Demands and challenges of energy storage technology for future power system[J]. Energy Internet, 2024, 1(2): 116-122.
- [4] 蔡旭, 杨仁焯, 周剑桥, 等. 海上风电直流送出与并网技术综述[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 2-22. CAI Xu, YANG Renxin, ZHOU Jianqiao, et al. Review on offshore wind power integration via DC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 2-22(in Chinese).
- [5] CHEN Wu, HUANG A Q, LI Chushan, et al. Analysis and comparison of medium voltage high power DC/DC converters for offshore wind energy systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 2014-2023.
- [6] 蔡旭, 施刚, 迟永宁, 等. 海上全直流型风电场的研究现状与未来发展[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2036-2048. CAI Xu, SHI Gang, CHI Yongning, et al. Present status and future development of offshore all-DC wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2036-2048(in Chinese).
- [7] LUNDBERG S. Wind farm configuration and energy efficiency studies-series DC versus AC layouts[D]. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2006.
- [8] 施刚, 王志冰, 曹远志, 等. 适用于高压直流传输的海上直流风电场内网拓扑的比较分析[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3059-3064. SHI Gang, WANG Zhibing, CAO Yuanzhi, et al. Comparative analysis of internal grid topology of offshore DC wind farm suitable for HVDC transmission[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3059-3064(in Chinese).
- [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: VDE, 2015, 1-7.
- [10] 赵岩, 郑斌毅, 贺之渊. 南汇柔性直流输电示范工程的控制方式和运行性能[J]. 南方电网技术, 2012, 6(6): 6-10. ZHAO Yan, ZHENG Binyi, HE Zhiyuan. The control mode and operating performance of Nanhui VSC-HVDC demonstration project[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(6): 6-10(in Chinese).
- [11] 魏伟, 许树楷, 李岩, 等. 南澳多端柔性直流输电示范工程系统调试[J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 73-77. WEI Wei, XU Shukai, LI Yan, et al. The system commissioning of Nan'ao VSC-MTDC demonstration project[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 73-77(in Chinese).
- [12] WANG Weisheng, LI Guanghui, GUO Jianbo. Large-scale renewable energy transmission by HVDC: challenges and proposals[J]. Engineering, 2022, 19: 252-267.
- [13] 余超耘, 盛超, 郭敬梅, 等. 海上风电场经交流海缆送出高频谐振高效实用化分析方法及其工程实践[J]. 电网技术, 2024, 48(3): 1352-1361. YU Chaoyun, SHENG Chao, GUO Jingmei, et al. Efficient and practical analysis method for high-frequency resonance of offshore wind farm transmitted by AC submarine cable and its engineering practice[J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 1352-1361(in Chinese).
- [14] 高磊, 吕敬, 蔡旭. 如东海上风电柔直送出系统的中频振荡特性分析[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3495-3509. GAO Lei, LÜ Jing, CAI Xu. Analysis of mid-frequency oscillation characteristics in Rudong MMC-HVDC system for offshore wind farms[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3495-3509 (in Chinese).
- [15] 李芷晴, 王学梅, 冯俊杰, 等. 海上风电并网系统中高频阻抗建模与谐振特性分析[J/OL]. 电网技术, 1-16[2025-03-03]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1492>. LI Zhiqing, WANG Xuemei, FENG Junjie, et al. Mid-and high-frequency impedance modeling and resonance characteristics analysis of offshore wind farm[J/OL]. Power System Technology, 1-16[2025-03-03]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1492>(in Chinese).
- [16] 魏晓光, 王新颖, 高冲, 等. 用于直流电网的高压大容量 DC/DC 变换器拓扑研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(S1): 218-224.

- WEI Xiaoguang, WANG Xinying, GAO Chong, et al. Topologies research of high voltage and high power DC/DC converters used in DC grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(S1): 218-224(in Chinese).
- [17] 杨晓峰, 郑琼林, 林智钦, 等. 用于直流电网的大容量 DC/DC 变换器研究综述[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 670-677.  
YANG Xiaofeng, ZHENG T Q, LIN Zhiqin, et al. Survey of high-power DC/DC converter for HVDC grid application[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 670-677(in Chinese).
- [18] CAO Lingling, LOO K H, LAI Y M. Output-impedance shaping of bidirectional DAB DC-DC converter using double-proportional-integral feedback for near-ripple-free DC bus voltage regulation in renewable energy systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(3): 2187-2199.
- [19] LU Xiaonan, SUN Kai, GUERRERO J M, et al. Stability enhancement based on virtual impedance for DC microgrids with constant power loads[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 2770-2783.
- [20] 黄旭程, 何志兴, 伍文华, 等. 交直流微电网中变换器级联系统稳定性分析与协同控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1432-1442.  
HUANG Xucheng, HE Zhixing, WU Wenhua, et al. Stability analysis of converters cascade system in the hybrid AC/DC microgrid and coordinative control[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1432-1442(in Chinese).
- [21] 黄远胜, 刘和平, 苗轶如, 等. 基于并联虚拟电阻的级联 DC-DC 变换器稳定控制方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(18): 3927-3937.  
HUANG Yuansheng, LIU Heping, MIAO Yiru, et al. Cascaded DC-DC converter stability control method based on paralleling virtual resistor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(18): 3927-3937(in Chinese).
- [22] ZHANG Xin, RUAN Xinbo, TSE C K. Impedance-based local stability criterion for DC distributed power systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2015, 62(3): 916-925.
- [23] 黄旭程, 何志兴, 刘亚丽, 等. 考虑光伏发电单元孤岛检测影响的直流电网稳定性分析与阻尼控制[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 109-122, 402.  
HUANG Xucheng, HE Zhixing, LIU Yali, et al. Stability analysis and damping control of DC grid considering PV generators with island detection[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 109-122, 402(in Chinese).
- [24] 田艳军, 刘腾飞, 王毅, 等. 光伏直流升压汇集系统级联变换器虚拟阻抗控制[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 385-397.  
TIAN Yanjun, LIU Tengfei, WANG Yi, et al. Virtual impedance control for cascaded converters in photovoltaic DC boost collection system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 385-397(in Chinese).
- [25] 王新颖, 汤广福, 贺之渊, 等. 远海风电场直流汇集用 DC/DC 变换器拓扑研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3): 837-847.  
WANG Xinying, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. Topology research of DC/DC converters for offshore wind farm DC collection systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3): 837-847(in Chinese).
- [26] SASONGKO F, HAGIWARA M, AKAGI H. A front-to-front (FTF) system consisting of two modular multilevel cascade converters based on double-star chopper-cells[C]//Proceedings of the 1st International Future Energy Electronics Conference (IFEEC). Tainan, China: IEEE, 2013: 488-493.
- [27] 王新颖. 直流电网用高压 DC/DC 变换器拓扑及其控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [28] JI Ke, TANG Guangfu, PANG Hui, 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.
- [29] 朱蜀, 刘开培, 李彧野, 等. 基于动态相量及传递函数矩阵的模块化多电平换流器交直流侧阻抗建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4791-4805.  
ZHU Shu, LIU Kaipei, LI Yuye, et al. AC/DC-side impedance modeling method for modular multilevel converter based on dynamic phasors and transfer function matrix[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4791-4805(in Chinese).
- [30] 张旸, 沈梦娇, 陈新, 等. 基于双谐波线性化的级联 H 桥静止无功发生装置序阻抗建模与分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4334-4346.  
ZHANG Yang, SHEN Mengjiao, CHEN Xin, et al. Sequence impedance modeling and analysis of cascaded H-Bridge static var generator based on double-harmonic linearization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20): 4334-4346(in Chinese).
- [31] 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.
- [32] 常怡然, 蔡旭. 大型海上全直流风场中基于 MMC 的风力发电变流器及其控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3789-3798.  
CHANG Yiran, CAI Xu. MMC based wind power converters for offshore DC Wind Farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3789-3798(in Chinese).



李彧野

在线出版日期: 2024-04-16。

收稿日期: 2024-01-25。

作者简介:

李彧野(1992), 男, 工程师, 博士, 研究方向为新能源并网技术, E-mail: 378597997@qq.com;

王伟胜(1968), 男, 通信作者, 教授级高级工程师, 博士生导师, 研究方向为新能源发电与并网技术, 电力系统分析、稳定和控制等, E-mail: wangws@epri.sgcc.com.cn。

(责任编辑 马晓华)

附录 A

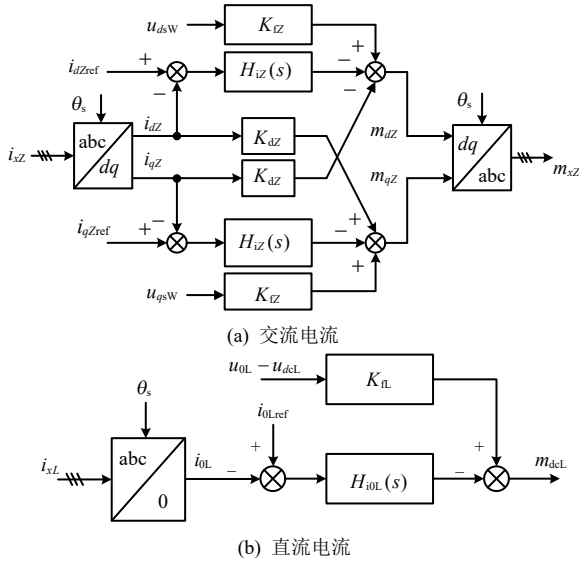


图 A1 电流内环控制框图  
Fig. A1 Diagram of the current control

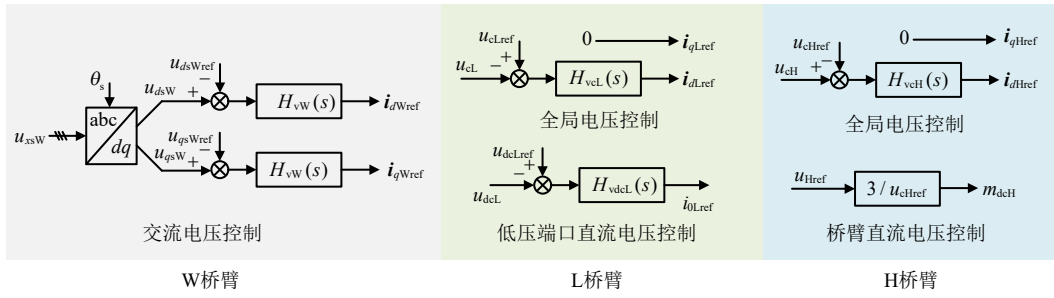


图 A2 W/L/H 电压控制框图  
Fig. A2 Diagram of the voltage control of Arm W/L/H

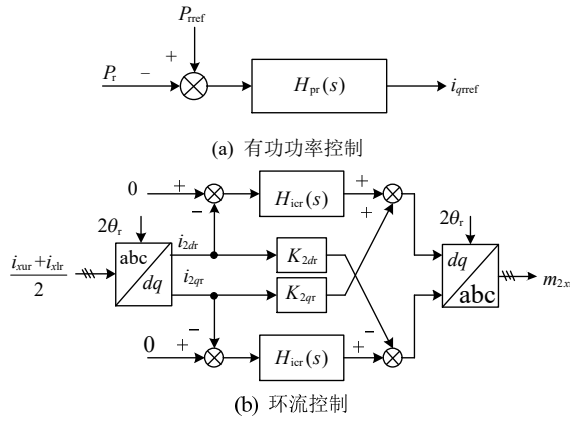


图 A3 机侧 MMC 控制框图  
Fig. A3 Control diagram of the wind turbine-side MMC

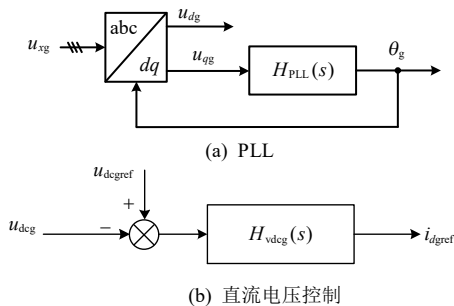


图 A4 岸上 MMC 控制框图

Fig. A4 Control diagram of onshore MMC

1) 坐标变换矩阵。

基频从 abc 坐标系到 dq 坐标系,

$$\begin{cases} \mathbf{G}_{da}(g+k+1, g+k) = e^{j\varphi_v} \\ \mathbf{G}_{da}(g+k+1, g+k+2) = e^{-j\varphi_v} \\ \mathbf{G}_{aq}(g+k+1, g+k) = -je^{-j\varphi_v} \\ \mathbf{G}_{aq}(g+k+1, g+k+2) = je^{j\varphi_v} \end{cases} \quad (A1)$$

基频从 dq 坐标系到 abc 坐标系

$$\begin{cases} \mathbf{G}_{ad}(g+k+1, g+k) = e^{j\varphi_v} / 2 \\ \mathbf{G}_{ad}(g+k+1, g+k+2) = e^{-j\varphi_v} / 2 \\ \mathbf{G}_{aq}(g+k+1, g+k) = -je^{j\varphi_v} / 2 \\ \mathbf{G}_{aq}(g+k+1, g+k+2) = je^{-j\varphi_v} / 2 \end{cases} \quad (A2)$$

二倍频从 abc 坐标系到 dq 坐标系

$$\begin{cases} \mathbf{G}_{2da}(g+k+1, g+k-1) = e^{j2\varphi_v} \\ \mathbf{G}_{2da}(g+k+1, g+k+3) = e^{-j2\varphi_v} \\ \mathbf{G}_{2qa}(g+k+1, g+k-1) = je^{j2\varphi_v} \\ \mathbf{G}_{2qa}(g+k+1, g+k+3) = -je^{-j2\varphi_v} \end{cases} \quad (A3)$$

二倍从  $dq$  坐标系到  $abc$  坐标系

$$\begin{cases} \mathbf{G}_{a2d}(g+k+1, g+k-1) = e^{j2\varphi_v} / 2 \\ \mathbf{G}_{a2d}(g+k+1, g+k+3) = e^{-j2\varphi_v} / 2 \\ \mathbf{G}_{a2q}(g+k+1, g+k-1) = j e^{j2\varphi_v} / 2 \\ \mathbf{G}_{a2q}(g+k+1, g+k+3) = -j e^{-j2\varphi_v} / 2 \end{cases} \quad (\text{A4})$$

差模、共模和零序矩阵

$$\begin{cases} \mathbf{A}_d = \frac{1}{2} \text{diag}[\{1 + (-1)^k\}_{k=-g, \dots, g}] \\ \mathbf{A}_c = \frac{1}{2} \text{diag}[\{1 - (-1)^k\}_{k=-g, \dots, g}] \\ \mathbf{A}_0 = \frac{1}{2} \text{diag}[\{\frac{1 - (-1)^k}{2} \cdot (1 - |\text{mod}(k+1, 3)|)\}_{k=-g, \dots, g}] \end{cases} \quad (\text{A5})$$

2) DCT 控制相关传递函数矩阵。

通用延时传递函数矩阵:

$$\mathbf{G}_{\text{del}} = \text{diag}[\{e^{-(j2\pi(f_p + kf)T_{\text{del}})}\}_{k=-g, \dots, g}] \quad (\text{A6})$$

DCT 的 PI 控制器传递函数矩阵:

$$\begin{cases} \mathbf{H}_{\text{idq}0Z} = \text{diag}[\{K_{\text{pi}Z} + K_{\text{ii}Z} / (s + j2\pi k f_s)\}_{k=-g, \dots, g}] \\ \mathbf{H}_{\text{vc}Z} = \text{diag}[\{K_{\text{pvc}Z} + K_{\text{ivc}Z} / (s + j2\pi k f_s)\}_{k=-g, \dots, g}] \\ \mathbf{H}_{\text{vdcL}} = \text{diag}[\{K_{\text{pvdcl}} + K_{\text{ivdcl}} / (s + j2\pi k f_s)\}_{k=-g, \dots, g}] \end{cases} \quad (\text{A7})$$

H、W 和 L 桥臂控制传递函数矩阵:

$$\begin{cases} \mathbf{G}_{\text{iH}} = \mathbf{G}_{\text{ad}}(\mathbf{H}_{\text{idqH}} \mathbf{G}_{\text{da}} \mathbf{G}_{\text{del}} + K_{\text{dH}} \mathbf{G}_{\text{da}} \mathbf{G}_{\text{del}}) - \mathbf{G}_{\text{aq}}(\mathbf{H}_{\text{idqH}} \mathbf{G}_{\text{qa}} \mathbf{G}_{\text{del}} - K_{\text{dH}} \mathbf{G}_{\text{qa}} \mathbf{G}_{\text{del}}) \\ \mathbf{G}_{\text{vcH}} = -\mathbf{G}_{\text{ad}} \mathbf{H}_{\text{idqH}} \mathbf{A}_0 \mathbf{H}_{\text{vcH}} \mathbf{G}_{\text{del}} \\ \mathbf{G}_{\text{vWH}} = \mathbf{G}_{\text{ad}}(-K_{\text{dcH}} \mathbf{G}_{\text{da}} \mathbf{G}_{\text{del}}) - \mathbf{G}_{\text{aq}}(-K_{\text{dcH}} \mathbf{G}_{\text{qa}} \mathbf{G}_{\text{del}}) \\ \mathbf{G}_{\text{iW}} = \mathbf{G}_{\text{ad}}(\mathbf{H}_{\text{idqW}} \mathbf{G}_{\text{da}} \mathbf{G}_{\text{del}} + K_{\text{dW}} \mathbf{G}_{\text{da}} \mathbf{G}_{\text{del}}) - \mathbf{G}_{\text{aq}}(\mathbf{H}_{\text{idqW}} \mathbf{G}_{\text{qa}} \mathbf{G}_{\text{del}} - K_{\text{dW}} \mathbf{G}_{\text{qa}} \mathbf{G}_{\text{del}}) \\ \mathbf{G}_{\text{vW}} = \mathbf{G}_{\text{ad}}(-\mathbf{H}_{\text{idqW}} \mathbf{H}_{\text{vdqW}} \mathbf{G}_{\text{da}} \mathbf{G}_{\text{del}} + K_{\text{dcW}} \mathbf{G}_{\text{da}} \mathbf{G}_{\text{del}}) - \mathbf{G}_{\text{aq}}(-\mathbf{H}_{\text{idqW}} \mathbf{H}_{\text{vdqW}} \mathbf{G}_{\text{qa}} \mathbf{G}_{\text{del}} + K_{\text{dcW}} \mathbf{G}_{\text{qa}} \mathbf{G}_{\text{del}}) \end{cases} \quad (\text{A8})$$

$$\begin{cases} \mathbf{G}_{\text{iL}} = \mathbf{G}_{\text{ad}}(\mathbf{H}_{\text{idqL}} \mathbf{G}_{\text{da}} \mathbf{G}_{\text{del}} + K_{\text{dL}} \mathbf{G}_{\text{da}} \mathbf{G}_{\text{del}}) - \mathbf{G}_{\text{aq}}(\mathbf{H}_{\text{idqL}} \mathbf{G}_{\text{qa}} \mathbf{G}_{\text{del}} - K_{\text{dL}} \mathbf{G}_{\text{qa}} \mathbf{G}_{\text{del}}) + \mathbf{H}_{\text{i0L}} \mathbf{G}_{\text{0a}} \mathbf{G}_{\text{del}} \\ \mathbf{G}_{\text{vcL}} = \mathbf{G}_{\text{ad}} \mathbf{H}_{\text{idq0L}} \mathbf{A}_0 \mathbf{H}_{\text{vcL}} \mathbf{G}_{\text{del}} \\ \mathbf{G}_{\text{vWL}} = \mathbf{G}_{\text{ad}}(K_{\text{dcl}} \mathbf{G}_{\text{da}} \mathbf{G}_{\text{del}}) - \mathbf{G}_{\text{aq}}(K_{\text{dcl}} \mathbf{G}_{\text{qa}} \mathbf{G}_{\text{del}}) + K_{\text{dcl}} \mathbf{G}_{\text{0a}} \mathbf{G}_{\text{del}} \\ \mathbf{G}_{\text{vdcL}} = \mathbf{H}_{\text{i0L}} \mathbf{H}_{\text{vdcL}} \mathbf{A}_0 \mathbf{G}_{\text{del}} - \mathbf{A}_0 K_{\text{dcl}} \end{cases} \quad (\text{A9})$$

3) DCT 阻抗建模。

$$\begin{cases} \mathbf{P}_1 = \begin{pmatrix} \mathbf{Z}_{\text{pLH}} + \mathbf{M}_{\text{aH0T}} \mathbf{Z}_{\text{pCH}} \mathbf{M}_{\text{aH0T}} + \mathbf{Z}_{\text{pLW}} + \\ \mathbf{M}_{\text{aW0T}} \mathbf{Z}_{\text{pCW}} \mathbf{M}_{\text{aW0T}} \end{pmatrix} \\ \mathbf{P}_2 = (-\mathbf{Z}_{\text{pLW}} - \mathbf{M}_{\text{aW0T}} \mathbf{Z}_{\text{pCW}} \mathbf{M}_{\text{aW0T}}) \\ \mathbf{P}_3 = (\mathbf{M}_{\text{aH0T}} \mathbf{Z}_{\text{pCH}} \mathbf{I}_{\text{aH0T}} + \mathbf{U}_{\text{caH0T}}) \\ \mathbf{P}_4 = (\mathbf{M}_{\text{aW0T}} \mathbf{Z}_{\text{pCW}} \mathbf{I}_{\text{aW0T}} + \mathbf{U}_{\text{caW0T}}) \end{cases} \quad (\text{A11})$$

$$\begin{cases} \mathbf{Q}_1 = \begin{pmatrix} -\mathbf{Z}_{\text{pLL}} - \mathbf{M}_{\text{aL0T}} \mathbf{Z}_{\text{pCL}} \mathbf{M}_{\text{aL0T}} - \mathbf{Z}_{\text{pLW}} - \\ \mathbf{M}_{\text{aW0T}} \mathbf{Z}_{\text{pCW}} \mathbf{M}_{\text{aW0T}} \end{pmatrix} \\ \mathbf{Q}_2 = (\mathbf{Z}_{\text{pLW}} + \mathbf{M}_{\text{aW0T}} \mathbf{Z}_{\text{pCW}} \mathbf{M}_{\text{aW0T}}) \\ \mathbf{Q}_3 = (-\mathbf{M}_{\text{aL0T}} \mathbf{Z}_{\text{pCL}} \mathbf{I}_{\text{aL0T}} - \mathbf{U}_{\text{caL0T}}) \\ \mathbf{Q}_4 = (\mathbf{M}_{\text{aW0T}} \mathbf{Z}_{\text{pCW}} \mathbf{I}_{\text{aW0T}} + \mathbf{U}_{\text{caW0T}}) \end{cases} \quad (\text{A12})$$

$$\begin{aligned} \mathbf{G}_{\text{maW\_iaW}} = & (\mathbf{E} - \mathbf{G}_{\text{vW}} (\mathbf{M}_{\text{aW0T}} \mathbf{Z}_{\text{pCW}} \mathbf{I}_{\text{aW0T}} + \mathbf{U}_{\text{caW0T}}))^{-1} \cdot \\ & (\mathbf{G}_{\text{iW}} + \mathbf{G}_{\text{vW}} (\mathbf{Z}_{\text{pLW}} + \mathbf{M}_{\text{aW0T}} \mathbf{Z}_{\text{pCW}} \mathbf{M}_{\text{aW0T}})) \end{aligned} \quad (\text{A13})$$

$$\begin{cases} \mathbf{G}_{11} = \mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_4 \mathbf{G}_{\text{maW\_iaW}}; \mathbf{G}_{12} = \mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_4 \mathbf{G}_{\text{maW\_iaW}}; \mathbf{G}_{13} = \mathbf{P}_3 \\ \mathbf{G}_{21} = \mathbf{Q}_1 + \mathbf{Q}_4 \mathbf{G}_{\text{maW\_iaW}}; \mathbf{G}_{22} = \mathbf{Q}_2 - \mathbf{Q}_4 \mathbf{G}_{\text{maW\_iaW}}; \mathbf{G}_{23} = \mathbf{Q}_3 \end{cases} \quad (\text{A14})$$

$$\begin{cases} \mathbf{G}_{30} = \mathbf{E} - \mathbf{G}_{\text{vcH}} \mathbf{Z}_{\text{pCH}} \mathbf{I}_{\text{aH0T}} \\ \mathbf{G}_{31} = \mathbf{G}_{\text{iH}} + \mathbf{G}_{\text{vcH}} \mathbf{Z}_{\text{pCH}} \mathbf{I}_{\text{aH0T}} + \mathbf{G}_{\text{vWH}} (\mathbf{Z}_{\text{pLW}} + \mathbf{M}_{\text{aW0T}} \mathbf{Z}_{\text{pCW}} \mathbf{M}_{\text{aW0T}}) + \mathbf{G}_{\text{vWH}} (\mathbf{M}_{\text{aW0T}} \mathbf{Z}_{\text{pCW}} \mathbf{I}_{\text{aW0T}} + \mathbf{V}_{\text{caW0T}}) \mathbf{G}_{\text{maW\_iaW}} \\ \mathbf{G}_{32} = -\mathbf{G}_{\text{vWH}} (\mathbf{Z}_{\text{pLW}} + \mathbf{M}_{\text{aW0T}} \mathbf{Z}_{\text{pCW}} \mathbf{M}_{\text{aW0T}}) - \mathbf{G}_{\text{vWH}} (\mathbf{M}_{\text{aW0T}} \mathbf{Z}_{\text{pCW}} \mathbf{I}_{\text{aW0T}} + \mathbf{V}_{\text{caW0T}}) \mathbf{G}_{\text{maW\_iaW}} \end{cases} \quad (\text{A15})$$

$$\begin{cases} \mathbf{G}_{40} = \mathbf{E} - \mathbf{G}_{\text{vcL}} \mathbf{Z}_{\text{pCL}} \mathbf{I}_{\text{aL0T}} \\ \mathbf{G}_{41} = \mathbf{G}_{\text{vWL}} (\mathbf{Z}_{\text{pLW}} + \mathbf{M}_{\text{aW0T}} \mathbf{Z}_{\text{pCW}} \mathbf{M}_{\text{aW0T}}) + \mathbf{G}_{\text{vWL}} (\mathbf{M}_{\text{aW0T}} \mathbf{Z}_{\text{pCW}} \mathbf{I}_{\text{aW0T}} + \mathbf{U}_{\text{caW0T}}) \mathbf{G}_{\text{maW\_iaW}} \\ \mathbf{G}_{42} = \mathbf{G}_{\text{iL}} + \mathbf{G}_{\text{vcL}} \mathbf{Z}_{\text{pCL}} \mathbf{I}_{\text{aL0T}} - \mathbf{G}_{\text{vWL}} (\mathbf{Z}_{\text{pLW}} + \mathbf{M}_{\text{aW0T}} \mathbf{Z}_{\text{pCW}} \mathbf{M}_{\text{aW0T}}) - \mathbf{G}_{\text{vWL}} (\mathbf{M}_{\text{aW0T}} \mathbf{Z}_{\text{pCW}} \mathbf{I}_{\text{aW0T}} + \mathbf{U}_{\text{caW0T}}) \mathbf{G}_{\text{maW\_iaW}} \\ \mathbf{G}_{43} = \mathbf{G}_{\text{vdcL}} \end{cases} \quad (\text{A16})$$

$$\begin{cases} \mathbf{G}_{\text{maL\_iaH}} = \left( \mathbf{G}_{40} - (\mathbf{G}_{42} + \mathbf{G}_{43} \mathbf{G}_{\text{vdcL\_iaL}}) \right)^{-1} \cdot \left( \mathbf{G}_{\text{vdcL\_iaL}} - \mathbf{G}_{22} \right)^{-1} \mathbf{G}_{23} \\ \left( \mathbf{G}_{42} + \mathbf{G}_{43} \mathbf{G}_{\text{vdcL\_iaL}} \right) \\ \left( \mathbf{G}_{\text{vdcL\_iaL}} - \mathbf{G}_{22} \right)^{-1} \mathbf{G}_{21} + \mathbf{G}_{41} \\ \mathbf{G}_{\text{iaL\_iaH}} = (\mathbf{G}_{\text{vdcL\_iaL}} - \mathbf{G}_{22})^{-1} (\mathbf{G}_{23} \mathbf{G}_{\text{maL\_iaH}} + \mathbf{G}_{21}) \\ \mathbf{G}_{\text{maH\_iaH}} = \mathbf{G}_{30}^{-1} (\mathbf{G}_{31} + \mathbf{G}_{\text{iaL\_iaH}} \mathbf{G}_{32}) \end{cases} \quad (\text{A17})$$

$$\begin{cases} \mathbf{G}_{\text{maH\_iaL}} = (\mathbf{G}_{30} - \mathbf{G}_{31}(\mathbf{G}_{\text{vdcH\_iaH}} - \mathbf{G}_{11})^{-1}\mathbf{G}_{13})^{-1} \cdot \\ \quad (\mathbf{G}_{31}(\mathbf{G}_{\text{vdcH\_iaH}} - \mathbf{G}_{11})^{-1}\mathbf{G}_{12} + \mathbf{G}_{32}) \\ \mathbf{G}_{\text{maL\_iaL}} = (\mathbf{G}_{40} - \mathbf{G}_{43}\mathbf{G}_{23})^{-1} \cdot \\ \quad ((\mathbf{G}_{41} + \mathbf{G}_{43}\mathbf{G}_{21})\mathbf{G}_{\text{iaH\_iaL}} + \mathbf{G}_{42} + \mathbf{G}_{43}\mathbf{G}_{22}) \end{cases} \quad \hat{\mathbf{u}}_{\text{ag}} = \mathbf{Z}_{\text{g}}\hat{\mathbf{i}}_{\text{ag}} \quad (\text{A25})$$

$\mathbf{Z}_{\text{g}}$  为电网阻抗矩阵。

PI 控制器传递函数矩阵

$$\begin{cases} \mathbf{H}_{\text{ig}} = \text{diag}[\{K_{\text{pg}} + K_{\text{ig}} / (s + j2\pi k f_1)\}_{k=-g, \dots, g}] \\ \mathbf{H}_{\text{icg}} = \text{diag}[\{K_{\text{pcg}} + K_{\text{icg}} / (s + j2\pi k f_1)\}_{k=-g, \dots, g}] \\ \mathbf{H}_{\text{vdcg}} = \text{diag}[\{K_{\text{pvdcg}} + K_{\text{ivdcg}} / (s + j2\pi k f_1)\}_{k=-g, \dots, g}] \\ \mathbf{H}_{\text{PLL}} = \text{diag}[\{K_{\text{ppl}} + K_{\text{ipl}} / (s + j2\pi k f_1)\}_{k=-g, \dots, g}] \\ T_{\text{PLL}} = \mathbf{H}_{\text{PLL}}(g+1, g+1) / (1 + U_1 \mathbf{H}_{\text{PLL}}(g+1, g+1) + 1) \end{cases} \quad (\text{A26})$$

4) DCT 低压端口耦合阻抗。

发电机端口交流电压、电流传递函数

$$\begin{cases} \mathbf{G}_{\text{var\_iar}}(g-1, g-1) = \frac{L_d + L_q}{2}(s - j2\pi f_r) \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \\ \mathbf{G}_{\text{var\_iar}}(g+1, g+1) = \frac{L_d + L_q}{2}(s + j2\pi f_r) \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \end{cases} \quad (\text{A19})$$

PI 控制器传递函数矩阵

$$\begin{cases} \mathbf{H}_{\text{ir}} = \text{diag}[\{K_{\text{pr}} + K_{\text{ir}} / (s + j2\pi k f_r)\}_{k=-g, \dots, g}] \\ \mathbf{H}_{\text{icr}} = \text{diag}[\{K_{\text{picr}} + K_{\text{icr}} / (s + j2\pi k f_r)\}_{k=-g, \dots, g}] \\ \mathbf{H}_{\text{pr}} = \text{diag}[\{K_{\text{ppr}} + K_{\text{ipr}} / (s + j2\pi k f_r)\}_{k=-g, \dots, g}] \end{cases} \quad (\text{A20})$$

$$\begin{cases} \mathbf{G}_{\text{pr}} = \mathbf{G}_{\text{ad}} \begin{pmatrix} -\mathbf{H}_{\text{ir}} \mathbf{G}_{\text{da}} \mathbf{A}_d \mathbf{G}_{\text{del}} \\ -\mathbf{K}_{\text{dr}} \mathbf{G}_{\text{qa}} \mathbf{A}_d \mathbf{G}_{\text{del}} \end{pmatrix} - \\ \mathbf{G}_{\text{aq}} \begin{pmatrix} -\frac{3}{2} \begin{pmatrix} U_{\text{qr0}} \mathbf{G}_{\text{qa}} \mathbf{A}_d \mathbf{G}_{\text{del}} + \\ I_{\text{qr0}} \mathbf{G}_{\text{qa}} \mathbf{G}_{\text{del}} \mathbf{G}_{\text{qa}} \end{pmatrix} \mathbf{H}_{\text{pr}} \mathbf{H}_{\text{ir}} - \\ \mathbf{H}_{\text{ir}} \mathbf{G}_{\text{qa}} \mathbf{A}_d \mathbf{G}_{\text{del}} + \mathbf{K}_{\text{dr}} \mathbf{G}_{\text{da}} \mathbf{A}_d \mathbf{G}_{\text{del}} \end{pmatrix} \\ \mathbf{G}_{\text{cirr}} = \mathbf{G}_{\text{a2d}}(-\mathbf{H}_{\text{icr}} \mathbf{G}_{\text{2da}} \mathbf{G}_{\text{del}} + \mathbf{K}_{\text{2dr}} \mathbf{G}_{\text{2qa}} \mathbf{G}_{\text{del}}) + \\ \mathbf{G}_{\text{a2q}}(-\mathbf{H}_{\text{icr}} \mathbf{G}_{\text{2qa}} \mathbf{G}_{\text{del}} - \mathbf{K}_{\text{2dr}} \mathbf{G}_{\text{2da}} \mathbf{G}_{\text{del}}) \end{cases} \quad (\text{A21})$$

机侧 MMC 端口阻抗

$$\mathbf{Z}_{\text{dcr}} = \frac{1}{\mathbf{Y}_{\text{dcr}}} \quad (\text{A22})$$

其中

$$\mathbf{Y}_{\text{dcr}} = 3\mathbf{A}_0 \begin{pmatrix} \mathbf{Z}_{\text{pLr}} + (\mathbf{E} - \mathbf{A}_0) \mathbf{M}_{\text{aur0T}} \mathbf{Z}_{\text{pCr}} \mathbf{M}_{\text{aur0T}} + \\ \mathbf{G}_{\text{var\_iar}} \mathbf{A}_d (\mathbf{U}_{\text{aur0T}} + \mathbf{M}_{\text{aur0T}} \mathbf{Z}_{\text{pCr}} \mathbf{I}_{\text{aur0T}}) \\ (\mathbf{G}_{\text{pr}} + \mathbf{G}_{\text{cirr}}) \end{pmatrix}^{-1} \quad (\text{A23})$$

汇集线路采用  $\pi$  型等效，有

$$\mathbf{Z}_{\text{WFL}} = \frac{1}{n_p} / \left( 1 / \left( \frac{\mathbf{Y}_{\text{dcr}}}{n_s} + \mathbf{Y}_{\text{ClineL}} \right) + \mathbf{Y}_{\text{ClineL}} \right) + \mathbf{Z}_{\text{Ldc}} \quad (\text{A24})$$

其中  $\mathbf{Y}_{\text{ClineL}}$  为汇集线路等效电容导纳， $\mathbf{Z}_{\text{ClineL}}$  为汇集线路等效电抗， $\mathbf{Z}_{\text{Ldc}}$  为直流电抗器等效阻抗。

5) DCT 高压端口耦合阻抗。

岸上 MMC 交流端口电压电流传递函数关系：

$$\begin{cases} \mathbf{\Gamma}_1 = \mathbf{Z}_{\text{pLg}} + (\mathbf{E} - \mathbf{A}_0) \mathbf{M}_{\text{aug0T}} \mathbf{Z}_{\text{pCg}} \mathbf{M}_{\text{aug0T}} \\ \mathbf{\Gamma}_2 = (\mathbf{E} - \mathbf{A}_0) (\mathbf{M}_{\text{aug0T}} \mathbf{Z}_{\text{pCg}} \mathbf{I}_{\text{aug0T}} + \mathbf{U}_{\text{aug0T}}) (\mathbf{G}_{\text{ig}} + \mathbf{G}_{\text{cirg}}) \\ \mathbf{\Gamma}_3 = ((\mathbf{E} - \mathbf{A}_0) \begin{pmatrix} \mathbf{M}_{\text{aug0T}} \mathbf{Z}_{\text{pC}} \mathbf{I}_{\text{au0T}} + \\ \mathbf{V}_{\text{aug0T}} \end{pmatrix} \mathbf{G}_{\text{vg}} + \mathbf{E}) \mathbf{Z}_{\text{g}} \mathbf{A}_d \\ \mathbf{\Gamma}_4 = \frac{\mathbf{E}}{2} + (\mathbf{A}_0 - \mathbf{E}) (\mathbf{M}_{\text{aug0T}} \mathbf{Z}_{\text{pC}} \mathbf{I}_{\text{aug0T}} + \mathbf{U}_{\text{aug0T}}) \mathbf{G}_{\text{vdcg}} \end{cases} \quad (\text{A27})$$

$$\begin{cases} \mathbf{G}_{\text{vdcg}} = -\mathbf{G}_{\text{ad}} \mathbf{H}_{\text{vdcg}} \mathbf{G}_{\text{del}} \mathbf{H}_{\text{ig}} \\ \mathbf{G}_{\text{ig}} = \mathbf{G}_{\text{ad}} (\mathbf{G}_{\text{da}} \mathbf{G}_{\text{del}} \mathbf{A}_d \mathbf{H}_{\text{ig}} + \mathbf{K}_{\text{dg}} \mathbf{G}_{\text{qa}} \mathbf{G}_{\text{del}} \mathbf{A}_d) + \\ \mathbf{G}_{\text{aq}} (-\mathbf{G}_{\text{qa}} \mathbf{G}_{\text{del}} \mathbf{A}_d \mathbf{H}_{\text{ig}} + \mathbf{K}_{\text{dg}} \mathbf{G}_{\text{da}} \mathbf{G}_{\text{del}} \mathbf{A}_d) \\ \mathbf{G}_{\text{vg}} = \mathbf{G}_{\text{ad}} (\mathbf{G}_{\text{idvas}} \mathbf{G}_{\text{del}} \mathbf{H}_{\text{ig}} + \mathbf{K}_{\text{dg}} \mathbf{G}_{\text{iqvas}} \mathbf{G}_{\text{del}} - \mathbf{K}_{\text{fg}} \mathbf{G}_{\text{da}} \mathbf{G}_{\text{del}}) + \\ \mathbf{G}_{\text{aq}} (-\mathbf{G}_{\text{iqvas}} \mathbf{G}_{\text{del}} \mathbf{H}_{\text{ig}} + \mathbf{K}_{\text{dg}} \mathbf{G}_{\text{idvas}} \mathbf{G}_{\text{del}} + \mathbf{K}_{\text{fg}} \mathbf{G}_{\text{vqvas}} \mathbf{G}_{\text{del}}) + \\ \mathbf{G}_{\text{a2d}} (-\mathbf{G}_{\text{i2dvas}} \mathbf{G}_{\text{del}} \mathbf{H}_{\text{ig}} + 2\mathbf{K}_{\text{dg}} \mathbf{G}_{\text{i2qvas}} \mathbf{G}_{\text{del}}) - \\ \mathbf{G}_{\text{a2q}} (-\mathbf{G}_{\text{i2qvas}} \mathbf{G}_{\text{del}} \mathbf{H}_{\text{ig}} - 2\mathbf{K}_{\text{dg}} \mathbf{G}_{\text{i2dvas}} \mathbf{G}_{\text{del}}) + \mathbf{G}_{\text{ma\_vas}} \\ \mathbf{G}_{\text{cirg}} = \mathbf{G}_{\text{a2d}} (\mathbf{G}_{\text{2da}} \mathbf{G}_{\text{del}} \mathbf{H}_{\text{icrg}} - 2\mathbf{K}_{\text{dg}} \mathbf{G}_{\text{2qa}} \mathbf{G}_{\text{del}}) - \\ \mathbf{G}_{\text{a2q}} (-\mathbf{G}_{\text{2qa}} \mathbf{G}_{\text{del}} \mathbf{H}_{\text{icrg}} - 2\mathbf{K}_{\text{dg}} \mathbf{G}_{\text{2da}} \mathbf{G}_{\text{del}}) \end{cases} \quad (\text{A28})$$

其中， $\mathbf{G}_{\text{idvas}}$ 、 $\mathbf{G}_{\text{iqvas}}$ 、 $\mathbf{G}_{\text{vqvas}}$ 、 $\mathbf{G}_{\text{ma\_vas}}$  均由锁相环引起，具体如下：

$$\begin{cases} \mathbf{G}_{\text{idvas}}(g+1, g) = T_{\text{PLL}} (e^{-j\varphi_v} I_1 - e^{j\varphi_v} I_1^*) e^{j\varphi_v} \\ \mathbf{G}_{\text{idvas}}(g+1, g+2) = -T_{\text{PLL}} (e^{-j\varphi_v} I_1 - e^{j\varphi_v} I_1^*) e^{-j\varphi_v} \\ \mathbf{G}_{\text{iqvas}}(g+1, g) = -jT_{\text{PLL}} (e^{-j\varphi_v} I_1 + e^{j\varphi_v} I_1^*) e^{j\varphi_v} \\ \mathbf{G}_{\text{iqvas}}(g+1, g+2) = jT_{\text{PLL}} (e^{-j\varphi_v} I_1 + e^{j\varphi_v} U_1^*) e^{-j\varphi_v} \\ \mathbf{G}_{\text{vqvas}}(g+1, g) = -jT_{\text{PLL}} (e^{-j\varphi_v} U_1 + e^{j\varphi_v} U_1^*) e^{j\varphi_v} \\ \mathbf{G}_{\text{vqvas}}(g+1, g+2) = jT_{\text{PLL}} (e^{-j\varphi_v} U_1 + e^{j\varphi_v} U_1^*) e^{-j\varphi_v} \\ \mathbf{G}_{\text{ma\_vas}}(g, g) = -T_{\text{PLL}} e^{j\varphi_v} M_1^* e^{j\varphi_v} \\ \mathbf{G}_{\text{ma\_vas}}(g, g+2) = T_{\text{PLL}} e^{j\varphi_v} M_1^* e^{-j\varphi_v} \\ \mathbf{G}_{\text{ma\_vas}}(g+2, g) = T_{\text{PLL}} e^{-j\varphi_v} M_1 e^{j\varphi_v} \\ \mathbf{G}_{\text{ma\_vas}}(g+2, g+2) = -T_{\text{PLL}} e^{-j\varphi_v} M_1 e^{-j\varphi_v} \end{cases} \quad (\text{A29})$$

岸上 MMC 直流端口阻抗

$$Z_{dcC} = \frac{1}{Y_{dcC}} \quad (A30)$$

其中,  $Y_{dcC}$  为岸上 MMC 直流端口导纳

$$Y_{dcC} = \frac{1}{3A_0(F_1 + F_2 + F_3)^{-1}F_4} \quad (A31)$$

高压直流线路采用  $\pi$  型等效, 有

$$Z_{CL} = 1 / (1 / (1 / (Y_{dcC} + Y_{ClineH}) + 2Z_{ClineH}) + Y_{ClineH}) \quad (A32)$$

其中  $Y_{ClineH}$  为高压直流线路等效电容导纳,

$Z_{ClineH}$  为高压直流线路等效电抗。

## 附录 B

表 B1 DCT 参数

Table B1 Parameters of DCT

参数	定义	数值
$S_D$	容量	1000MW
$f_s$	交流工作频率	200Hz
$u_{dcHref}/u_{dcLref}$	DCT 高、低压直流电压参考值	640kV/200kV
$u_{cHref}/u_{cLref}$	H、L 桥臂全局电压参考值	444kV/320kV
$L_{armZ}$	H、W、L 桥臂电感	6.3mH
$R_{armZ}$	H、W、L 桥臂电阻	0.2 $\Omega$
$C_{armZ}$	H、W、L 桥臂子模块电容	10mF
$N_Z$	H、W、L 桥臂子模块数	222/260/160
$K_{pvctH}/K_{ivctH}$	H 桥臂全局电压控制比例/积分	$4.40 \times 10^{-3}/3.68 \times 10^{-2}$
$K_{piH}/K_{iiH}$	H 桥臂交流环流控制比例/积分	$3 \times 10^{-4}/4.3 \times 10^{-1}$
$K_{dH}$	H 桥臂交流环流解耦系数	$2.23 \times 10^{-5}$
$K_{fH}$	H 桥臂交流电压前馈系数	$1.21 \times 10^{-6}$
$K_{pvW}/K_{ivW}$	W 桥臂交流电压控制比例/积分	$7.1 \times 10^{-3}/6.67 \times 10^{-1}$
$K_{piW}/K_{iiW}$	W 桥臂交流环流比例/积分	$3 \times 10^{-4}/4.3 \times 10^{-1}$
$K_{dW}$	W 桥臂交流环流解耦系数	$1.9 \times 10^{-5}$
$K_{fW}$	W 桥臂交流电压前馈系数	$9.61 \times 10^{-7}$
$K_{pvctL}/K_{ivctL}$	L 桥臂全局电压控制比例/积分	$4.30 \times 10^{-3}/3.63 \times 10^{-2}$
$K_{piL}/K_{iiL}$	L 桥臂交流环流控制比例/积分	$3 \times 10^{-4}/4.3 \times 10^{-1}$
$K_{pvdcL}/K_{ivdcL}$	L 桥臂直流电压控制比例/积分	$1.11 \times 10^{-2}/9.35 \times 10^{-2}$
$K_{pi0L}/K_{ii0L}$	L 桥臂直流电流控制比例/积分	$1.5 \times 10^{-4}/2.3 \times 10^{-1}$
$K_{dL}$	L 桥臂交流环流解耦系数	$6.03 \times 10^{-5}$
$K_{fL}$	L 桥臂交流电压前馈系数	$3.05 \times 10^{-6}$

表 B2 直流风电机组参数

Table B2 Parameters of DC wind turbine

参数	定义	数值
$S_{WF}$	容量	10MW
$u_{dcref}$	机组端口直流电压参考值	20kV
$n_1:n_2$	变压器变比	1.38kV:10.6kV
$f_r$	额定工作频率	96Hz
$L_{armr}$	桥臂电感	7mH
$R_{armr}$	桥臂电阻	0.2 $\Omega$
$C_{armr}$	子模块电容	2.7mF
$N_M$	桥臂子模块数量	22
$L_d/L_q$	发电机电感	0.1mH
$K_{ppr}/K_{ipr}$	有功功率控制比例/积分	$4.44 \times 10^{-5}/2.8 \times 10^{-3}$
$K_{pir}/K_{iir}$	交流电流控制比例/积分	$4.24 \times 10^{-4}/1.43 \times 10^{-1}$
$K_{picr}/K_{iicr}$	环流控制比例/积分	$1.70 \times 10^{-4}/1.14 \times 10^{-2}$
$K_{dr}$	交流电流解耦系数	$2.11 \times 10^{-4}$
$K_{2dr}$	环流解耦系数	$4.22 \times 10^{-4}$

表 B3 岸上 MMC 参数

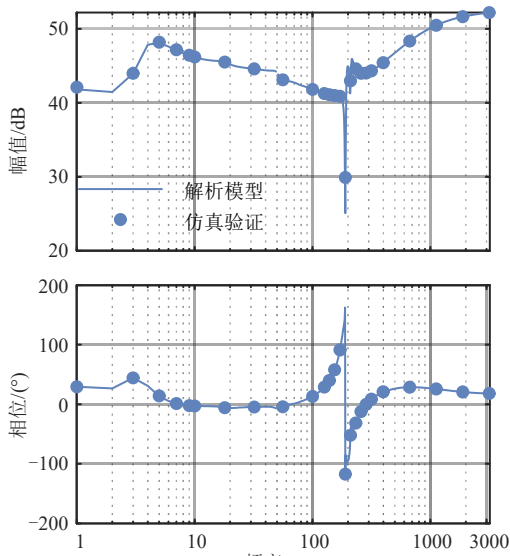
Table B3 Parameters of onshore MMC

参数	定义	数值
$S$	容量	1000MW
$U_1$	交流线电压	300kV
$f_1$	额定工作频率	50Hz
$u_{dcgref}$	高压直流电压参考值	640kV
$L_{armg}$	桥臂电感	50mH
$R_{armg}$	桥臂电阻	0.2 $\Omega$
$C_{armg}$	子模块电容	10mF
$N_N$	桥臂子模块数量	250
$K_{pvdcg}/K_{ivdcg}$	直流电压控制比例/积分	$1.36 \times 10^{-2}/1.05$
$K_{pig}/K_{iig}$	交流电流控制比例/积分	$4.74 \times 10^{-5}/8.00 \times 10^{-3}$
$K_{picg}/K_{iicg}$	环流控制比例/积分	$4.24 \times 10^{-4}/1.43 \times 10^{-1}$
$K_{pPLL}/K_{iPLL}$	锁相环比例/积分	$1.81 \times 10^{-4}/1.14 \times 10^{-2}$
$K_{dg}$	交流电流解耦系数	$7.81 \times 10^{-7}$
$K_{fg}$	交流电压前馈系数	$2.45 \times 10^{-5}$

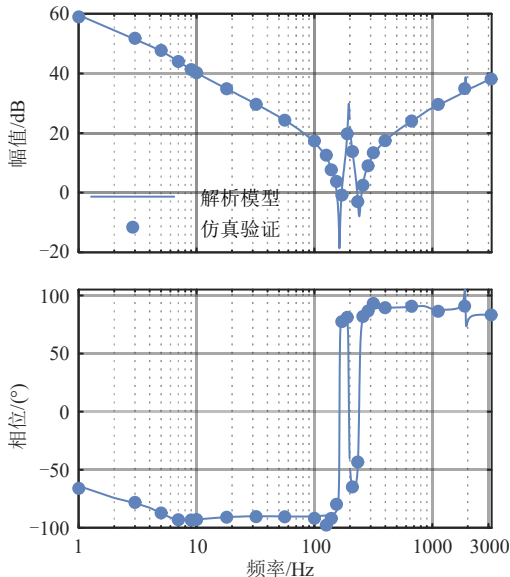
表 B4 线路参数

Table B4 Parameters of line

参数	定义	数值
$L_{enH}$	直流线路长度	100km
$L_{lineH}$	直流线路单位等效电感	$0.14 \times 10^{-3}$ H/km
$R_{lineH}$	直流线路单位等效电阻	0.01 $\Omega$ /km
$C_{lineH}$	直流线路单位等效电容	$0.25 \times 10^{-6}$ F/km
$L_{enL}$	汇集线路长度	14.7km
$L_{lineL}$	汇集线路单位等效电感	$0.99 \times 10^{-3}$ H/km
$R_{lineL}$	汇集线路单位等效电阻	0.09 $\Omega$ /km
$C_{lineL}$	汇集线路单位等效电容	$0.175 \times 10^{-6}$ F/km
$L_{dc}$	直流电抗器	10mH



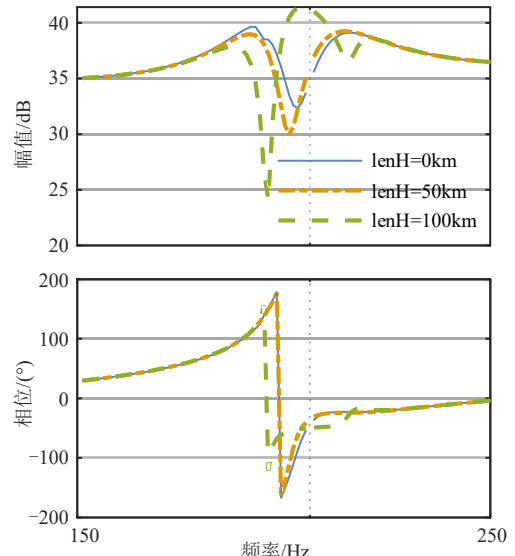
(a) 汇集端口



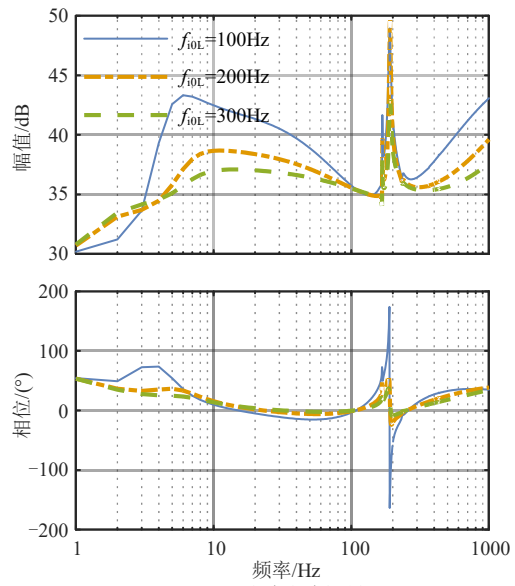
(b) 送出端口

图 B1 汇集、送出端口阻抗模型校核

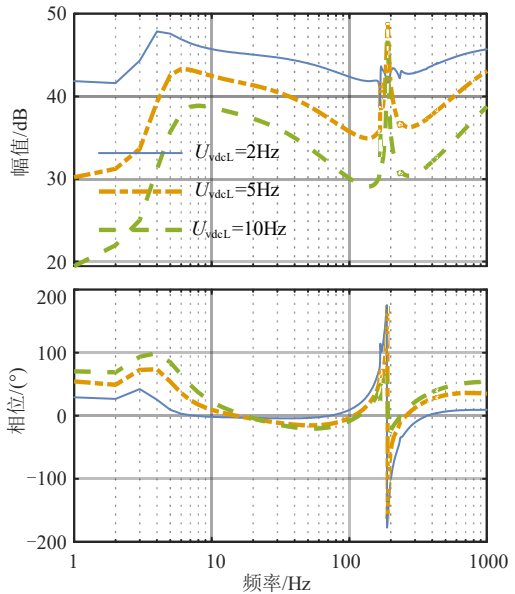
Fig. B1 Validation results of analytical model at collection and transmission port



(a) 高压直流线路



(b) 直流电流控制



(c) 直流电压控制

图 B2 汇集端口阻抗特性

Fig. B2 Impedance characteristics of collection port

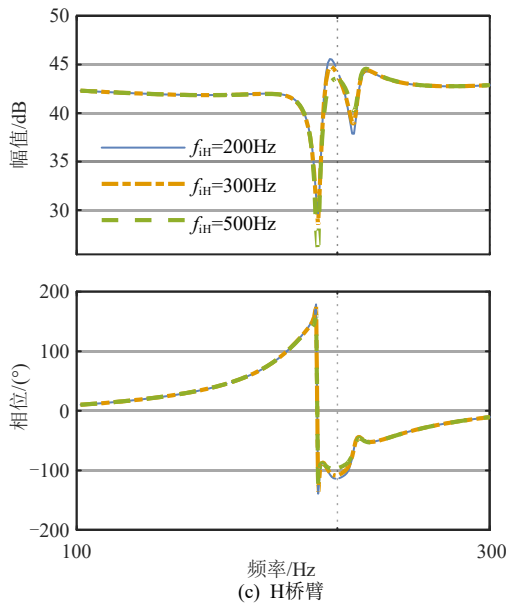
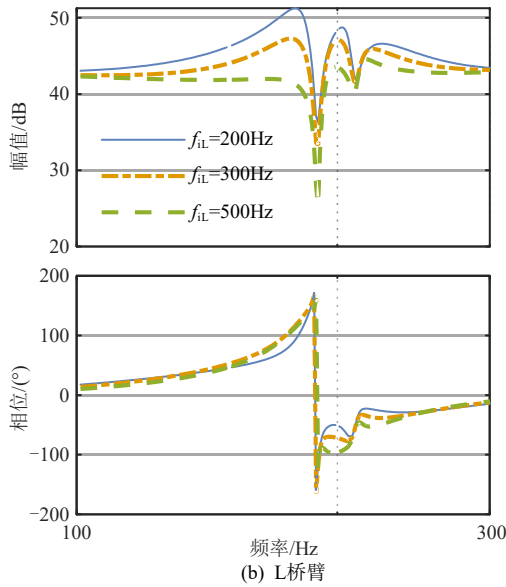
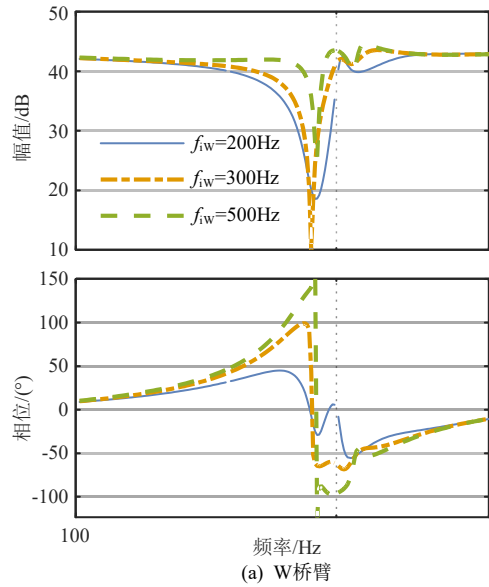


图 B3 交流环流控制对汇集端口阻抗特性的影响  
 Fig. B3 Impedance characteristics of collection port by AC circulation current control

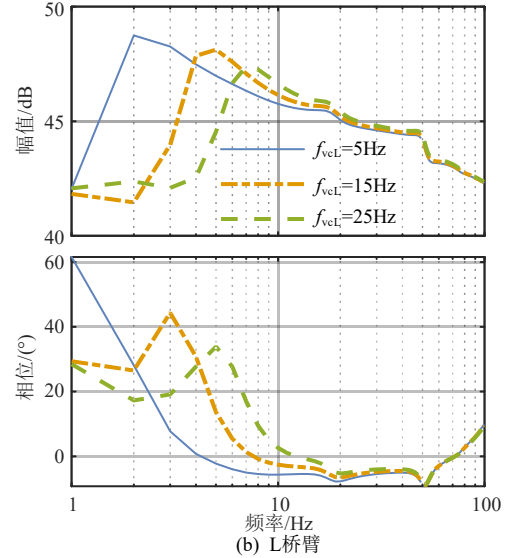
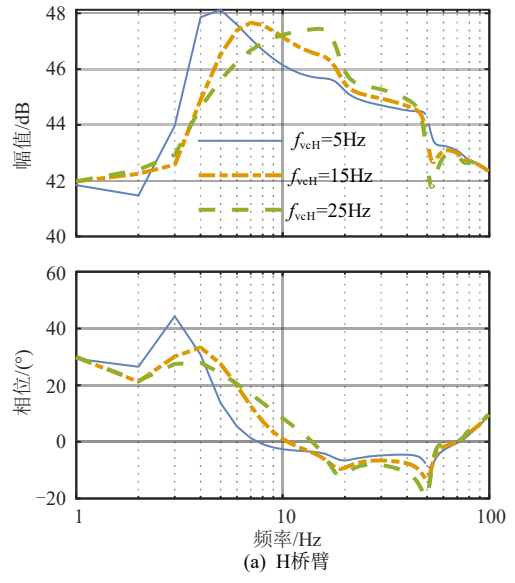


图 B4 全局电压控制对汇集端口阻抗特性的影响  
 Fig. B4 Impedance characteristics of collection port by global voltage control

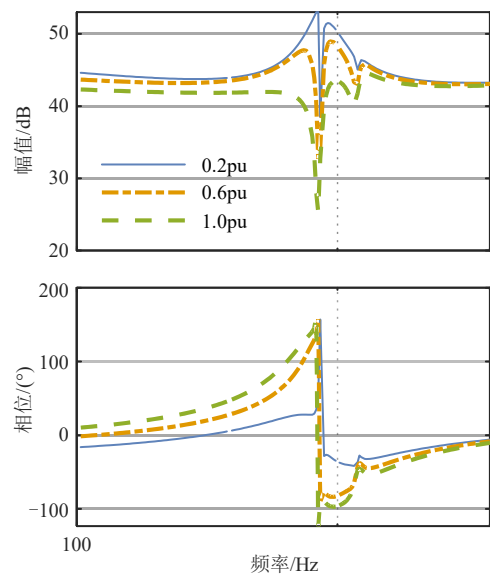


图 B5 风电场出力对汇集端口阻抗特性的影响  
 Fig. B5 Impedance characteristics of transmission port by active power

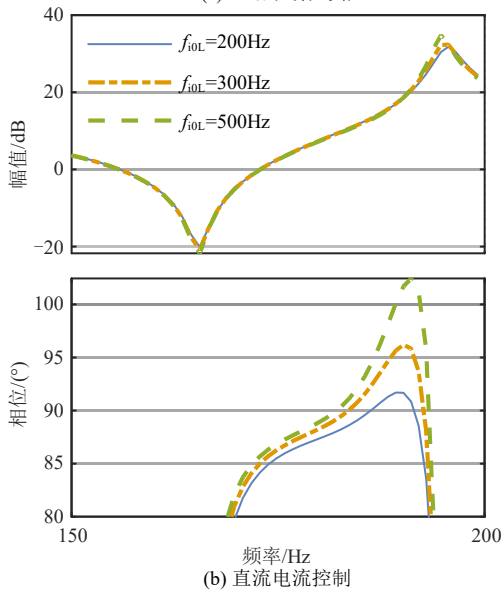
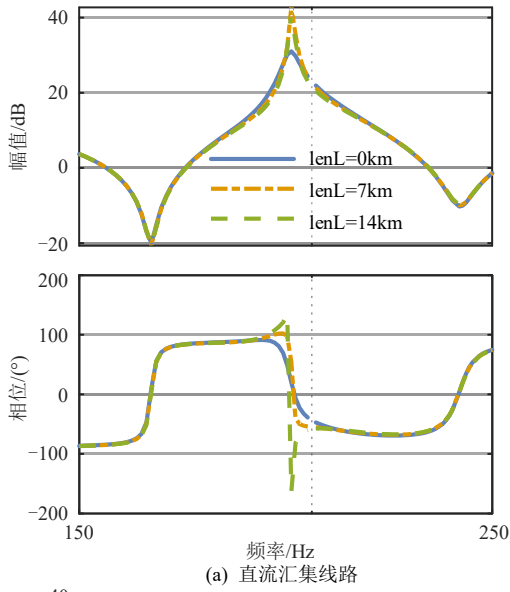


图 B6 送出端口阻抗特性

Fig. B6 Impedance characteristics of transmission port

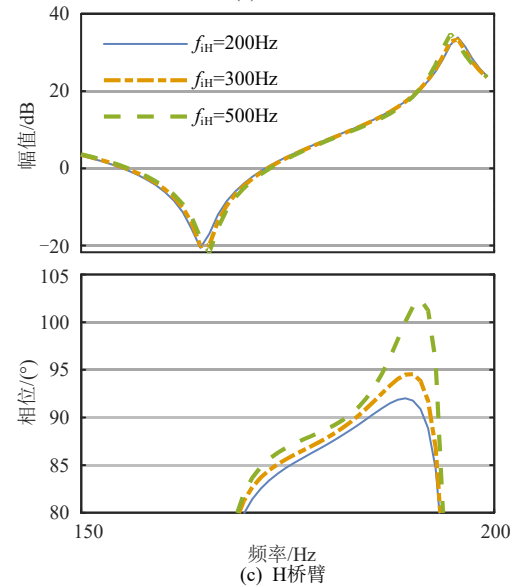
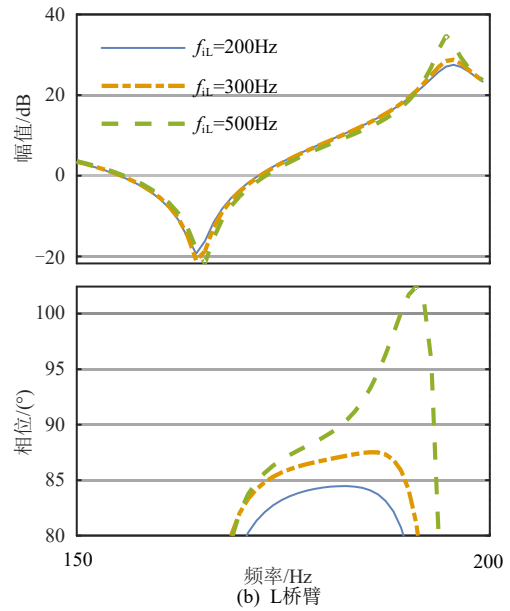
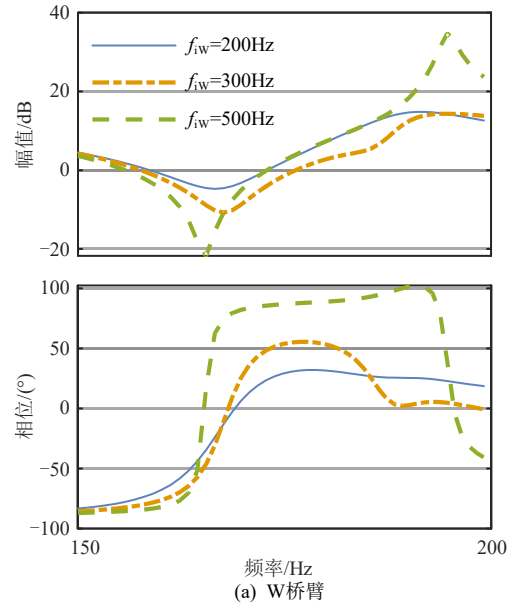
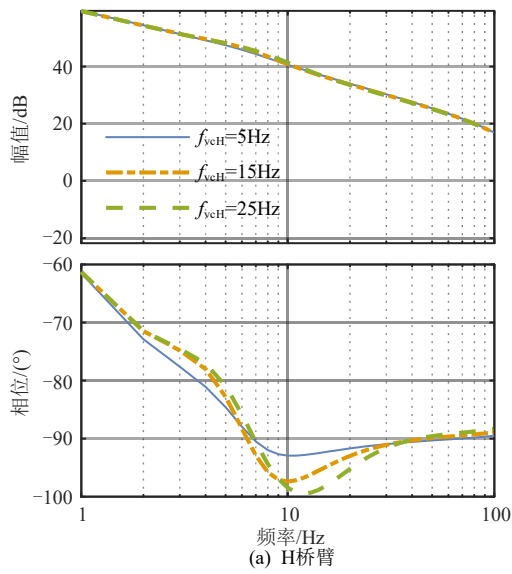
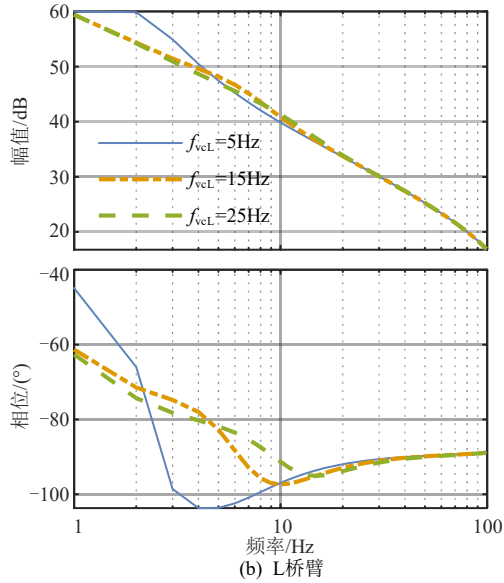


图 B7 交流环流控制对送出端口阻抗特性的影响

Fig. B7 Impedance characteristics of transmission port by AC circulation current control



(a) H桥臂



(b) L桥臂

图 B8 全局电压控制对送出端口阻抗特性的影响  
 Fig. B8 Impedance characteristics of transmission port by global voltage control

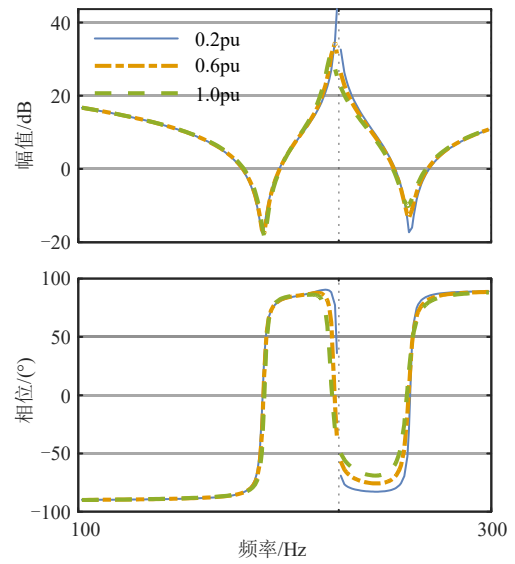


图 B9 风电场出力对送出端口阻抗特性的影响  
 Fig. B9 Impedance characteristics of transmission port by active power