

多电压等级柔性直流电网建模与稳定性分析

叶 杰¹, 汤广福¹, 赵成勇²

(1. 全球能源互联网研究院有限公司先进输电技术国家重点实验室, 北京 102211;

2. 华北电力大学电气与工程学院, 北京 102206)

摘 要: 当柔性直流电网包含多个电压等级时, 直流电压变换器的引入会使电网的稳定性分析变得复杂。为此, 提出了一种基于阻抗的稳定性分析方法。首先, 建立了包含不同控制模式模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的多电压等级柔性直流电网统一阻抗模型。在此模型基础之上, 分析了系统中不同变量之间的传递函数。由于所有传递函数中均包含等效环路增益环节, 所以在保证换流器单独运行稳定的前提下, 直流电网的稳定性就取决于环路增益是否满足稳定性判据。最后基于 Matlab/Simulink 搭建了多电压等级柔性直流电网的时域仿真系统, 仿真结果验证了提出的小信号建模和稳定性分析方法的正确性, 为未来直流电网的部署和分析提供了理论基础。

关键词: 柔性直流电网; 多电压等级; MMC; 稳定性分析; 小信号模型; 等效环路增益

Modeling and Stability Analysis for Flexible DC Power Grid With Multi-voltage Levels

YE Jie¹, TANG Guangfu¹, ZHAO Chengyong²

(1. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology, Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Beijing 102211, China; 2. College of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: When the flexible DC power grid contains multiple voltage levels, the presence of DC voltage converter will complicate the stability analysis of the grid. Therefore, an impedance-based stability assessment method is proposed. Firstly, a unified impedance model of flexible DC power grid with multi-voltage levels is established, which contains modular multilevel converters (MMC) with different control modes. Based on this model, the transfer functions between different variables in the system are analyzed. All transfer functions contain an equivalent loop gain, thus the stability of DC power grid can be judged by whether the loop gain satisfies the stability criterion or not on the premise that the converter operates stably alone. Finally, based on the MATLAB/Simulink, a time-domain simulation system of flexible DC power grid with multi-voltage levels is built. The simulation results verify the correctness of the proposed small signal modeling and stability analysis method, which provides a theoretical basis for the future deployment and analysis of DC power grid.

Key words: flexible DC power grid; multi-voltage levels; MMC; stability analysis; small signal model; equivalent loop gain

0 引言

柔性直流电网的快速发展已被公认为电力系统的重大变化^[1]。这种发展是由可再生能源的需求和模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)技术革新共同推动。目前已经投运的世界首个柔性直流电网^[2]——±500 kV/3 000 MW 张北四端柔性直流电网示范工程每年可输送约 140

亿千瓦时清洁电力, 节约标准煤 490 万吨。多端柔性直流电网技术也被认为是欧洲超级电网的可行解决方案^[3-4]。在未来的电力系统中, 柔性直流电网将发挥与现有交流电网同等重要的作用^[5]。

与交流系统一样, 柔性直流电网在运行过程中也会遭受小信号干扰^[6], 分析指定运行工况下直流电网的稳定性是最基本和重要的任务之一。在分析电网之前首先要对单个 MMC 进行建模和稳定性分析。基于阻抗的稳定性分析方法物理意义清晰且易于扩展应用, 被认为是研究电力电子系统小信号稳定性最有效的方法^[7-8]。但 MMC 是一个多频率谐波

基金资助项目: 国家电网公司科技项目“直流电网阻抗特性和小信号稳定性分析”(5100-202058323A-0-0-00)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC “Impedance and Small Signal Stability Analysis of DC Power Grid” (5100-202058323A-0-0-00).

响应系统,这意味着单一频率的扰动会产生多个谐波频率处的响应,因此很难直接使用经典两电平电压源变换器的分析方法对 MMC 进行建模。近年来,谐波状态空间法(Harmonic State Space, HSS)和谐波传递函数法因能很好的用于 MMC 这种周期时变系统的分析而受到广泛关注^[9-11]。文献[12]提出了一种多频率谐波线性化方法来推导 MMC 的序阻抗模型,这种方法实际上与谐波状态空间法等效。建立直流电网模型需提取每个 MMC 直流侧二端口阻抗特性,文献[13-16]建立了不同控制模式 MMC 的直流侧阻抗模型,并分析了其谐波耦合特性。

目前,文献中常见的建模方法都是针对单一电压等级的直流电网^[17-21]。文献[17]建立了适于阻抗法稳定性分析的复频域等效电路,并提出应用 ESAC 标准来优化 Middlebrook 稳定性判据的禁止区域;文献[18]以张北工程小信号模型为基础,提出使用参与因子法及特征值灵敏度来分析影响电网稳定性的因素。虽然目前高压大功率直流电压变换器技术还不成熟,但考虑其发展潜力,未来柔性直流电网一个重要特征可能是拥有多端直流汇入点,不同直流接入点的换流器可能会来自不同的制造商或有不同的电压等级^[22-24]。张北工程仅作为一个单一电压等级的柔性直流电网,其换流器间的动态交互过程就已经十分复杂^[25]。在加入多端直流电压变换器后,不同直流母线之间的小信号干扰和耦合问题变得复杂,传统意义阻抗比的概念不再适用,单一电压等级柔性直流电网的阻抗建模方法无法直观的分析多电压等级柔性直流电网。

本文首先分析了多电压等级柔性直流电网的基本形式及运行模式;然后应用 HSS 建立了运行在不同控制方法下的涵盖多频率谐动态特性的 MMC 直流侧阻抗模型;以此模型为基础,推导了系统中不同小信号间的传递函数和统一形式的等效环路增益,并分析了系统参数对阻抗特性的影响,突破了多电压等级柔性直流电网稳定性分析难题。最后,在 MATLAB/Simulink 中建立仿真模型,仿真结果表明了本文所提建模方法的有效性以及稳定性分析的合理性。

1 多电压等级柔性直流电网基本形式

多电压等级柔性直流电网的基本拓扑结构如图 1 所示,它包含两条电压等级不同的直流母线,每条直流母线上都有多个同一电压等级的 MMC 存

在,这些 MMC 可以运行在定直流电压控制、定功率控制或定交流电压控制模式下。需要注意的是,实际中每条母线上最多只允许有一个定直流电压控制 MMC 存在,但为了建模统一性,这里仍然定义多个定直流电压控制 MMC。直流母线通过直流电压变换器连接,理论上功率既可以从高压侧流向低压侧,也可以从低压侧流向高压侧,但合理的情况应该是功率从高压侧流向低压侧。此外,考虑到高压大容量直流变换器的研究都是围绕输出电压控制开展,因此这里不考虑直流变换器的电流控制模式,也就是说功率受端的直流母线电压由直流变换器决定。图中 i_{LMMC_cx} 、 i_{LMMC_uy} 、 i_{HMMC_cm} 和 i_{HMMC_un} 分别表示低压侧第 x 个定交流电压/功率控制 MMC、低压侧第 y 个定直流电压控制 MMC、高压侧第 m 个定交流电压/功率控制 MMC 和高压侧第 n 个定直流电压控制 MMC 的直流端口电流; u_L 和 u_H 分别是低压侧和高压侧直流电压; i_L 和 i_H 分别是直流电压变换器低压侧和高压侧直流端口电流。

直流变换器的二端口小信号闭环传递矩阵定义如下^[26]

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_H \\ \hat{u}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_H} & G_{Hi} \\ G_{Lu} & -Z_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u}_H \\ \hat{i}_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: Z_H 是直流变换器高压侧闭环输入阻抗; Z_L 是低压侧闭环输出阻抗; G_{Hi} 是闭环电流隔离度; G_{Lu} 是闭环电压隔离度。

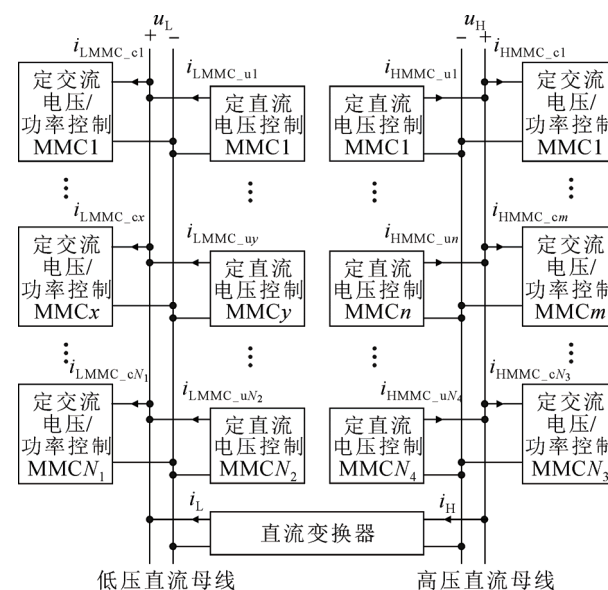


图 1 多电压等级柔性直流电网的统一形式

Fig.1 Unified form of flexible DC power grid with multi-voltage levels

闭环传递矩阵中的传递函数根据选用直流变换器拓扑结构的不同而有所不同, 可根据实际情况进行调整。因此, 建立多电压等级柔性直流电网的模型只需先确定 MMC 的直流侧阻抗模型。

2 MMC 阻抗模型

2.1 定功率控制 MMC 阻抗模型

MMC 虽是一个多频率谐波响应系统, 但是稳态情况下 3 次以上的谐波含量较小, 通常可以忽略不计^[12]。因此可将 MMC 系统变量表示成包含频率 $-3f_1$ 、 $-2f_1$ 、 $-f_1$ 、 0 、 f_1 、 $2f_1$ 和 $3f_1$ 处的复数傅立叶系数的 7 阶频域矢量, f_1 是基波频率。例如交流电压稳态矢量 $\mathbf{U}_{sa}^0 = [0, 0, U_s/2, 0, U_s/2, 0, 0]^T$, U_s 是相电压幅值。此外, 为了简化频域的卷积运算, 定义托普利茨算子 T 。对于一个 $2h+1$ 阶矢量 $\{u_i\}_{i \in [-h, h]}$, 对其应用普利茨算子后, 可得到一个秩为 $2h+1$ 的矩阵

$$T\{\{u_i\}\} = \begin{bmatrix} u_0 & u_{-1} & \cdots & u_{-h} & 0 & \cdots & 0 \\ u_1 & \cdots & \cdots & u_{-h+1} & u_{-h} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_h & u_{h-1} & \cdots & u_0 & u_{-1} & \cdots & u_{-h} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & u_h & u_{h-1} & \cdots & u_0 & u_{-1} \\ 0 & \cdots & u_0 & u_h & \cdots & u_{-1} & u_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

MMC 的 A 相上桥臂稳态频域模型如下

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{au}^0 = T\{\mathbf{M}_{au}^0\} \mathbf{U}_{au}^{\Sigma 0} \\ \mathbf{Y}_c^m \mathbf{U}_{au}^{\Sigma 0} = T\{\mathbf{M}_{au}^0\} \mathbf{I}_{au}^0 \\ \mathbf{Z}_l^m \mathbf{I}_{au}^0 = 0.5 \mathbf{U}_{dc}^0 + \mathbf{U}_{oo'}^0 - \mathbf{U}_{sa}^0 - \mathbf{U}_{au}^0 \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} \mathbf{Y}_c^m = j2\pi \frac{C_{sm}}{N} \cdot \text{diag}[-3f_1, -2f_1, -f_1, 0, f_1, 2f_1, 3f_1] \\ \mathbf{Z}_l^m = j2\pi L_{arm} \cdot \text{diag}[-3f_1, -2f_1, -f_1, 0, f_1, 2f_1, 3f_1] \end{cases}$$

\mathbf{U}_{au}^0 表示子模块电压总和的稳态矢量; \mathbf{M}_{au}^0 表示调制信号稳态矢量; $\mathbf{U}_{au}^{\Sigma 0}$ 表示子模块电容电压总和的稳态矢量; \mathbf{I}_{au}^0 表示电流稳态矢量; \mathbf{U}_{dc}^0 表示直流电压稳态矢量; $\mathbf{U}_{oo'}^0$ 表示交直流中性点电位差稳态矢量; C_{sm} 表示子模块电容容值, L_{arm} 表示桥臂电抗感值。

为计算 MMC 直流侧阻抗特性, 首先需要向直流电压中注入幅值为 $2U_{dc}^0$, 频率为 f_p 的扰动。定义系统中各变量在频率 f_p-3f_1 、 f_p-2f_1 、 f_p-f_1 、 f_p 、 f_p+f_1 、 f_p+2f_1 和 f_p+3f_1 处的 7 阶小信号频域矢量。例如直流电压小信号频域矢量

$$\mathbf{U}_{dc}^p = [0, 0, 0, U_{dc}^p e^{j\theta_p}, 0, 0, 0]^T \quad (4)$$

其中 θ_p 是扰动的初始相角。

根据[12]中的分析可知, 直流电压中性点与交流电压中性点的电压差是由上下桥臂子模块输出电压的零序差分分量决定, 而子模块输出电压只有在频率 $f_p \pm 3f_1$ 处是零序差分分量, 那么

$$\mathbf{U}_{oo'}^p = \mathbf{G}_o \mathbf{U}_{au}^p = \text{diag}[1, 0, 0, 0, 0, 0, 1] \cdot \mathbf{U}_{au}^p \quad (5)$$

在式(3)的基础上, 再结合小信号之间相乘项或平方项应该忽略的基本分析原则, 可进一步推导 MMC 的小信号频率模型如下:

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{au}^p = T\{\mathbf{M}_{au}^0\} \mathbf{U}_{au}^{\Sigma p} + T\{\mathbf{U}_{au}^{\Sigma 0}\} \mathbf{M}_{au}^p \\ \mathbf{Y}_c^m \mathbf{U}_{au}^{\Sigma p} = T\{\mathbf{M}_{au}^0\} \mathbf{I}_{au}^p + T\{\mathbf{I}_{au}^0\} \mathbf{M}_{au}^p \\ \mathbf{Z}_l^m \mathbf{I}_{au}^p = 0.5 \mathbf{U}_{dc}^p + \mathbf{U}_{oo'}^p - \mathbf{U}_{au}^p \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} \mathbf{Y}_c^m = j2\pi \frac{C_{sm}}{N} \cdot \text{diag}[f_p - 3f_1, f_p - 2f_1, f_p - f_1, f_p, \\ f_p + f_1, f_p + 2f_1, f_p + 3f_1] \\ \mathbf{Z}_l^m = j2\pi L_{arm} \cdot \text{diag}[f_p - 3f_1, f_p - 2f_1, f_p - f_1, f_p, \\ f_p + f_1, f_p + 2f_1, f_p + 3f_1] \end{cases}$$

将(5)带入到式(6)中, 经过整理后可得以下矩阵方程, 其中 \mathbf{U}_7 是 7×7 单位矩阵

$$\begin{aligned} & (\mathbf{Z}_l^m - \mathbf{G}_o T\{\mathbf{M}_{au}^0\} \mathbf{Z}_c^m T\{\mathbf{M}_{au}^0\} + \\ & T\{\mathbf{M}_{au}^0\} \mathbf{Z}_c^m T\{\mathbf{M}_{au}^0\}) \mathbf{I}_{au}^p = 0.5 \mathbf{U}_{dc}^p + \\ & (\mathbf{G}_o - \mathbf{U}_7)(T\{\mathbf{M}_{au}^0\} \mathbf{Z}_c^m T\{\mathbf{I}_{au}^0\} + T\{\mathbf{U}_{au}^{\Sigma 0}\}) \mathbf{M}_{au}^p \end{aligned} \quad (7)$$

上述推导的是 MMC 功率回路阻抗模型, 接下来还需要考虑闭环控制的影响。调制信号的小信号频域矢量可表示为

$$\mathbf{M}_{au}^p = \mathbf{G}_i \mathbf{I}_{au}^p + \mathbf{G}_c \mathbf{I}_{au}^p \quad (8)$$

其中 \mathbf{G}_i 由电流内环控制决定, 而 \mathbf{G}_c 则表示环流控制产生的影响。需要指出的是, 由于本文主要研究直流电网的稳定性, 因此这里忽略锁相环扰动对调制信号的影响。

1) 内环电流控制

当直流电压中加入频率为 f_p 的扰动后, 相电流中就会包含频率为 f_p+f_1 的正序扰动和频率为 f_p-f_1 的负序扰动, 且相电流中的扰动分量是桥臂电流中扰动分量的两倍, 因此 \mathbf{G}_i 可表示为

$$\mathbf{G}_i = \text{diag}[0, 0, 2a, 0, 2b, 0, 0] \quad (9)$$

其中

$$a = H_i(j2\pi(f_p - f_1) + j2\pi f_1) + jK_d$$

$$b = H_i(j2\pi(f_p + f_1) - j2\pi f_1) - jK_d$$

$H_i(s)$ 表示电流环比例积分(PID)控制器, s 表示拉普拉斯算子; K_d 是电流环交叉解耦系数。

2) 环流控制

环流控制只对桥臂电流中环流在三相间的共模分量起作用。当直流电压中加入频率为 f_p 的扰动后, 桥臂电流中会存在频率为 f_p+2f_1 的共模负序扰动和频率为 f_p-2f_1 的共模正序扰动。因此 G_c 可表示为

$$G_c = \text{diag}[0, c, 0, 0, 0, d, 0] \quad (10)$$

其中

$$c = H_c(j2\pi(f_p - 2f_1) + j4\pi f_1) + jK_{cd}$$

$$d = H_c(j2\pi(f_p + 2f_1) - j4\pi f_1) - jK_{cd}$$

$H_c(s)$ 表示环流 PI 控制器; K_{cd} 是环流控制交叉解耦系数。

MMC 直流侧阻抗可以定义为

$$Z_{dc}(f_p) = \frac{U_{dc}^p(f_p)}{3I_{au}^p(f_p)} \quad (11)$$

式中 $U_{dc}^p(f_p)$ 和 $I_{au}^p(f_p)$ 分别表示直流电压和桥臂电流的扰动时域信号在频率 f_p 处的复数傅立叶系数。

由(7)和(8)可得

$$Y_{dc} U_{dc}^p = I_{au}^p \quad (12)$$

其中 Y_{dc} 是一个 7×7 导纳矩阵, 表达式为

$$Y_{dc} = 0.5 \cdot (Z_l^{mp} - G_{oo} T \{M_{au}^0\} Z_c^{mp} T \{M_{au}^0\} + T \{M_{au}^0\} Z_c^{mp} T \{M_{au}^0\} - (G_{oo} - U_7) \cdot (T \{M_{au}^0\} Z_c^{mp} T \{I_{au}^0\} + T \{U_{au}^{\Sigma 0}\} (G_i + G_c))^{-1}$$

直流电压小信号频域矢量只有第 4 个元素是非零的, 所以矩阵 Y_{dc} 中只有第 4 列数据是有意义的。将式(12)展开就可得到频率 f_p 处的直流导纳特性

$$Y_{dc}^{4,4} \cdot U_{dc}^p(f_p) = I_{au}^p(f_p) \quad (13)$$

式中 $Y_{dc}^{4,4}$ 表示矩阵 Y_{dc} 第 4 行 4 列的元素。

将式(13)带入到式(11)中可得 MMC 的闭环直流阻抗

$$Z_{dc}(f_p) = \frac{1}{3Y_{dc}^{4,4}(f_p)} \quad (14)$$

为了验证所推导阻抗模型的准确性, 在 MATLAB/Simulink 上搭建了时域仿真模型, 通过注入一定量扰动来测量实际阻抗。主要的电气和控制参数如表 1 所示。

图 2 为分别在仿真和模型数值计算中获得的定功率控制 MMC 直流侧阻抗的幅相特性曲线。

2.2 定直流电压控制 MMC 阻抗模型

直流电压的扰动会通过直流电压控制器、内环电流控制器和 dq 反变换后变成频率为 f_p+f_1 的正序扰动和频率为 f_p-f_1 的负序扰动, 然后被施加到调制

表 1 定功率控制 MMC 系统参数

Table 1 System parameters of the MMC with constant-power control

control	
参数名称	参数取值
交流线电压/kV	230(均方根值)
基波频率/Hz	50
直流电压/kV	500
子模块电容/子模块数	7.5 mF/250
桥臂电抗器/mH	50
内环电流控制器参数	$k_p=1, k_i=10$
环流控制器参数	$k_p=20, k_i=2\ 000$

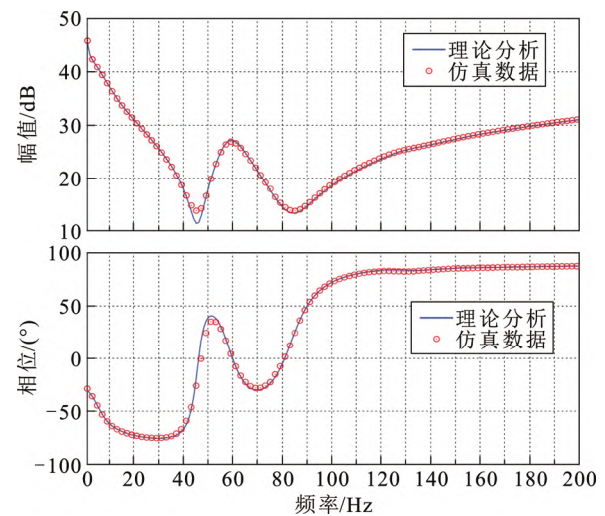


图 2 定功率控制 MMC 的直流侧阻抗

Fig.2 DC impedances of MMC with constant-power control

信号上。因此当采用定直流电压控制时, 式(8)应改写成

$$M_{au}^p = G_i I_{au}^p + G_c I_{au}^p + G_{dc} U_{dc}^p \quad (15)$$

其中 G_{dc} 由直流电压控制环和电流内环共同决定, 表达式为

$$G_{dc} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & g & 0 & g & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (16)$$

其中 $0_{3 \times 7}$ 表示 3 行 7 列的零矩阵, 且

$$g = 0.5 H_{dc}(j2\pi f_p) H_i(j2\pi f_p)$$

$H_{dc}(s)$ 表示直流电压环比例积分(PI)控制器。

因此式(12)重新推导为

$$Y_{dc} = 0.5 \cdot (Z_l^{mp} - G_{oo} T \{M_{au}^0\} Z_c^{mp} T \{M_{au}^0\} + T \{M_{au}^0\} Z_c^{mp} T \{M_{au}^0\} - (G_{oo} - U_7) \cdot (T \{M_{au}^0\} Z_c^{mp} T \{I_{au}^0\} + T \{U_{au}^{\Sigma 0}\} (G_i + G_c))^{-1} \cdot (0.5 U_7 + (G_{oo} - U_7) \cdot (T \{M_{au}^0\} Z_c^{mp} T \{I_{au}^0\} + T \{U_{au}^{\Sigma 0}\} G_{dc})) \quad (17)$$

在 MATLAB/Simulink 上搭建仿真模型, 主要的电气和控制参数如表 2 所示。

图 3 为仿真和模型数值计算中获得的定直流电压控制 MMC 直流侧阻抗的幅相特性曲线。从图中可以看出直流电压控制对系统低频段有较大影响。

2.3 定交流电压控制 MMC 阻抗模型

当采用定交流电压控制时, 交流电压中的扰动也会通过交流电压控制器、内环电流控制器和电压前馈环节被施加到调制信号上, 式(8)改写成

$$\mathbf{M}_{au}^p = \mathbf{G}_i \mathbf{I}_{au}^p + \mathbf{G}_c \mathbf{I}_{au}^p + 2\mathbf{G}_{ac} \mathbf{Z}_{ac} \mathbf{I}_{au}^p \quad (18)$$

式中: \mathbf{Z}_{ac} 表示交流侧负载的阻抗; \mathbf{G}_{ac} 由交流电压控制环和电流内环共同决定, 表达式为

$$\mathbf{G}_{ac} = \text{diag}[0, q, 0, 0, 0, q, 0] \quad (19)$$

其中

$$q = \mathbf{Z}_{ac} \mathbf{H}_{ac} (j2\pi(f_p - f_i) + j2\pi f_i) \mathbf{H}_i (j2\pi(f_p - f_i) + j2\pi f_i) - \mathbf{Z}_{ac}$$

$\mathbf{H}_{ac}(s)$ 表示交流电压环比例积分(PI)控制器。

因此式(12)重新推导为

表 2 定直流电压控制 MMC 系统参数

Table 2 System parameters of the MMC with constant-DC

control	
参数名称	参数取值
交流线电压/kV	320(均方根值)
基波频率/Hz	50
直流电压/kV	800
子模块电容/子模块数	11.25 mF/250
桥臂电抗器/mH	80
内环电流控制器参数	$k_p=1, k_i=10$
环流控制器参数	$k_p=20, k_i=2\ 000$

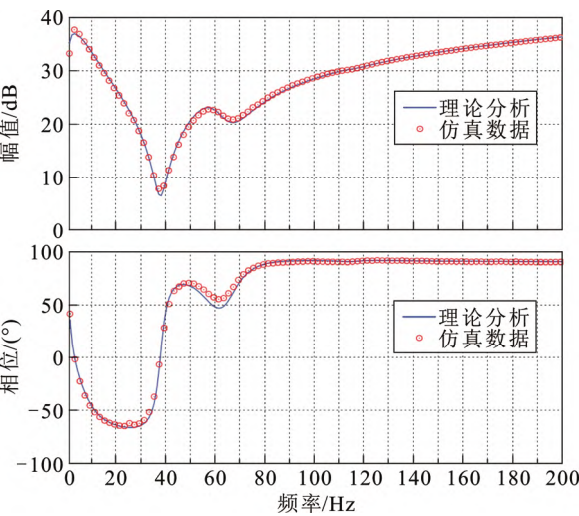


图 3 定直流电压控制 MMC 的直流侧阻抗

Fig.3 DC impedances of MMC with constant-DC control

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_{dc} = & 0.5 \cdot (\mathbf{Z}_l^{mp} - \mathbf{G}_{oo} \mathbf{T} \{ \mathbf{M}_{au}^0 \} \mathbf{Z}_c^{mp} \mathbf{T} \{ \mathbf{M}_{au}^0 \} + \\ & \mathbf{T} \{ \mathbf{M}_{au}^0 \} \mathbf{Z}_c^{mp} \mathbf{T} \{ \mathbf{M}_{au}^0 \} - (\mathbf{G}_{oo} - \mathbf{U}_7) \cdot \\ & (\mathbf{T} \{ \mathbf{M}_{au}^0 \} \mathbf{Z}_c^{mp} \mathbf{T} \{ \mathbf{I}_{au}^0 \} + \mathbf{T} \{ \mathbf{U}_{au}^{\Sigma 0} \}) \cdot \\ & (\mathbf{G}_i + \mathbf{G}_c + 2\mathbf{G}_{ac} \mathbf{Z}_{ac}))^{-1} \end{aligned} \quad (20)$$

在 MATLAB/Simulink 上搭建仿真模型, 主要的电气和控制参数如表 3 所示。

图 4 为仿真和模型数值计算中获得的定交流电压控制 MMC 直流侧阻抗的幅相特性曲线。

3 柔性直流电网模型及稳定性分析

3.1 柔性直流电网模型

柔性直流电网中每个 MMC 都可以看成是一个二端口网络, 可以画出多电压等级柔性直流电网的小信号模型如图 5 所示。其中 $\hat{i}_{L_{cx}}$ 和 $\hat{i}_{H_{cm}}$ 分别表示低压侧和高压侧定交流电压/功率控制 MMC 的小扰动输入电流(非直流母线扰动); $\hat{u}_{L_{uy}}$ 和 $\hat{u}_{H_{un}}$ 分别表示低压侧和高压侧定直流电压控制 MMC 的小扰动

表 3 定交流电压控制 MMC 系统参数

Table 3 System parameters of the MMC with constant-AC

control	
参数名称	参数取值
交流线电压/kV	230(均方根值)
基波频率/Hz	50
直流电压/kV	500
子模块电容/子模块数	7.5 mF/250
桥臂电抗器/mH	50
交流负载电阻/ Ω	58.8
内环电流控制器参数	$k_p=1, k_i=10$
环流控制器参数	$k_p=20, k_i=2\ 000$

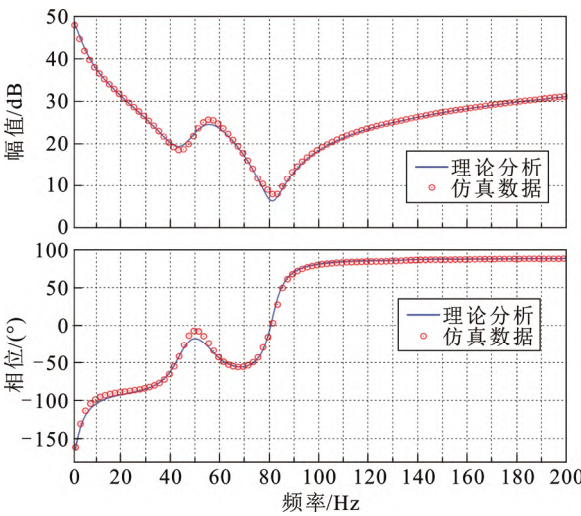


图 4 定交流电压控制 MMC 的直流侧阻抗

Fig.4 DC impedances of MMC with constant-AC control

输入电压(非直流母线扰动); \hat{i}_{L_u} 和 \hat{i}_{H_u} 分别表示低压侧和高压侧所有定直流电压控制 MMC 的直流端口电流总和; $G_{LMMC_cx}(s)$ 和 $G_{HMMC_cm}(s)$ 分别表示低压侧第 x 个定交流电压/功率控制 MMC 和高压侧第 m 个定交流电压/功率控制 MMC 的扰动到输出电流的传递函数; $G_{LMMC_uy}(s)$ 和 $G_{HMMC_un}(s)$ 分别表示低压侧第 y 个定直流电压控制 MMC 和高压侧第 n 个定直流电压控制 MMC 的扰动到输出电压的传递函数; $Z_{LMMC_cx}(s)$ 和 $Z_{HMMC_cm}(s)$ 分别表示低压侧第 x 个定交流电压/功率控制 MMC 和高压侧第 m 个定交流电压/功率控制 MMC 的直流侧端口阻抗; $Z_{LMMC_uy}(s)$ 和 $Z_{HMMC_un}(s)$ 分别表示低压侧第 y 个定直流电压控制 MMC 和高压侧第 n 个定直流电压控制 MMC 的直流侧端口阻抗。

从图 5 中可以得到直流电网中不同电流的关系

$$\begin{cases} \hat{i}_{L_u} = \sum_{x=1}^{N_1} \hat{i}_{LMMC_cx} - \hat{i}_L \\ \hat{i}_{H_u} = \sum_{m=1}^{N_2} \hat{i}_{HMMC_cm} + \hat{i}_H \end{cases} \quad (21)$$

图 5 中扰动输入变量有 4 种, 因此可以推导这 4 种扰动分别到低压侧直流电压 \hat{u}_L 和高压侧直流电压 \hat{u}_H 的 8 种传递函数, 分别如式(22)–(29)所示。

$$\left. \frac{\hat{u}_L}{\hat{u}_{L_uy}} \right|_{\substack{\hat{u}_{L_uy}=0, \hat{u}_{H_un}=0 \\ \hat{i}_{L_cx}=0, \hat{i}_{H_cm}=0}} = \frac{G_{LMMC_uy}(s)}{Z_{LMMC_uy}(s)} \cdot \frac{Z_{LU}}{1+T_m} \quad (22)$$

$$\left. \frac{\hat{u}_H}{\hat{u}_{L_uy}} \right|_{\substack{\hat{u}_{L_uy}=0, \hat{u}_{H_un}=0 \\ \hat{i}_{L_cx}=0, \hat{i}_{H_cm}=0}} = \frac{G_{LMMC_uy}(s)G_{Hi}(s)}{Z_{LMMC_uy}(s)Z_L(s)} \cdot \frac{Z_{MU}Z_{LU}}{1+T_m} \quad (23)$$

$$\left. \frac{\hat{u}_L}{\hat{i}_{L_cx}} \right|_{\substack{\hat{u}_{L_uy}=0, \hat{u}_{H_un}=0 \\ \hat{i}_{L_cx}=0, \hat{i}_{H_cm}=0}} = -G_{LMMC_cx}(s) \cdot \frac{Z_{LU}}{1+T_m} \quad (24)$$

$$\left. \frac{\hat{u}_H}{\hat{i}_{L_cx}} \right|_{\substack{\hat{u}_{L_uy}=0, \hat{u}_{H_un}=0 \\ \hat{i}_{L_cx}=0, \hat{i}_{H_cm}=0}} = -G_{LMMC_cx}(s) \frac{G_{Hi}(s)}{Z_L(s)} \cdot \frac{Z_{MU}Z_{LU}}{1+T_m} \quad (25)$$

$$\left. \frac{\hat{u}_L}{\hat{u}_{H_un}} \right|_{\substack{\hat{u}_{L_uy}=0, \hat{u}_{H_un}=0 \\ \hat{i}_{L_cx}=0, \hat{i}_{H_cm}=0}} = \frac{G_{HMMC_un}(s)G_{Lu}(s)}{Z_{HMMC_un}(s)Z_L(s)} \cdot \frac{Z_{MU}Z_{LU}}{1+T_m} \quad (26)$$

$$\left. \frac{\hat{u}_H}{\hat{u}_{H_un}} \right|_{\substack{\hat{u}_{L_uy}=0, \hat{u}_{H_un}=0 \\ \hat{i}_{L_cx}=0, \hat{i}_{H_cm}=0}} = \frac{G_{HMMC_un}(s)}{Z_{HMMC_un}(s)} \cdot \frac{Z_{MU}}{1+T_m} \quad (27)$$

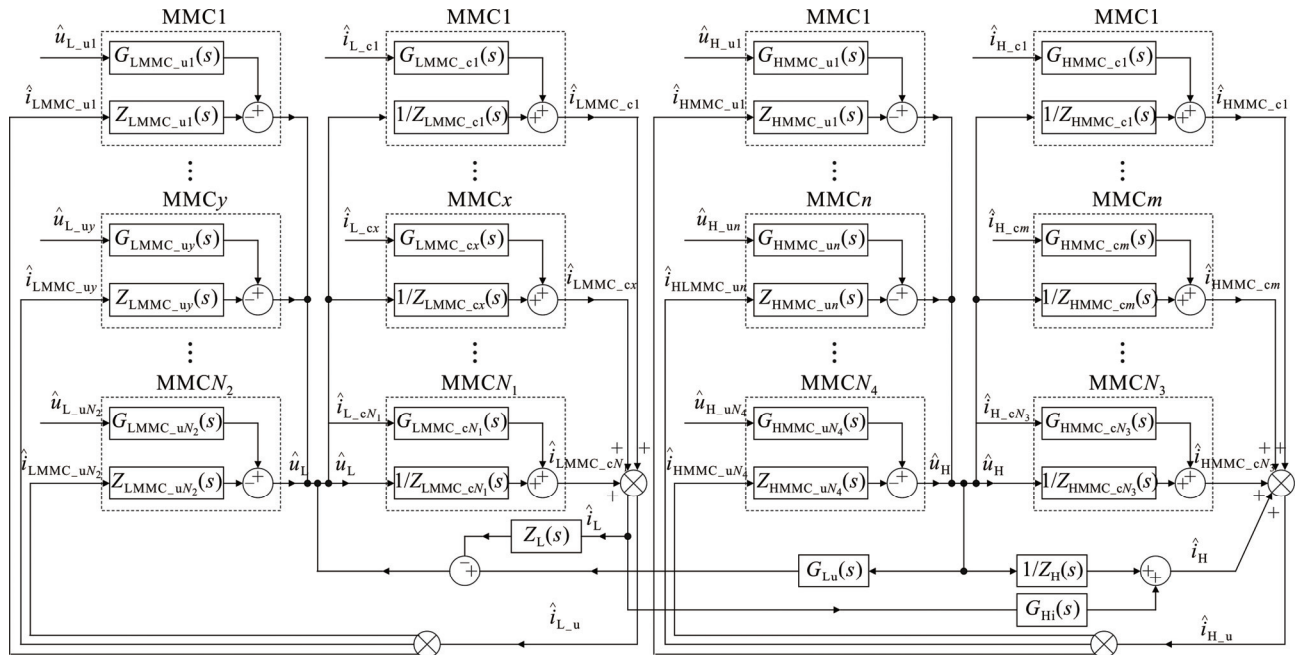


图 5 多电压等级柔性直流电网的统一小信号模型

Fig.5 Unified small-signal model of the flexible DC power grid with multi-voltage levels

$$\frac{\hat{u}_L}{\hat{i}_{H_cm}} \bigg|_{\substack{\hat{u}_{L_uy}=0, \hat{u}_{H_un}=0 \\ \hat{i}_{L_cx}=0, \hat{i}_{H_cm}=0}} = \frac{-G_{HMMC_cm}(s)G_{Lu}(s)}{Z_L(s)} \cdot \frac{Z_{MU}Z_{LU}}{1+T_m} \quad (28)$$

$$\frac{\hat{u}_H}{\hat{i}_{H_cm}} \bigg|_{\substack{\hat{u}_{L_uy}=0, \hat{u}_{H_un}=0 \\ \hat{i}_{L_cx}=0, \hat{i}_{H_cm}=0}} = -G_{HMMC_cm}(s) \cdot \frac{Z_{MU}}{1+T_m} \quad (29)$$

$$T_m = -Z_{MU}Z_{LU} \frac{G_{Hi}(s)G_{Lu}(s)}{Z_L(s)Z_L(s)} \quad (30)$$

$$Z_{MU} = \left(\frac{1}{Z_{Mu}} + \frac{1}{Z_{Mc}} \right)^{-1} \quad (31)$$

$$Z_{LU} = \left(\frac{1}{Z_{Lu}} + \frac{1}{Z_{Lc}} \right)^{-1} \quad (32)$$

$$Z_{Lu} = \left(\sum_{y=1}^{N_2} \frac{1}{Z_{LMMC_uy}(s)} + \frac{1}{Z_L(s)} \right)^{-1}, \quad (33)$$

$$Z_{Lc} = \left(\sum_{x=1}^{N_1} \frac{1}{Z_{LMMC_cx}(s)} \right)^{-1}$$

$$Z_{Mu} = \left(\sum_{n=1}^{N_4} \frac{1}{Z_{HMMC_un}(s)} \right)^{-1},$$

$$Z_{Mc} = \left(\sum_{m=1}^{N_3} \frac{1}{Z_{HMMC_cm}(s)} + \frac{1}{Z_H} + \frac{G_{Hi}(s)G_{Lu}(s)}{Z_L(s)} \right)^{-1} \quad (34)$$

其中 $x'=1, 2, \dots, N_1, x' \neq x$; $y'=1, 2, \dots, N_2, y' \neq y$; $m'=1, 2, \dots, N_3, m' \neq m$; $n'=1, 2, \dots, N_4, n' \neq n$ 。

根据奈奎斯特稳定判据, 如果直流变换器和每个 MMC 单独运行时都是稳定的, 则 $G_{LMMC_cx}(s)$ 、 $G_{HMMC_cm}(s)$ 、 $G_{LMMC_uy}(s)$ 、 $G_{HMMC_un}(s)$ 、 $Z_{LMMC_cx}(s)$ 、 $Z_{HMMC_cm}(s)$ 、 $Z_{LMMC_uy}(s)$ 、 $Z_{HMMC_un}(s)$ 、 $Z_H(s)$ 、 $Z_L(s)$ 、 $G_{Hi}(s)$ 和 $G_{Lu}(s)$ 没有正实部极点。因此, 如果传递函数(22)—(29)没有正实部极点, 也就是 $1/(1+T_m)$ 没有正实部极点, 那么直流电网就是稳定的。因此可以认为 T_m 是直流电网的等效环路增益。

3.2 稳定性分析

为验证等效环路增益能正确的反映直流电网稳定性, 本文构建了如图 6 所示的包含 3 个 MMC 和一个直流变换器的多电压等级直流电网。

图 6 中低压侧直流母线上有一个定功率控制 MMC(900 MW)和一个定交流电压控制 MMC(900 MW), 高压侧直流母线上有一个定直流电压控制 MMC, 参数分别与表 1、表 3 和表 2 一致。为了方便分析, 直流变换器用全桥 BUCK 变换器代替, 使用表 4 中所示参数并使变换器工作在连续工作模式

表 4 全桥 BUCK 变换器系统参数

Table 4 System parameters of the full bridge Buck converter

参数名称	参数取值
输出电抗 L_f/mH	10
输出电容 $C_f/\mu\text{F}$	500
输出电阻 R_o/Ω	278/556
输出电压 U_L/kV	500
输入电压 U_H/kV	800
输入电感 $L_i/\mu\text{H}$	500
输入电容 $C_i/\mu\text{F}$	100
电压控制器参数	$k_p=200, k_i=1\ 000$

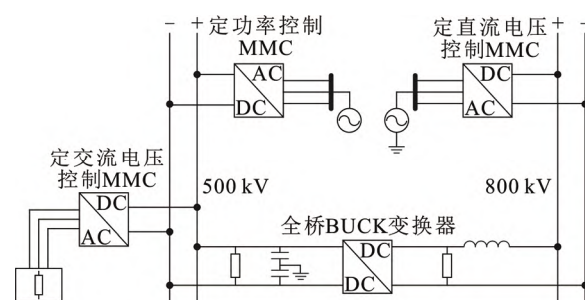


图 6 测试系统拓扑结构

Fig.6 Topology of the tested system

(CCM), 其二端口小信号闭环传递矩阵中各表达式定义见附录式(A1)—(A11)。

图 7 所示为直流变换器的输出电阻取不同值时, 等效环路增益的部分奈奎斯特曲线。当输出电阻为 278 Ω 时(900 MW), 等效环路增益的奈奎斯特曲线两次包围实轴上的点(-1,0), 如图 7(a)所示。根据奈奎斯特稳定判据, 直流电网此时不稳定。而当输出电阻为 556 Ω 时(450 MW), 等效环路增益的奈奎斯特曲线不包围实轴上的点(-1,0), 如图 7(b)所示, 这说明直流电网是稳定的。总的来说, 直流电网中的所有电路参数和控制参数都会对等效环路增益产生影响。根据式(30), 上述直流电网的等效环路增益可推导为

$$T_m = -Z_{MU}Z_{LU} \frac{G_{Hi}(s)G_{Lu}(s)}{Z_L(s)Z_L(s)} = - \left(\frac{1}{Z_{MMC_DC}} + \frac{1}{Z_H} + \frac{G_{Hi}(s)G_{Lu}(s)}{Z_L(s)} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{1}{Z_{MMC_P}} + \frac{1}{Z_L} + \frac{1}{Z_{MMC_AC}} \right)^{-1} \cdot \frac{G_{Hi}(s)G_{Lu}(s)}{Z_L(s)Z_L(s)} \quad (35)$$

式中 Z_{MMC_DC} 、 Z_{MMC_P} 和 Z_{MMC_AC} 分别表示定直流电压控制 MMC、定功率控制 MMC 和定交流电压控制 MMC 的直流侧端口阻抗。

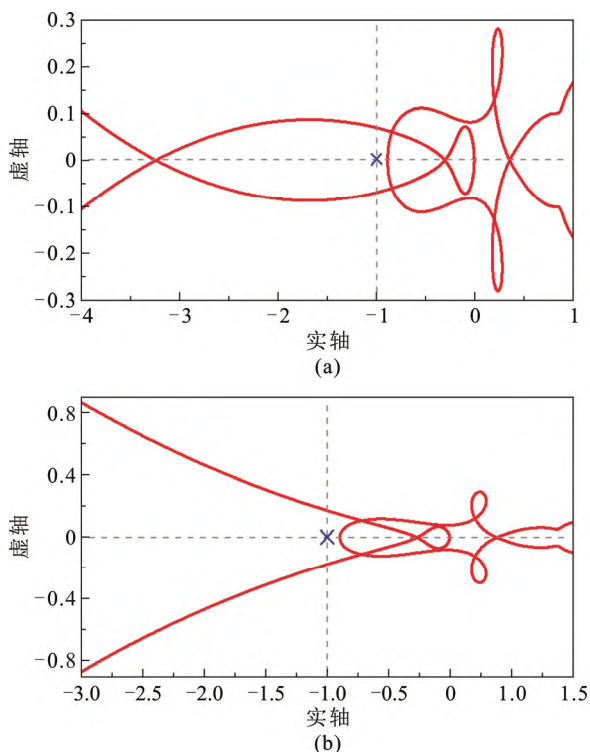


图7 等效环路增益的奈奎斯特曲线

Fig.7 Nyquist plots of the equivalent loop gain

4 仿真验证

根据图6的拓扑结构,在 Matlab/Simulink 平台下搭建了对应的多电压等级柔性直流电网仿真模型。系统参数与表1、表2、表3和表4中给定参数保持一致。低压母线侧定功率控制 MMC 输出的功率与定交流电压控制 MMC 输入功率相等。

与3.2节中所分析的情况一致,当直流变换器输出负载电阻 R_o 等于 $278\ \Omega$ 时,等效环路增益中存在正实部极点,也就是说直流电网中会存在谐振。对应的仿真结果如图8所示,从图中可以看出高压母线和低压母线中都存在约 25 Hz 的谐振分量。而当输出电阻 R_o 等于 $556\ \Omega$ 时,直流母线上均不存在明显谐振分量,这说明直流电网此时是稳定的。

5 结论

本文针对多电压等级柔性直流电网,结合定功率控制 MMC、定直流电压控制 MMC 和定交流电压控制 MMC 的直流侧阻抗模型,提出了直流电网统一建模方法,并利用奈奎斯特稳定判据分析了电路参数对直流电网稳定性的影响,并仿真验证了分析结果的正确性,得到以下结论。

1) 多电压等级柔性直流电网中不同小信号变量之间的闭环传递函数中均包含等效环路增益。

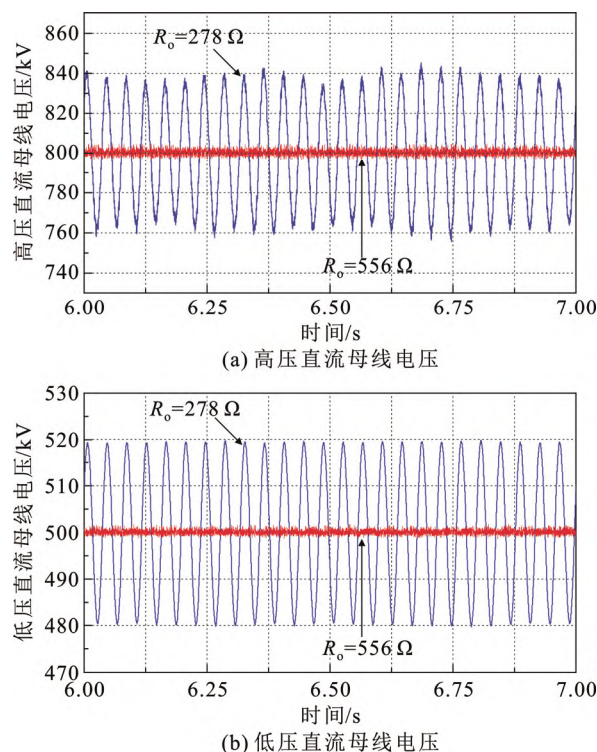


图8 直流母线电压仿真波形

Fig.8 Simulation waveforms of the DC bus voltage

2) 在对直流电网进行建模时,可以认为交流系统是理想的,所以 MMC 的模型可以只考虑直流侧阻抗特性,而直流变换器的输入输出端口的阻抗特性以及电压电流转移特性都需要在模型中考虑,这是多电压等级直流电网建模与单一电压等级直流电网建模最大的区别。

3) 当 MMC 输出功率接近功率运行区间的边界时,直流电网更容易引起系统的振荡。

本文所提建模和分析方法可用于指导电路参数和控制器参数设计,为未来多电压等级柔性直流电网的部署提供了理论基础。

附录见本刊网络版(<http://hve.epri.sgcc.com.cn/CN/volumn/current.shtml>)。

参考文献 References

- [1] LUTH T, MERLIN M, GREEN T C, et al. High-frequency operation of a DC/AC/DC system for HVDC applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(8): 4107-4115.
- [2] 国网冀北电力公司. 12 项世界第一的张北柔性直流工程建成投运[J]. 云南电力技术, 2020, 48(4): 90.
State Grid Jibei Electric Power Company. Zhangbei VSC-HVDC project which with 12 indices rank the first place in the world was completed and put into operation[J]. Yunnan Electric Power, 2020, 48(4): 90.
- [3] 姚美齐, 李乃湖. 欧洲超级电网的发展及其解决方案[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 549-555.

- YAO Meiqi, LI Naihu. An introduction to European supergrid and its solutions[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 549-555.
- [4] 叶敏芝, 喻哲扬, 徐 政. 欧洲柔性直流电网的规划及其仿真研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(6): 66-75.
- YE Minzhi, YU Zheyang, XU Zheng. Planning and simulation research of European VSC-HVDC grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 66-75.
- [5] Feasibility of HVDC grids: CIGRE WG B4.52[S]. Paris, France: CIGRE Tech, 2013.
- [6] 鲁晓军. 柔性直流电网小信号建模及稳定性分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018: 6-7.
- LU Xiaojun. Small-signal modeling and stability analysis of DC grid based on voltage source converters[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2018: 6-7.
- [7] WANG X, HARNEFORS L, BLAABJERG F. Unified impedance model of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 1775-1787.
- [8] SUN J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.
- [9] 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.
- [10] WU H, WANG X, KOCEWIAK L H. Impedance-based stability analysis of voltage-controlled MMCs feeding linear AC systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(4): 4060-4074.
- [11] 刘天琪, 周 攀, 王顺亮, 等. 考虑多频率谐波动态的模块化多电平换流器建模及耦合特性分析[J]. 电网技术, 2021, 45(8): 3164-3172.
- LIU Tianqi, ZHOU Pan, WANG Shunliang, et al. Modular multilevel converter modeling considering multi-frequency harmonic dynamics and coupling analysis[J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 3164-3172.
- [12] SUN J, LIU H. Sequence impedance modeling of modular multilevel converters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(4): 1427-1443.
- [13] JI K, TANG G, 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.
- [14] 李戡野, 刘开培, 朱 蜀, 等. VSC-MTDC 系统直流侧阻抗建模及稳定性分析[J]. 高电压技术, 2021, 47(2): 627-638.
- LI Yuye, LIU Kaipei, ZHU Shu, et al. DC side impedance modeling and stability analysis of VSC-MTDC system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 627-638.
- [15] 李晓晓, 王晓兰, 魏腾飞. 一致性控制的交直流微源混联直流微电网阻抗模型及小信号稳定性分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2876-2883.
- LI Xiaoxiao, WANG Xiaolan, WEI Tengfei. Impedance model of AC/DC microsource hybrid DC microgrid based on consistency control and small signal stability analysis[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2876-2883.
- [16] 年 珩, 杨 军, 陈 亮, 等. 交直流混合供电系统直流侧阻抗建模及稳定性分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3477-3487.
- NIAN Heng, YANG Jun, CHEN Liang, et al. DC impedance modeling and stability analysis of AC/DC hybrid power supply system[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3477-3487.
- [17] 孙银锋. 柔性直流输电系统建模及小干扰稳定性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017: 70-89.
- SHUN Yinfeng. Research on VSC-HVDC system modeling and small disturbance stability[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2017: 70-89.
- [18] 张 臣. MMC 型柔性直流电网动态特性分析[D]. 济南: 山东大学, 2019: 23-45.
- ZHANG Chen. Dynamic characteristics analysis of MMC-based flexible DC grid[D]. Jinan, China: Shandong University, 2019: 23-45.
- [19] 黄旭程, 刘亚丽, 陈燕东, 等. 直流电阻抗建模与振荡机理及稳定控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(7): 108-117.
- HUANG Xucheng, LIU Yali, CHEN Yandong, et al. Impedance-based modeling, stability analysis and virtual damping approach in DC grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 108-117.
- [20] 朱晓荣, 孟欣欣. 直流微电网的稳定性分析及有源阻尼控制研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1675-1684.
- ZHU Xiaorong, MENG Xinxin. Stability analysis and research of active damping control method for DC microgrids[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1675-1684.
- [21] 厉泽坤, 孔 力, 裴 玮. 直流微电网大扰动稳定判据及关键因素分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(12): 3993-4002.
- LI Zekun, KONG Li, PEI Wei. Analyses of stability criterion and key factors of DC microgrid under large disturbance[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 3993-4002.
- [22] JOVICIC D, LIN W. Multiport high-power LCL DC hub for use in DC transmission grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 760-768.
- [23] 姚良忠, 鲁双杨, 文劲宇, 等. 含 DC-DC 变换器的直流电网拓扑结构及其运行控制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 80-86.
- YAO Liangzhong, LU Shuangyang, WEN Jinyu, et al. Topology and control of DC grid with DC-DC converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 80-86.
- [24] 李英彪, 梁 军, 吴广禄, 等. 多电压等级直流电力系统发展与挑战[J]. 发电技术, 2018, 39(2): 118-128.
- LI Yingbiao, LIANG Jun, WU Guanglu, et al. Development and challenge of DC power system with different voltage levels[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(2): 118-128.
- [25] 顾亚旗. 含风电场的多端柔性直流输电系统控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019: 39-64.
- GU Yaqi. Control strategy of MMC-MTDC transmission system with windfarms[D]. Beijing, China: Beijing Jiaotong University, 2019: 39-64.
- [26] CUK S. Modeling, analysis, design of switching converters[D]. California, USA: California Institute of Technology, 1976: 41-63.



YE Jie
Ph.D.

Corresponding author

叶 杰(通信作者)

1989—, 男, 博士, 工程师

主要从事柔性直流输电和并网变换器技术的研究工作

E-mail: yejiehust@foxmail.com

收稿日期 2021-01-20 修回日期 2021-09-20 编辑 陈 蔓