

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210098

控制参数对柔性直流电网稳定性的影响分析

范明烨, 李慧, 刘思嘉, 范新桥

(北京信息科技大学自动化学院, 北京 100192)

摘要: 控制参数的合理选择是柔性直流电网稳定运行的前提条件, 而其参数整定又依赖于柔性直流电网的稳定性模型。首先, 提出了基于直流电压斜率控制的柔性直流电网小信号模型, 同时考虑了模块化多电平换流器内部动态特性及环流抑制器的作用。然后, 利用根轨迹法分析直流电压斜率控制器的 PI 参数、斜率参数和环流抑制器 PI 参数对系统稳定性影响。利用参与因子法识别二倍频环流所对应的模态, 进而分析 PI 参数对二倍频环流抑制的影响效果。最后, 在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建张北柔性直流电网试验示范工程仿真系统, 验证所提建模方法以及结论的正确性, 为实际工程中控制参数整定提供了理论依据。

关键词: 柔性直流电网; 稳定性分析; 直流电压斜率控制; 环流抑制

Impact analysis of control parameters on the stability of flexible DC grids

FAN Mingye, LI Hui, LIU Sijia, FAN Xinqiao

(School of Automation, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: Reasonable selection of control parameters is a precondition for stable operation in a flexible DC power grid, and their tunings will depend on the stability model of the flexible DC power grid. First, a small-signal model of such a grid based on DC voltage slope control is proposed, and the internal dynamic characteristics of the modular multilevel converter and the function of the circulating current suppressor are considered. Secondly, the root locus method is used to analyze the influence of the PI parameters and the slope parameter of the DC voltage slope controller, and of the PI parameters of the circulating current suppressor on the stability of the system. The participation factor method is adopted to identify the mode corresponding to the double frequency circulating current, and then the suppression effect of PI parameters on double frequency circulation is analyzed. Finally, a simulation of the Zhangbei flexible DC grid demonstration project is built on the PSCAD/EMTDC platform to verify the correctness of the proposed modeling methods and conclusions. This paper provides a theoretical basis for control parameter tuning in practical projects.

This work is supported by the Beijing Natural Science Foundation (No. 3172015) and the Science and Technology General Project of Beijing Education Commission (No. KM201911232016).

Key words: flexible DC grid; stability analysis; DC voltage slope control; circulating current suppression

0 引言

柔性直流电网以其灵活、经济、可靠等特点成为解决多个交流异步电网互联和大规模新能源并网的有效技术手段, 是未来电网升级和变革的重要方向之一^[1-2]。它的变流器拓扑是采用模块化多电平结构, 相比于传统电压源换流器 (Voltage Source Converter, VSC) 而言, 具有开关频率低、输送能力强、谐波特性好等优点, 已成为构建柔性直流电网的关键设备^[3-4]。

然而, 模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 易造成桥臂环流波动和子模块均压等问题^[5], 给系统稳定性带来挑战。此外, 柔性直流电网多个换流站之间的协调控制策略中, 控制参数选择不合适也会影响系统稳定性。因此, 有必要研究控制参数对柔性直流电网稳定性的影响。

小信号分析法是稳定性分析的主流方法之一, 其结论可用于系统参数的整定^[6]。目前, 国内外学者对 MMC 换流站的小信号稳定性研究取得了不少成果。文献[7-8]考虑了交直流侧及 MMC 内部动态特性建立其小信号模型, 研究短路比、交流系统阻抗角在换流器整流或逆变工作状态下对系统小信号稳定性影响的差异; 文献[9]考虑环流抑制器的作

基金项目: 北京市自然科学基金项目资助(3172015); 北京市教委科技计划面上项目资助(KM201911232016)

用,建立了10阶MMC小信号模型;文献[10]在稳态模型的基础上,提出一种评价环流抑制器性能优劣的指标,分析环流抑制器在不同工况下的适用性;文献[11]参考Hankel奇异值降阶法和平衡理论,提出降阶的MMC小信号模型。上述文献所建立的MMC小信号模型,为进一步分析多端MMC系统的稳定性问题奠定了基础。

文献[12]建立基于MMC的柔性直流电网简化小信号模型,研究平波电抗器、桥臂电感和控制参数对系统小信号稳定性的影响,但建模过程未考虑环流抑制器和MMC内部动态特性的影响;文献[13]基于文献[7]建立了弱交流电网下MMC的小信号模型,分析了此工况下影响系统小信号稳定的关键因素;文献[14]重点研究了MMC主控制器控制参数在换流站整流或逆变工作状态时,对系统小信号稳定性影响的差异;文献[15-16]分别研究直流线路上平波电抗器和限流电抗器对多端柔性直流输电系统小信号稳定性的影响;文献[17]基于模块化的构思,将直流电网划分为交流侧、换流站和直流线路三部分分别建模,分析了控制参数对系统稳定性的影响。

上述多端系统稳定性建模过程中,多个换流站间控制策略均采用主从控制,一旦主换流站发生故障或通信消失,其他换流站无法参与直流电压调节及潮流分配,导致系统失稳。文献[18-19]提出了作用于VSC换流站的直流电压斜率控制策略,其不依赖换流站间通信,可解决主从控制的缺陷。直流电压斜率控制器及其衍生控制策略已在实际直流电网中应用,但研究表明此控制器对控制参数和斜率参数取值十分敏感,取值不当将造成换流站间功率重新分配失衡。文献[20]探讨了下垂控制系数对直流电网动态稳定的影响,通过劳斯判据得到维持系统稳定的下垂系数范围;文献[21]建立采用直流电压斜率控制器的VSC-MTDC小信号模型,验证控制器斜率参数对系统小信号稳定性的影响,但未延伸至基于MMC的柔性直流电网建模分析;文献[22]参考实际直流工程,建立三端MMC的等效网络模型,并基于斜率控制改进了传统协同控制策略;文献[23]提出下垂控制的柔性直流电网参数优化方法,提升了系统小信号稳定性。

本文建立了基于直流电压斜率控制的柔性直流电网小信号模型,考虑了多端系统换流站间的协调控制、MMC内部动态特性、环流抑制器作用以及含限流电抗器的直流电网模型。运用特征根和根轨迹分析理论重点研究直流电压斜率控制器PI参数、斜率参数和环流抑制器PI参数对系统稳定性的影响;同时,引入参与因子分析法识别二倍频环流状

态变量所对应的参与程度最高的模态,进一步研究环流抑制器控制参数对二倍频环流抑制的影响效果;在PSCAD/EMTDC平台搭建张北柔性直流电网试验示范工程仿真算例,通过对比小信号模型和电磁暂态模型二者结果,验证了结论的正确性。

1 柔性直流电网小信号建模

1.1 MMC换流站主电路小信号模型

图1为MMC换流站的a相拓扑图,其中子模块(Sub-Modular, SM)采用半桥结构, L_{eq} 和 R_{eq} 分别为交流侧等效电抗和电阻; u_{sa} 和 i_{sa} 分别为交流侧电压和电流; L_a 和 R_a 分别为桥臂电感和电阻; u_{pa} 和 u_{na} 分别为上、下桥臂电压; i_{pa} 和 i_{na} 分别为上、下桥臂电流; i_{cira} 为桥臂环流; U_{dc} 和 I_{dc} 分别为直流侧出口处电压和电流; N 为单个桥臂SM的个数。

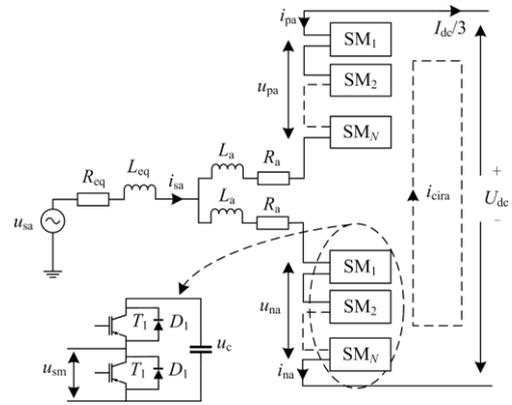


图1 a相MMC换流站的拓扑图

Fig. 1 Topology of a-phase MMC converter station

MMC换流站建模过程考虑桥臂环流和SM电容电压波动的影响。其中,桥臂电流 i_{pa} 和 i_{na} 由直流分量、基频分量及偶数次环流分量构成,若忽略4阶以上环流分量,桥臂电流的瞬时值可表示为

$$\begin{cases} i_{pa} = \frac{1}{3} I_{dc} - \frac{1}{2} I_{sa} \sin(\omega t + \beta_1) + I_{cira} \sin(2\omega t + \beta_2) \\ i_{na} = \frac{1}{3} I_{dc} + \frac{1}{2} I_{sa} \sin(\omega t + \beta_1) + I_{cira} \sin(2\omega t + \beta_2) \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_{sa} 和 β_1 分别为基频分量的幅值和相角; I_{cira} 和 β_2 分别为二倍频环流分量的幅值和相角。

SM电容电压 u_c 是由直流分量 $U_{c,dc}$ 、基频分量 $u_{c,ac1}$ 和二倍频分量 $u_{c,ac2}$ 组成,若忽略三倍频以上分量,电容电压的瞬时值可表示为

$$u_c = U_{c,dc} + U_{c,ac1} \sin(\omega t + \theta_1) + U_{c,ac2} \sin(2\omega t + \theta_2) \quad (2)$$

式中: $U_{c,ac1}$ 和 θ_1 分别为基频分量的幅值和相角;

U_{c_ac2} 和 θ_2 分别为二倍频分量的幅值和相角。

由 KVL 和 KCL 定律, 可以列出换流器直流侧与交流侧相关联的电压表达式和环流表达式, 即

$$\begin{cases} U_{dc} = 2U_{pa_dc} + \frac{2}{3}R_a I_{dc} + \frac{2}{3}L_a \frac{dI_{dc}}{dt} \\ u_{sa} = -u_{pa_c1} + L_{eq} \frac{di_{sa}}{dt} + R_{eq} i_{sa} \\ 2u_{pa_c2} + 2L_a \frac{di_{cira}}{dt} + 2R_a i_{cira} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, U_{pa_dc} 、 u_{pa_c1} 、 u_{pa_c2} 分别为上桥臂电压的直流、基频和二倍频分量。

由文献[5]可知, 式(1)中桥臂电流各项分量的状态方程式为

$$\begin{cases} \frac{dI_{dc}}{dt} = \frac{3U_{dc}}{2L_a} - \frac{3NMU_{c_ac1} \cos(\alpha - \theta_1)}{4L_a} - \frac{3NU_{c_dc}}{2L_a} - \\ \frac{R_a I_{dc}}{L_a} + \frac{3NU_{cira} U_{c_ac2} \cos(\varphi - \theta_2)}{2L_a U_{dc}} \\ \frac{dI_{sa}}{dt} = \frac{1}{L_{eq}} U_{sa} - \frac{NMU_{c_dc} \sin(\omega t + \alpha)}{2L_{eq}} - \frac{R_{eq} I_{sa}}{L_{eq}} + \\ \frac{NU_{c_ac1} \sin(\omega t + \theta_1)}{2L_{eq}} + \frac{NU_{cira} U_{c_ac1} \cos(\omega t + \varphi - \theta_1)}{2L_{eq} U_{dc}} - \\ \frac{NMU_{c_ac2} \cos(\omega t + \theta_2 - \alpha)}{4L_{eq}} \\ \frac{dI_{cira}}{dt} = \frac{-NU_{cira} U_{c_dc} \sin(2\omega t + \varphi)}{L_a U_{dc}} - \frac{R_a I_{cira}}{L_a} - \\ \frac{NMU_{c_ac1} \cos(2\omega t + \theta_1 + \alpha)}{4L_a} - \frac{NU_{c_ac2} \sin(2\omega t + \theta_2)}{2L_a} \end{cases} \quad (4)$$

式中: U_{cira} 和 φ 分别为环流抑制器中电压修正分量的幅值和相角; M 和 α 分别为调制比和基频参考电压相角。

同时, 得到式(2)中 SM 电容电压各项分量的状态方程式为

$$\begin{cases} \frac{dU_{c_dc}}{dt} = \frac{1}{6C} I_{dc} + \frac{U_{cira} I_{cira}}{2CU_{dc}} \cos(\varphi - \beta_2) + \\ \frac{1}{8C} MI_{sa} \cos(\alpha - \beta_1) \\ \frac{du_{c_ac1}}{dt} = -\frac{1}{4C} I_{sa} \sin(\omega t + \beta_1) - \frac{1}{4C} MI_{cira} \cos(\omega t + \beta_2 - \alpha) - \\ \frac{1}{6C} MI_{dc} \sin(\omega t + \alpha) - \frac{1}{4C} \frac{U_{cira} I_{sa}}{U_{dc}} \cos(\omega t + \varphi - \beta_1) \\ \frac{du_{c_ac2}}{dt} = -\frac{1}{8C} MI_{sa} \cos(2\omega t + \alpha + \beta_1) + \\ \frac{1}{2C} I_{cira} \sin(2\omega t + \beta_2) + \frac{U_{cira} I_{dc}}{3CU_{dc}} \sin(2\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (5)$$

式中, C 为子模块电容值。

将式(4)和式(5)分别经过基频 $d-q$ 变换和二倍频 $d-q$ 变换, 再经线性化处理, 得到单端 MMC 换流站主电路的小信号模型, 即

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_s = \mathbf{A}_s \Delta \mathbf{x}_s + \mathbf{B}_s \Delta \mathbf{u}_s \quad (6)$$

式中, 状态变量矩阵与输入变量矩阵分别为

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{x}_s &= [\Delta U_{c_dc}, \Delta u_{c_1d}, \Delta u_{c_1q}, \Delta u_{c_2d}, \Delta u_{c_2q}, \Delta I_{dc}, \\ &\Delta I_{sd}, \Delta I_{sq}, \Delta I_{cird}, \Delta I_{cirq}]^T \\ \Delta \mathbf{u}_s &= [\Delta U_{sd}, \Delta U_{sq}, \Delta U_{dc}, \Delta \omega, \Delta U_{c1d}, \Delta U_{c1q}, \\ &\Delta U_{cird}, \Delta U_{cirq}]^T \end{aligned}$$

式中: ΔU_{c_dc} 表示 SM 电容电压的直流分量变化量; Δu_{c_1d} 和 Δu_{c_1q} 分别表示 SM 电容电压的基频 $d-q$ 分量变化量; Δu_{c_2d} 和 Δu_{c_2q} 分别表示 SM 电容电压的二倍频 $d-q$ 分量变化量; ΔU_{sd} 、 ΔU_{sq} 、 ΔI_{sd} 、 ΔI_{sq} 分别表示交流侧电压和电流的 $d-q$ 分量变化量; ΔI_{cird} 和 ΔI_{cirq} 表示二倍频环流的 $d-q$ 分量变化量; ΔU_{c1d} 和 ΔU_{c1q} 表示主控制器输出的调制电压 $d-q$ 分量变化量; ΔU_{cird} 和 ΔU_{cirq} 分别表示环流抑制器输出的二倍频调制电压 $d-q$ 分量变化量; ΔU_{dc} 和 ΔI_{dc} 分别表示换流站出口处直流电压、电流的变化量。

1.2 换流站控制系统小信号模型

1.2.1 直流电压斜率控制器小信号模型

目前在柔性直流电网小信号建模过程中, 系统级控制策略多采用主从控制, 各换流站多采用传统的双闭环 PI 控制, 即外环为电压环或功率环, 内环为电流环。众所周知, 主从控制的缺点就是当主换流站发生故障时, 从换流站无法参与直流电压与潮流分布控制, 进而导致整个系统失稳。

本文在建立换流站控制系统的小信号模型时, 提出基于直流电压斜率控制的小信号模型。当换流站发生故障(甚至退出运行)失去稳定直流电压能力时, 系统可沿着设定的斜率特性曲线搜寻新的稳定运行点, 实现功率的快速分配。图 2 为直流电压斜率控制器框图, P_{ref} 和 P_m 分别为有功功率的参考值和测量值; Q_{ref} 和 Q_m 分别为无功功率的参考值和测量值; U_{dcref} 和 U_{dc} 分别为直流电压的参考值和测量值; I_{dref} 和 I_{qref} 分别为内环控制器输入的 $d-q$ 电流分量参考值; I_{sd} 和 I_{sq} 分别为 MMC 交流侧 $d-q$ 电流分量的测量值; U_{sd} 和 U_{sq} 分别为 MMC 交流侧 $d-q$ 电压分量的测量值; U_{c1d} 和 U_{c1q} 分别为控制器输出的电压 $d-q$ 分量参考值; U_{refa} 、 U_{refb} 和 U_{refc} 分别为 $d-q$

反变换后的三相调制电压； k 为直流电压斜率控制系数。

此时，外环状态方程中考虑了斜率变量 k 与有功功率偏差量的影响。设图 2 中控制器外环 PI 环节积分状态变量分别为 x_1 和 x_2 ，考虑直流电压斜率控制后，控制器外环的状态方程式为

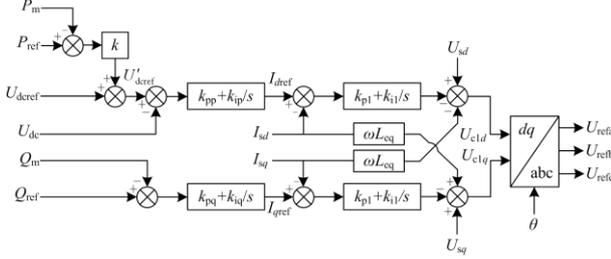


图 2 基于直流电压斜率控制的换流站控制器框图

Fig. 2 Block diagram of converter station controller based on DC voltage slope control

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = U_{dref} + k(P_{ref} - P_m) - U_{dc} \\ \frac{dx_2}{dt} = Q_{ref} - Q_m \end{cases} \quad (7)$$

其中，有功功率 P_m 与无功功率 Q_m 可表示为

$$\begin{cases} P_m = \frac{3}{2}(U_{sd}I_{sd} + U_{sq}I_{sq}) \\ Q_m = \frac{3}{2}(U_{sd}I_{sq} - U_{sq}I_{sd}) \end{cases} \quad (8)$$

设图 2 中控制器内环 PI 环节积分状态变量分别为 x_3 和 x_4 ，控制器内环的状态方程组为

$$\begin{cases} \frac{dx_3}{dt} = I_{dref} - I_{sd} \\ \frac{dx_4}{dt} = I_{qref} - I_{sq} \end{cases} \quad (9)$$

内环电流的 $d-q$ 分量参考值即为控制器的外环输出，其表达式为

$$\begin{cases} I_{dref} = k_{pp} \frac{dx_1}{dt} + k_{ip} x_3 \\ I_{qref} = k_{pq} \frac{dx_2}{dt} + k_{iq} x_4 \end{cases} \quad (10)$$

式中： k_{pp} 和 k_{pq} 分别为外环的比例增益； k_{ip} 和 k_{iq} 分别为外环的积分增益。

控制器内环输出的电压调制分量可表示为

$$\begin{cases} U_{c1d} = U_{sd} - \omega L_{eq} I_{sq} - (k_{p1} \frac{dx_3}{dt} + k_{i1} x_1) \\ U_{c1q} = U_{sq} + \omega L_{eq} I_{sd} - (k_{p1} \frac{dx_4}{dt} + k_{i1} x_2) \end{cases} \quad (11)$$

式中， k_{p1} 和 k_{i1} 分别为内环比例增益和积分增益。

1.2.2 环流抑制器小信号模型

鉴于 MMC 特殊结构与调制方式，各相桥臂在工作时投切 SM 的个数很难均等，导致上、下桥臂电压之和不一致，在三相桥臂间形成内部环流，造成桥臂电流畸变。环流抑制器可以有效抑制相间环流，削弱桥臂电流中存在的二倍频负序分量，降低换流器的损耗。环流抑制器的控制框图如图 3 所示。

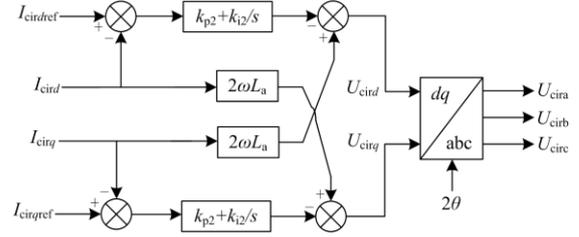


图 3 MMC 环流抑制器的控制框图

Fig. 3 Block diagram of MMC circulating current suppressor

图 3 中， $I_{cirdref}$ 和 $I_{cirqref}$ 分别为二倍频环流 $d-q$ 分量的参考值； I_{cird} 和 I_{cirq} 分别为二倍频环流 $d-q$ 分量的测量值； $2\omega L_a$ 为前馈补偿耦合项； U_{cird} 和 U_{cirq} 分别为环流抑制器输出的电压调制分量的参考值； U_{cira} 、 U_{cirb} 和 U_{circ} 分别为 Park 反变换后的三相调制电压。将环流抑制器输出的调制电压 U_{cir} 与主控制器输出的调制电压 U_{ref} 相叠加，采用最近电平逼近策略获得桥臂触发信号，控制 SM 的投入与切除。

设环流抑制器 PI 环节积分状态变量分别为 f_1 和 f_2 ，列出环流抑制器的状态方程为

$$\begin{cases} \frac{df_1}{dt} = I_{cirdref} - I_{cird} \\ \frac{df_2}{dt} = I_{cirqref} - I_{cirq} \end{cases} \quad (12)$$

环流抑制器输出的二倍频电压调制分量可表示为

$$\begin{cases} U_{cird} = 2\omega L_a I_{cirq} + (k_{p2} \frac{df_1}{dt} + k_{i2} f_1) \\ U_{cirq} = -2\omega L_a I_{cird} + (k_{p2} \frac{df_2}{dt} + k_{i2} f_2) \end{cases} \quad (13)$$

式中， k_{p2} 和 k_{i2} 分别为环流抑制器的比例增益和积分增益。

联立式(7)—式(13)，经线性化处理，得到换流站控制系统小信号模型为

$$\begin{cases} \Delta \dot{x}_c = A_c \Delta x_c + B_c \Delta u_c \\ \Delta y_c = C_c \Delta x_c + D_c \Delta u_c \end{cases} \quad (14)$$

式中，控制系统状态变量矩阵、输入变量矩阵和输

出变量矩阵分别为

$$\begin{aligned}\Delta \mathbf{x}_c &= [\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \Delta x_4]^T \\ \Delta \mathbf{u}_c &= [\Delta I_{sd}, \Delta I_{sq}, \Delta I_{cirtd}, \Delta I_{cirq}, \Delta U_{sd}, \Delta U_{sq}, \Delta P_{ref}, \\ &\quad \Delta Q_{ref}, \Delta U_{dref}, \Delta U_{dc}]^T \\ \Delta \mathbf{y}_c &= [\Delta U_{cirtd}, \Delta U_{cirq}, \Delta U_{c1d}, \Delta U_{c1q}]^T\end{aligned}$$

于是, 将式(6)和式(14)通过预设接口组合得到单端 MMC 换流站全局小信号模型为

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_m = \mathbf{A}_m \Delta \mathbf{x}_m + \mathbf{B}_m \Delta \mathbf{u}_m \quad (15)$$

式中, $\Delta \mathbf{x}_m = [\Delta \mathbf{x}_s, \Delta \mathbf{x}_c]^T$ 。

1.3 含限流电抗器的直流电网小信号模型

图 4 为含限流电抗器的直流电网单极等效模型, 各条直流电缆线路均采用集中参数表示的“ π ”型等效电路。以 MMC1 和 MMC3 换流站间的直流电缆线路为例: R_{13} 为等效电阻, L_{13} 为等效电感, C_{13} 为等效电容; I_{13} 为流过该线路阻抗上的电流; L_{c13} 和 L_{c31} 表示该线路两端串联的限流电抗器; I_{c13} 和 I_{c31} 分别为流过对应限流电抗器上的电流。图 4 中实线箭头所标识的电流为选取的状态变量, 虚线箭头所标识的电流为中间变量。

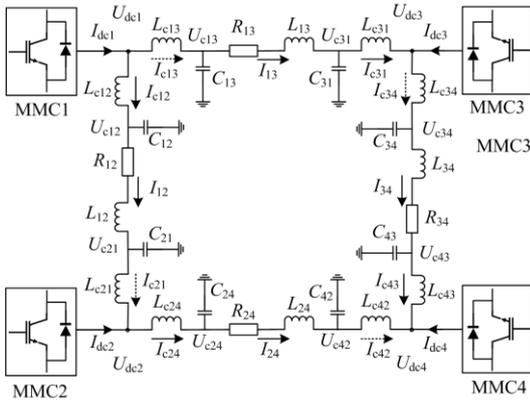


图 4 含限流电抗器的直流电网单极接线图

Fig. 4 Single-pole diagram of DC grid with current-limiting reactors

由 KVL 定律, 得到换流站 MMC1 与 MMC3 之间电缆线路上的电流状态方程组为

$$\begin{cases} \frac{dI_{c31}}{dt} = \frac{U_{c31} - U_{dc3}}{L_c} \\ \frac{dI_{13}}{dt} = \frac{U_{c13} - U_{c31}}{L_{13}} - \frac{R_{13}}{L_{13}} I_{13} \end{cases} \quad (16)$$

式中: U_{dc1} 和 U_{dc3} 分别为换流站 MMC1 与 MMC3 出口处的直流电压; U_{c13} 和 U_{c31} 分别为电缆线路对地等效电容电压。

由 KCL 定律, 得到换流站 MMC1 与 MMC3 之间电缆线路上的电压状态方程组为

$$\begin{cases} \frac{dU_{c13}}{dt} = \frac{1}{C_{13}} (I_{dc1} - I_{c12} - I_{13}) \\ \frac{dU_{c31}}{dt} = \frac{1}{C_{31}} (I_{13} - I_{c31}) \end{cases} \quad (17)$$

同理, 可列写其余换流站间直流线路的状态方程组。经整理后得到含限流电抗器直流输电线路网络的小信号模型为

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{A}_1 \Delta \mathbf{x}_1 + \mathbf{B}_1 \Delta \mathbf{u}_1 \quad (18)$$

式中, 状态变量矩阵和输入变量矩阵分别为

$$\begin{aligned}\Delta \mathbf{x}_1 &= [\Delta I_{cij}, \Delta I_{ij}, \Delta U_{cij}]^T \\ \Delta \mathbf{u}_1 &= [\Delta I_{dc1}, \Delta I_{dc2}, \Delta I_{dc3}, \Delta I_{dc4}]^T\end{aligned}$$

其中, 矩阵各变量分别为

$$\begin{aligned}\Delta I_{cij} &= [\Delta I_{c31}, \Delta I_{c12}, \Delta I_{c24}, \Delta I_{c43}]^T \\ \Delta I_{ij} &= [\Delta I_{13}, \Delta I_{12}, \Delta I_{24}, \Delta I_{34}]^T \\ \Delta U_{cij} &= [\Delta U_{c13}, \Delta U_{c31}, \Delta U_{c12}, \Delta U_{c21}, \Delta U_{c24}, \\ &\quad \Delta U_{c42}, \Delta U_{c34}, \Delta U_{c43}]\end{aligned}$$

1.4 全局小信号模型

综上, 将所得 MMC 换流站的小信号模型与含限流电抗器的直流电网小信号模型相结合, 得到柔性直流电网全局小信号模型如式(20)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{x}}_{m1} \\ \Delta \dot{\mathbf{x}}_{m2} \\ \Delta \dot{\mathbf{x}}_{m3} \\ \Delta \dot{\mathbf{x}}_{m4} \\ \Delta \dot{\mathbf{x}}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{m1} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{A}_{1p1} \\ 0 & \mathbf{A}_{m2} & 0 & 0 & \mathbf{A}_{1p2} \\ 0 & 0 & \mathbf{A}_{m3} & 0 & \mathbf{A}_{1p3} \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{A}_{m4} & \mathbf{A}_{1p4} \\ \mathbf{A}_{1q1} & \mathbf{A}_{1q2} & \mathbf{A}_{1q3} & \mathbf{A}_{1q4} & \mathbf{A}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_{m1} \\ \Delta \mathbf{x}_{m2} \\ \Delta \mathbf{x}_{m3} \\ \Delta \mathbf{x}_{m4} \\ \Delta \mathbf{x}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{m1} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{B}_{1p1} \\ 0 & \mathbf{B}_{m2} & 0 & 0 & \mathbf{B}_{1p2} \\ 0 & 0 & \mathbf{B}_{m3} & 0 & \mathbf{B}_{1p3} \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{B}_{m4} & \mathbf{B}_{1p4} \\ \mathbf{B}_{1q1} & \mathbf{B}_{1q2} & \mathbf{B}_{1q3} & \mathbf{B}_{1q4} & \mathbf{B}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{u}_{m1} \\ \Delta \mathbf{u}_{m2} \\ \Delta \mathbf{u}_{m3} \\ \Delta \mathbf{u}_{m4} \\ \Delta \mathbf{u}_1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中, 状态矩阵记为 \mathbf{A} , 阶数为 80×80 。由此, 本文建立了四端柔性直流电网小信号模型, 在此基础上, 参考李雅普诺夫第一法和特征值根轨迹分析法, 分析控制参数对系统小信号稳定性的影响。

2 小信号稳定性分析

本文以张北柔性直流电网试验示范工程为例, 建立其小信号稳定性模型, 分析控制参数对系统稳定性的影响。设置丰宁与北京两个换流站为直流电压斜率控制, 康宝和张北两个换流站为常规定有功

控制。表 1 为各换流站主要参数表，表 2 为直流线路参数表，表 3 为系统稳态运行时各换流站控制器参数表，该数据是由 PSCAD/EMTDC 仿真平台获得。

表 1 换流站主要参数表

Table 1 Parameters of converter stations

参数	康宝站 (MMC1)	张北站 (MMC2)	丰宁站 (MMC3)	北京站 (MMC4)
交流电压/kV	500	220	500	220
直流电压/kV	±500	±500	±500	±500
容量/MW	1 700	3 400	1 700	3 400
SM 数量/个	200	200	200	200

表 2 直流线路参数表

Table 2 Parameters of DC lines

线路	L13	L12	L24	L34
线路长度/km	206	49.6	205.3	186.3
等效电阻/Ω	2.02	0.48	2.01	1.84
等效电感/H	0.175	0.04	0.174	0.16
等效电容/μF	1.41	0.34	1.41	1.28

表 3 各换流站控制器参数表

Table 3 Control parameters of each converter station

换流站	参数名称	数值
康宝站 (MMC1)	有功增益	$k_{pp1}=2, k_{ip1}=0.01$
	无功增益	$k_{pq1}=2, k_{iq1}=0.05$
	内环增益	$k_{pcc1}=1, k_{icc1}=0.5$
张北站 (MMC2)	有功增益	$k_{pp2}=2, k_{ip2}=0.01$
	无功增益	$k_{pq2}=2, k_{iq2}=0.05$
	内环增益	$k_{pcc2}=0.1, k_{icc2}=0.08$
丰宁站 (MMC3)	电压增益	$k_{pu3}=10, k_{iu3}=0.01$
	斜率	$k_3=0.1$
北京站 (MMC4)	无功增益	$k_{pq3}=12, k_{iq3}=0.01$
	内环增益	$k_{pcc3}=0.5, k_{icc3}=1$
	电压增益	$k_{pu4}=10, k_{iu4}=0.05$
北京站 (MMC4)	斜率	$k_4=0.2$
	无功增益	$k_{pq4}=8, k_{iq4}=0.05$
	内环增益	$k_{pcc4}=0.8, k_{icc4}=1.5$

2.1 直流电压斜率控制器控制参数影响分析

以丰宁站为例，分析外环 PI 控制参数和直流电压斜率参数对系统稳定性的影响。

2.1.1 外环 PI 控制参数影响分析

当系统运行于额定工况下，分别设置外环比例增益 k_{pu3} 以 0.1 为步长由 10 增大到 20，积分增益 k_{iu3} 以 0.1 为步长由 0.01 增大到 10，其他参数保持不变。图 5 为外环的比例增益、积分增益分别变化时系统的主导极点图。

由图 5 可知，若增加直流电压斜率控制器中外环比例增益 k_{pu3} ，其主导极点从复平面的左半平面

向右半平面移动，削弱系统稳定性，且当 $k_{pu3} = 17.8$ 时，主导极点穿越虚轴进入右半平面，系统失去稳定；若在合理范围内增加外环积分增益 k_{iu3} ，其主导极点始终位于左半平面，系统保持稳定，说明积分增益 k_{iu3} 对系统稳定性影响较小。

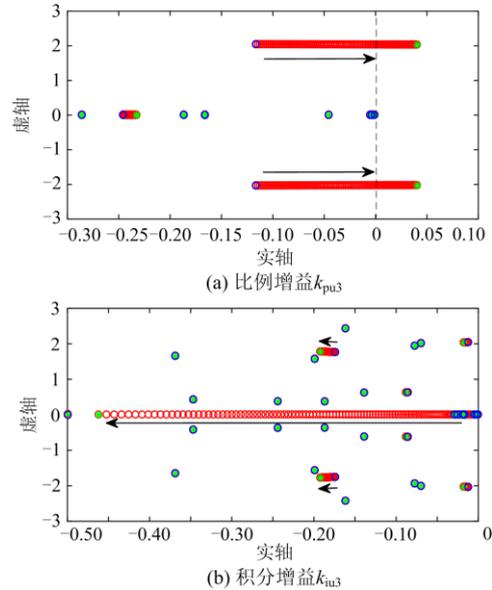


图 5 外环控制参数变化时的主导极点图

Fig. 5 Dominant pole diagrams when outer loop control parameters are changed

2.1.2 直流电压斜率参数影响分析

直流电压斜率参数取值不当，将直接影响各换流站满足系统稳定所需的电压补偿值大小，造成系统失稳。当系统运行于额定工况下，设置丰宁站斜率参数 k_3 以 0.01 为步长由 0.1 增加到 1，其他控制参数保持不变。图 6 为斜率参数 k_3 变化时系统的主导极点图。

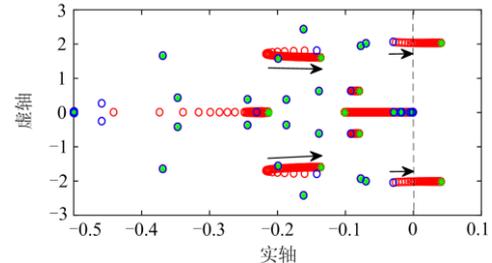


图 6 斜率 k_3 变化时的主导极点图

Fig. 6 Dominant pole diagram when the slope k_3 is changed

由图 6 可知，随着斜率参数 k_3 取值的增大，主导极点从复平面的左半平面向右半平面移动，削弱系统稳定性，且当 $k_3 = 0.25$ 时，主导极点穿越虚轴，系统失去稳定。

2.2 环流抑制器控制参数影响分析

2.2.1 PI 控制参数影响分析

以康宝站为例, 分析环流抑制器比例增益和积分增益对系统稳定性的影响。当系统运行于额定工况下, 分别设置康宝站环流抑制器比例增益 k_{pci} 以 0.1 为步长由 10 增大到 15, 积分增益 k_{ici} 以 0.1 为步长由 5 增大到 10, 其他参数保持不变。图 7 为比例、积分增益分别变化时系统的主导极点图。

由图 7 可知, 增大比例增益时, 其主导极点向复平面的右半平面移动且逐渐靠近虚轴, 系统稳定性削弱; 在一定范围内增大积分增益, 其主导极点向复平面的左半平面移动且逐渐远离虚轴, 系统稳定性增强。

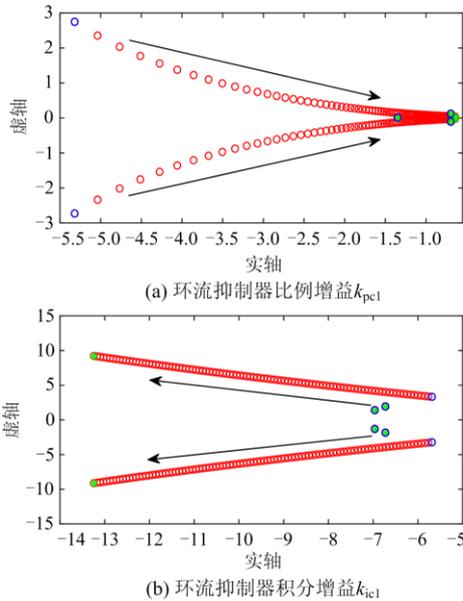


图 7 环流抑制器 PI 控制参数变化时系统主导极点图

Fig. 7 Dominant pole diagrams when the PI control parameters of the circulation suppressor are changed

2.2.2 状态变量参与因子分析

为了分析控制参数对二倍频环流抑制的影响效果, 利用参与因子分析法得到二倍频环流状态变量所对应的参与程度最高的模态, 观察该模态根轨迹的变化情况。

以康宝站为研究对象, 利用状态矩阵特征值分析方法, 计算式(15)的特征根, 将左特征向量乘以右特征向量再标幺化处理, 得到状态变量对应的参与因子。表 4 为康宝站各模态对应的关键参与因子。

由表 4 可知, 对于模态 1, 二倍频环流的 $d-q$ 状态变量参与程度最高, 是影响模态 1 稳定的关键因素。分别设置康宝站环流抑制器比例增益 k_{pci} 以 0.1 为步长由 10 增大到 15, 积分增益 k_{ici} 以 0.1 为步

长由 5 增大到 10, 其他参数保持不变。图 8 为模态 1 对应的根轨迹变化趋势。

表 4 康宝站各模态对应的关键参与因子

Table 4 Key participation factors corresponding to each mode at Kangbao converter station

模态	特征值	参与因子
1	$-96.57 \pm j55.73$	$I_{cir d}(47.2\%), I_{cir q}(47.2\%)$
2	$-5.6 \pm j3.23$	$I_{sd}(42.5\%), I_{sq}(42.1\%)$
3	$-0.28 \pm j3.78$	$U_{c_dc}(20\%), U_{c_ld}(22.6\%), I_{dc}(40.2\%)$
4	$-0.31 \pm j2.3$	$U_{c_2d}(45.3\%), U_{c_2q}(41.6\%)$
5	$-0.095 \pm j1.66$	$U_{c_dc}(23.3\%), U_{c_ld}(22.6\%), U_{c_lq}(36.1\%)$
6	$-0.47 \pm j0.5$	$x_1(36.8\%), x_2(38.4\%)$
7	$-0.105 \pm j0.29$	$f_1(49.8\%), f_2(49.7\%)$
8	$0.017 \pm j0.0003$	$x_3(49.7\%), x_4(49.6\%)$

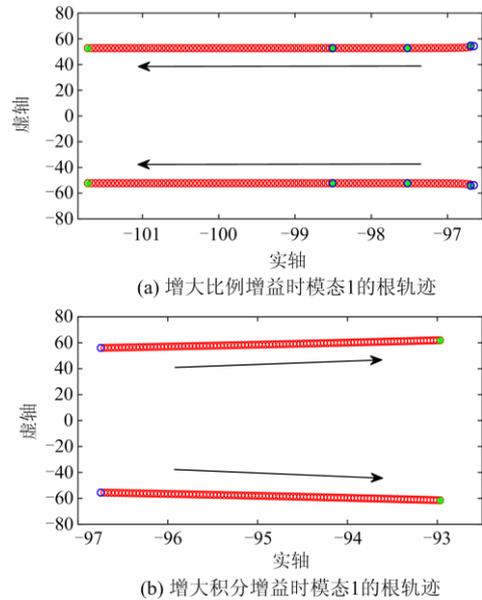


图 8 模态 1 对应的根轨迹变化趋势

Fig. 8 Trend of root locus corresponding to mode 1

由图 8 可知, 当比例增益增大时, 模态 1 根轨迹向复平面左半平面移动, 说明模态 1(即二倍频环流)对换流站稳定性的影响会增强, 从而反映环流抑制器抑制环流的效果削弱; 当积分增益增大时, 模态 1 根轨迹向复平面右半平面移动, 说明模态 1(即二倍频环流)对换流站稳定性的影响会削弱, 从而反映环流抑制器抑制环流的效果增强。

3 仿真实验

为了验证本文建立的小信号模型及分析结论的正确性, 利用 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建了张北柔性直流电网试验示范工程仿真算例, 对直流电压斜率控制器外环比例增益、直流电压斜率系数以及环流抑制器 PI 控制参数进行仿真实验验证。

3.1 直流电压斜率控制器外环比例增益仿真

以丰宁站为例，选取直流电压斜率控制器的外环比例增益 k_{pu3} 分别为 17 和 18，稳态运行时丰宁站接收有功功率理论值为 1 500 MW(实际略低于 1 500 MW)。当系统运行至 3 s 时，调整丰宁站有功功率指令值从 1 500 MW 至 1 200 MW。观察不同外环比例增益下有功功率的波形，如图 9 所示。

由图 9(a)可知，丰宁站外环比例增益 k_{pu3} 为 17 时，3 s 前后有功功率均能跟随给定值，且波形稳定。由图 9(b)可知，丰宁站外环比例增益 k_{pu3} 为 18 时，3 s 后有有功功率波形振荡发散，导致系统失稳。由此说明，直流电压斜率控制器的外环比例增益超过某个阈值(本文即 17.8)，系统稳定性下降，与第 2.1.1 节中结论保持一致。

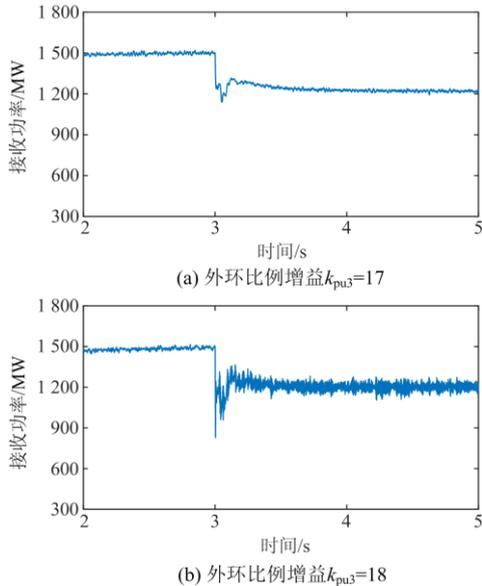


图 9 丰宁站接收有功功率变化前后的波形对比
Fig. 9 Waveform comparisons when receiving active power is changed at Fengning station

3.2 直流电压斜率控制器斜率参数仿真

以丰宁站为例，选取斜率 k_3 分别为 0.2 和 0.3，当丰宁站有功功率在 3 s 时由 1 500 MW 降至 1 200 MW 时，观察不同斜率取值下有功功率的波形，如图 10 所示。

由图 10(a)可知，斜率系数 $k_3 = 0.2$ 时，3 s 前后有功功率均能跟随给定值，且波形平稳。由图 10(b)可知，斜率系数 $k_3 = 0.3$ 时，3 s 后有有功功率波形发生渐进振荡，导致系统失稳。由此说明，当斜率 k_3 取值超过某一阈值(本文即 0.25)时，系统稳定性下降，与第 2.1.2 节中结论保持一致。

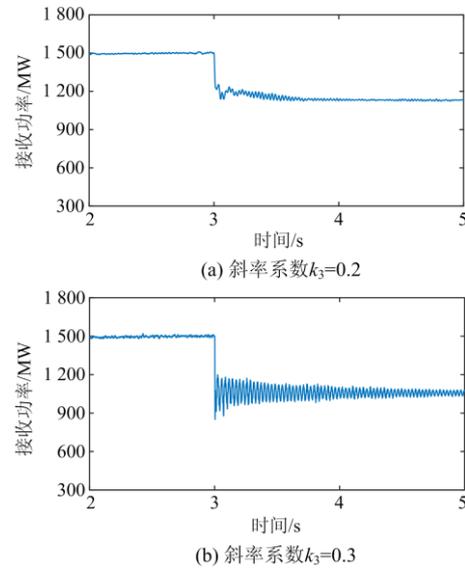


图 10 不同斜率取值时丰宁站有功功率变化前后的波形对比
Fig. 10 Waveform comparisons with different slope values when receiving active power is changed at Fengning station

3.3 环流抑制器 PI 控制参数仿真

以康宝站为测试对象，验证环流抑制器 PI 控制参数对环流抑制效果的影响，设置仿真时长为 5 s，环流抑制器 2 s 后投入运行。

3.3.1 环流抑制器比例增益仿真

当系统运行至 2 s 时，投入环流抑制器，其比例增益 k_{pci} 初始值设为 10；当系统运行至 3 s，增大比例增益 k_{pci} 为 30，其他参数保持不变。观察二倍频环流变化情况，图 11 为 MMC 中二倍频环流波形。

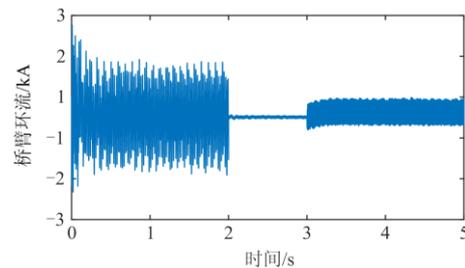


图 11 比例增益改变时二倍频环流波形
Fig. 11 Waveform of circulating current when proportional gain is changed

由图 11 可知，环流抑制器未投入之前，桥臂环流在 $[-1.5 \text{ kA}, 1.5 \text{ kA}]$ 变化，其幅值较大；在 2 s 投入环流抑制器之后，桥臂环流减小接近为零，有效抑制了环流；当运行至 3 s 时，比例增益 k_{pci} 由 10 增大到 30，桥臂环流在 $[-0.5 \text{ kA}, 0.5 \text{ kA}]$ 变化，环流抑制效果减弱。

3.3.2 环流抑制器积分增益仿真

当系统运行至 2 s 时, 投入环流抑制器, 其积分增益 k_{ic1} 初始值设为 1; 当系统运行至 3 s, 增大积分增益 k_{ic1} 为 5, 其他参数保持不变。观察二倍频环流变化情况, 图 12 为二倍频环流的变化波形。

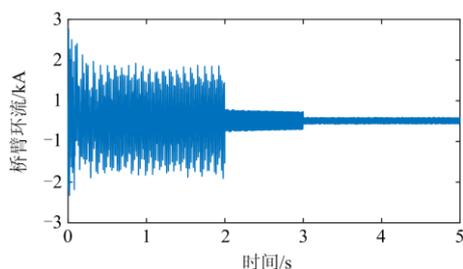


图 12 积分增益改变时二倍频环流波形

Fig. 12 Waveform of circulating current when the integral gain is changed

由图 12 可知, 在 2 s 投入环流抑制器后, 桥臂环流在 $[-0.6 \text{ kA}, 0.6 \text{ kA}]$ 变化, 一定程度上抑制了二倍频环流; 当运行至 3 s 时, 积分增益 k_{ic1} 增大到 5, 桥臂环流减小在 $[-0.1 \text{ kA}, 0.1 \text{ kA}]$ 变化, 环流抑制器抑制二倍频环流的效果增强。

以上验证了第 2.2.2 节参与因子分析结论的正确性。因此, 有必要合理选择环流抑制器控制参数, 防止二倍频环流谐波过大造成换流站内部动态紊乱, 造成系统失稳。

4 结论

本文提出了基于直流电压斜率控制的柔性直流电网小信号稳定性模型, 研究直流电压斜率控制器的控制参数、斜率系数以及环流抑制器的控制参数对系统稳定性影响。通过与 PSCAD/EMTDC 搭建的直流电网仿真模型对比, 验证了小信号模型的正确性, 并得出以下结论。

(1) 直流电压斜率控制器的 PI 控制参数对系统稳定性有一定影响, 增大其外环比例增益将削弱系统稳定性, 当超过某一阈值(本文即 17.8)时, 系统将失去稳定; 在合理范围内增大其外环积分增益, 对系统稳定性影响较小。

(2) 直流电压斜率系数对系统稳定性及功率平衡有着较大影响, 当斜率系数超过某一阈值(本文即 0.25)时, 换流站功率波动明显增加, 造成不平衡功率在系统内分布不均, 进而影响系统稳定。

(3) 环流抑制器 PI 控制参数即影响系统稳定性, 也对 MMC 二倍频环流抑制效果存在影响, 增加比例增益会削弱环流抑制器的抑制效果, 在合理范围内增加积分增益会增强环流抑制器的抑制效果。

参考文献

- [1] 汤广福, 王高勇, 贺之渊, 等. 张北 500 kV 直流电网关键技术及设备研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2097-2106. TANG Guangfu, WANG Gaoyong, HE Zhiyuan, et al. Research on key technology and equipment for Zhangbei 500 kV DC grid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2097-2106.
- [2] 杜晓磊, 郭庆雷, 吴延坤, 等. 张北柔性直流电网示范工程控制系统架构及协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 164-173. DU Xiaolei, GUO Qinglei, WU Yankun, et al. Research on control system structure and coordination control strategy for Zhangbei Demonstration Project of MMC-HVDC Grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 164-173.
- [3] YAO Zhiqing, ZHANG Qun, CHEN Peng, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 71-77. DOI: 10.1186/s41601-016-0022-0.
- [4] 康保林, 高亮, 屈子程. 基于 MMC 的直流电网故障分析和保护方案研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(13): 130-136. KANG Baolin, GAO Liang, QU Zicheng. Research on DC faults analysis and protection scheme of DC power grid based on MMC[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(13): 130-136.
- [5] 孙黎, 胡峰, 穆钢. 基于改进控制策略的 MMC-HVDC 运行特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 10-16. SUN Li, HU Feng, MU Gang. Investigation of MMC-HVDC operation performance based on improved control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 10-16.
- [6] KARWATZKI D, MERTENS A. Generalized control approach for a class of modular multilevel converter topologies[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(4): 2888-2900.
- [7] 郭春义, 殷子寒, 赵成勇. MMC-HVDC 系统在整流和逆变工作模式下的小干扰稳定性对比研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7349-7358. GUO Chunyi, YIN Zihan, ZHAO Chengyong. Comparative study on small-signal stability of MMC-HVDC system under rectification and inversion modes[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7349-7358.
- [8] 张海川, 王顺亮, 刘天琪, 等. 考虑交直流多谐波耦合的模块化多电平换流器矩阵建模[J]. 电测与仪表, 2020, 46(12): 117-124. ZHANG Haichuan, WANG Shunliang, LIU Tianqi, et al. Matrix modeling of modular multilevel converter considering multiharmonic coupling of AC and DC[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 46(12): 117-124.
- [9] JAMSHIDIFAR A, JOVICIC D. Small-signal dynamic

- DQ model of modular multilevel converter for system studies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 191-199.
- [10] 李慧, 张鹏, 刘思嘉. MMC 环流抑制策略的暂态分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 30-38.
LI Hui, ZHANG Peng, LIU Sijia. Transient analysis of MMC circulating current suppression strategy[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 30-38.
- [11] HAO Quanrui, LI Zheng, GAO Feng, et al. Reduced-order small-signal models of modular multilevel converter (MMC) and MMC-based HVDC grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(3): 2257-2268.
- [12] 张鹏, 李慧, 刘思嘉, 等. 柔性直流电网小干扰稳定性分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(8): 17-25.
ZHANG Peng, LI Hui, LIU Sijia, et al. Stability analysis of small disturbance in VSC-HVDC grid[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(8): 17-25.
- [13] 苑宾, 李探, 许建中, 等. 联接弱交流电网 MMC 系统小信号稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5339-5349.
YUAN Bin, LI Tan, XU Jianzhong, et al. Small-signal stability analysis of modular multilevel converter connected to a weak AC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5339-5349.
- [14] 王燕宁, 郭春义, 王焯. 控制系统对两端 MMC-HVDC 系统小信号稳定性的影响[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(10): 20-31.
WANG Yanning, GUO Chunyi, WANG Ye. Influence of control system on small signal stability of two terminal MMC-HVDC system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(10): 20-31.
- [15] 李慧, 罗奇, 张柏林, 等. 直流电抗器对 VSC-MTDC 输电系统稳定性的影响分析[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2641-2650.
LI Hui, LUO Qi, ZHANG Bailin, et al. Impact of DC reactors on stability of VSC-MTDC transmission system[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2641-2650.
- [16] 杨佳艺, 赵成勇, 苑宾. 限流电抗器对接入弱交流电网的 VSC-HVDC 系统的小信号稳定性影响分析[J]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2017, 44(1): 9-15.
YANG Jiayi, ZHAO Chengyong, YUAN Bin. Impact analysis of current limiting reactor on small signal stability of VSC-HVDC systems connected to the weak AC power grid[J]. Journal of North China Electric Power University: Natural Science Edition, 2017, 44(1): 9-15.
- [17] 鲁晓军, 林卫星, 向往, 等. 基于模块化多电平换流器的直流电网小信号建模[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 1143-1156.
LU Xiaojun, LIN Weixing, XIANG Wang. Small signal modeling of MMC-based DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 1143-1156.
- [18] 唐震. 多端柔性直流输电直流电压控制策略研究[J]. 山西电力, 2019(6): 1-8.
TANG Zhen. Research on DC voltage control strategy of MMC-HVDC transmission[J]. Shanxi Electric Power, 2019(6): 1-8.
- [19] 刘盼盼, 荆龙, 刘京斗, 等. MMC-MTDC 输电系统新型直流电压斜率控制策略[J]. 电测与仪表, 2016, 53(6): 1-7.
LIU Panpan, JING Long, LIU Jingdou, et al. A novel DC voltage strategy for MMC-HVDC transmission system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(6): 1-7.
- [20] 吴蒙, 贺之渊, 阎发友, 等. 下垂控制对直流电网动态电压稳定性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 8-15.
WU Meng, HE Zhiyuan, YAN Fayou, et al. Influence of droop control on the dynamic voltage stability of DC grid analysis[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 8-15.
- [21] 韩民晓, 熊凌飞, 丁辉. 利用电压倾斜控制的 VSC-MTDC 稳定性分析[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1808-1813.
HAN Minxiao, XIONG Lingfei, DING Hui. Stability analysis of VSC-MTDC with voltage droop control[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1808-1813.
- [22] 萧展辉, 蔡微, 黄剑文, 等. MMC 型多端柔性直流配电系统协同控制与故障电流抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 103-110.
XIAO Zhanhui, CAI Wei, HUANG Jianwen, et al. Coordinate control scheme for modular multilevel converter based multi-terminal DC distribution power systems and circuit suppression during faults[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 103-110.
- [23] 付强, 杜文娟, 王海风. 基于虚拟阻尼指标的柔性直流电网小信号稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 111-120.
FU Qiang, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Analysis of small-signal stability for flexible DC grid based on virtual damping index[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 111-120.

收稿日期: 2021-01-24; 修回日期: 2021-03-31

作者简介:

范明烨(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电稳定与控制; E-mail: fmy1997324@163.com

李慧(1976—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为柔性直流输电稳定与控制、新能源发电技术等; E-mail: lhbx@bistu.edu.cn

刘思嘉(1986—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为无轴承电机、非线性控制等。E-mail: 116s38j31@hotmail.com

(编辑 许威)