

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240866

新能源经柔直外送系统的暂态同步稳定性分析

金国彬, 杨阳, 辛业春, 张海洋, 党若峰, 李玲

(现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012)

摘要: 针对变换器并联系统在大扰动下的暂态同步稳定性问题, 当前的研究因缺乏有效的非线性动力学系统分析方法而面临着巨大挑战。为此, 将新能源经柔直外送系统作为研究场景, 建立系统的暂态交互模型, 构造解析的李雅普诺夫函数, 再利用直接法估计系统的稳定域。据此, 进一步给出基于临界能量的系统暂态同步稳定判据。根据理论推导, 揭示了新能源侧并网变换器和柔直送端变换器之间的耦合关系。从能量的角度分析了控制参数对同步稳定性的影响, 以及控制方式对判定结果的影响。最后, 在 Matlab/Simulink 中搭建基于模块化多电平换流器高压直流输电(modular multilevel converter based high voltage direct current transmission, MMC-HVDC)送出的新能源外送系统仿真模型, 验证了所提方法的有效性和分析结果的正确性。

关键词: 新能源; 并网变换器; 锁相环; 李雅普诺夫函数; 暂态同步稳定性

Transient synchronization stability analysis of renewable energy transmission via flexible HVDC system

JIN Guobin, YANG Yang, XIN Yechun, ZHANG Haiyang, DANG Ruofeng, LI Ling

(Laboratory of Modern Power System Simulation Control and Green Energy New Technology, Ministry of Education
(Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China)

Abstract: The transient synchronization stability of converter-interfaced power systems under large disturbances presents significant challenges due to the lack of effective nonlinear dynamic system analysis methods. Therefore, taking the renewable energy transmission system via flexible HVDC system as the research scene, this paper establishes a transient interaction model of the system, constructs an analytical Lyapunov function, and estimates the stability region of the system by direct method. A critical energy-based transient synchronization stability criterion is then derived. Based on the theoretical derivation, the coupling relationship between the converters on renewable energy side and the flexible HVDC system side is revealed. From an energy perspective, the influence of control parameters on synchronization stability and the influence of control mode on stability assessment results are analyzed. Finally, a simulation model of a renewable energy transmission system based on modular multilevel converter based high voltage direct current transmission (MMC-HVDC) is developed in Matlab/Simulink to verify the effectiveness of the proposed method and the accuracy of the analysis results.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2400900).

Key words: renewable energy source; grid-connected converter; phase-locked loop; Lyapunov function; transient synchronization stability

0 引言

新能源在电网中所占比例越来越大, 由常规同步电机为主的电网正逐步向基于电力电子变换器的电网过渡^[1-3]。电压源型变换器被广泛用于新能源并网系统与柔性直流输电系统, 其中变换器采用锁相

环来获取共用节点处的电压, 从而使变换器和交流电网相位保持一致^[4-5]。此类跟网型^[7-8]变换器在电网故障等大扰动下, 由锁相环同步失稳引发的暂态同步稳定问题逐步成为影响新型电力系统稳定的主要问题之一^[9-12]。

文献[13-14]分析了单个变换器并网的小扰动稳定性问题, 并发现变换器的振荡失稳行为与锁相环密切相关。但此类小扰动稳定分析所采用的线性化方法并不适用于大扰动稳定性分析。现有的大扰动

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFB2400900); 国家电网公司总部科技项目资助(5100-202399363A-2-2-ZB)

稳定性分析方法大多基于变换器与同步机在同步机制方面的内在一致性, 由此可以较为清晰地对变换器的暂态同步失稳机理进行分析。如文献[15-17]基于等面积法揭示了电网故障期间网侧变换器的暂态失稳机理, 分析了系统初始状态及故障状态下平衡点位置对暂态同步稳定性的影响。但观察锁相环的数学模型, 发现存在一个非线性阻尼项, 等面积法直接将其忽略, 导致稳定性判定不准确。为解决这一问题, 文献[18-20]采用李雅普诺夫直接法得到更加准确的系统暂态稳定域, 并且将稳定性问题转化为比较函数值与阈值的大小关系, 以此来判断非线性系统的稳定性。

然而, 上述研究均只针对单一变换器并网系统, 其暂态分析过程只考虑变换器自身动态行为, 忽略了变换器间的交互影响。在实际场景中, 变换器之间的相互耦合可能会使系统的暂态同步稳定问题更加突出, 从而造成变换器的连续失稳, 给电网带来更加不利的后果。因此亟需对多变流器系统的暂态同步稳定问题开展研究。

现有的多变换器系统稳定性研究结果以小干扰为主, 暂态稳定分析由于缺少高效的非线性动力学方法而面临着巨大的挑战^[21-22]。在针对多变换器系统暂态同步稳定问题的研究中, 文献[23]讨论了构网型变流器多机之间功率交互导致的功角交互耦合问题, 但随着其同步运动方程模型阶数的增加, 暂态同步稳定性分析的难度加剧。文献[24]仅分析了两变换器并联系统稳态运行条件的变化, 从而得到了并联系统更易失稳的结论, 由于其未计及变换器间的交互影响, 所以这是不准确的。本文通过进一步研究发现, 在计及动态交互影响时, 变流器并联系统的暂态同步稳定性得到增强。

综上所述, 本文为清晰揭示变换器间的暂态交互机理, 将单变换器并网系统暂态同步稳定性的研究方法拓展至两变换器并联系统, 并进行详细分析。通过建立新能源经柔直外送系统数学模型, 在考虑交互作用动态过程的前提下, 基于李雅普诺夫直接法估计了系统的暂态稳定域, 并定量分析了不同控制参数和控制方式对系统暂态同步稳定性的影响。

1 系统建模

1.1 系统描述

本文参考文献[25], 以新能源经柔直外送系统作为研究场景, 其一般拓扑如图 1 所示。该拓扑在传统单变换器并网系统的基础上加入柔直外送部分, 新能源侧变换器与柔直送端变换器均采用跟网型模块化多电平换流器(modular multilevel converter,

MMC), 为方便叙述, 分别称 MMC1 与 MMC2。 Z_c 和 Z_h 为等效线路阻抗, Z_s 为等效电网阻抗。此时系统中含有两个变换器, 当系统发生大扰动时, 与电网弱连接且容量大的变换器更易出现同步失稳问题^[26-27](本文名称延续文献[26], 称为临界变换器)。临界变换器保持稳定是多变换器系统保持稳定的关键。

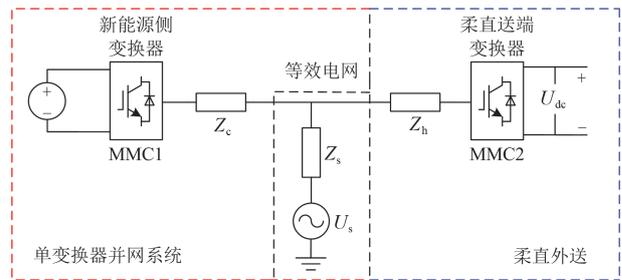


图 1 新能源经柔直外送系统拓扑

Fig. 1 Renewable energy sources transmission system topology through MMC-HVDC

短路比是度量单个电力电子设备并网系统的电网强度和分析系统稳定裕度的重要工具之一^[28-30], 其大小 K_{SCR} 可以通过母线短路容量和设备容量求取, 计算公式为

$$K_{SCR} = \frac{S_{SC}}{S_{DG}} = \frac{U_s^2}{Z_s S_{DG}} \quad (1)$$

式中: S_{SC} 为母线短路容量; S_{DG} 为变换器额定容量; U_s 为电网电压。变换器额定容量越大, 连接阻抗越大, 短路比越小, 稳定性越差。所以在变换器并联系统中, 通过比较变换器的短路比, 便可以确定临界变换器。

1.2 数学建模

图 2(a)和图 2(b)分别为新能源经柔直外送系统等效电路图和 MMC1 锁相环结构框图, 故障情况下跟网型 MMC 外特性体现为受控电流源。

借鉴拓展等面积法的基本思想, 假定系统临界变换器为 MMC1, 其失稳模式已知, 且假设受扰不严重的变换器与交流系统之间无频率偏移, 即 MMC2 在电网故障期间仍能保持同步。在此假定下对全系统做双变换器等值, 最终转化为单变换器并网系统。

基于上述假设, MMC2 输出电流 I_h 在本身锁相坐标系中不发生改变, 即相位固定, 此时 I_h 可在 MMC1 锁相参考下进行坐标变换, 形成等效投影电流 I_{hd} 和 I_{hq} 。

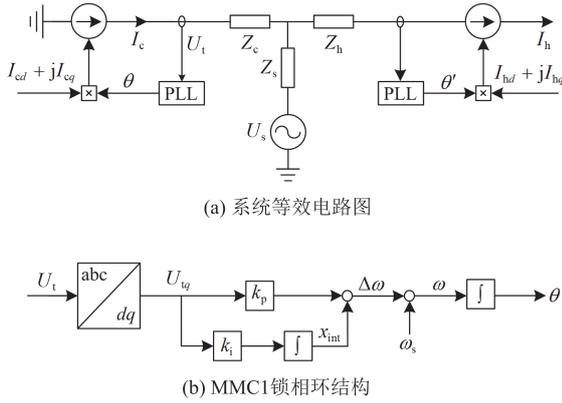


图2 新能源经柔直外送系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of renewable energy sources transmission system through MMC-HVDC

令

$$\begin{cases} Z_s = R_s + j\omega L_s \\ Z_c = R_c + j\omega L_c \end{cases} \quad (2)$$

式中： R_s 和 L_s 分别表示交流电网的等效电阻和电感； R_c 和 L_c 分别表示 MMC1 到交流电网线路的等效电阻和电感； ω 为锁相环的角频率。并网点电压 U_t 满足式(3)。

$$U_t = U_s + Z_s(I_c - I_h) + Z_c I_c \quad (3)$$

式中， I_c 为 MMC1 输出电流， $I_c = I_{cd} + jI_{cq}$ ， I_{cd} 和 I_{cq} 分别表示 I_c 坐标变换后的 d 轴和 q 轴分量。对式(3)进行坐标变换，得到并网点电压 q 轴分量表达式，如式(4)所示。

$$U_{tq} = -U_s \sin \delta + R_s(I_{cq} - I_{hq}) + \omega L_s(I_{cd} - I_{hd}) + R_c I_{cq} + \omega L_c I_{cd} \quad (4)$$

式中， δ 表示锁相环输出角度与电网电压瞬时角度之差。

令 $\delta = \theta - \theta_s$ ， $\omega = \Delta\omega + \omega_s$ ，其中， θ 为锁相环相角； θ_s 为电网电压相角； $\Delta\omega$ 为 PI 控制器的输出； ω_s 为同步角频率。将 MMC1 锁相环与式(4)相结合，得出其等效控制框图，如图 3 所示。

由此可以得到锁相环的二阶动态方程为

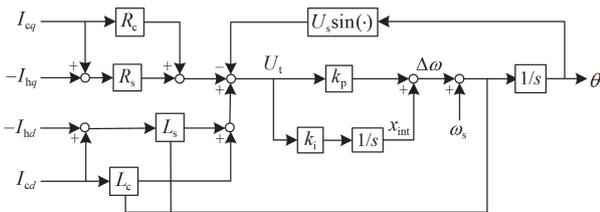


图3 MMC1 锁相环等效框图

Fig. 3 MMC1 PLL equivalent block diagram

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega \\ M\dot{\omega} = C - U_s \sin \delta - D(\delta)\omega \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} M = \frac{1}{k_i} \{1 - k_p [L_s(I_{cd} - I_{hd}) + L_c I_{cd}]\} \\ C = \omega_s [L_s(I_{cd} - I_{hd}) + L_c I_{cd}] + R_s(I_{cq} - I_{hq}) + R_c I_{cq} \\ D(\delta) = C_2 \cos \delta - C_1 \\ C_1 = L_s(I_{cd} - I_{hd}) + L_c I_{cd} \\ C_2 = \frac{k_p U_s}{k_i} \end{cases} \quad (6)$$

式中： M 表示 MMC1 接入交流系统的惯量； C 为替换变量； $D(\delta)$ 表示锁相环的阻尼系数； k_p 和 k_i 为锁相环 PI 控制参数。

2 稳定性分析

2.1 系统的平衡点

首先计算系统的平衡点，平衡点在 $\omega = 0$ 的条件下取得，即在方程(5)中有

$$C - U_s \sin \delta = 0 \quad (7)$$

求解式(7)并得到系统的平衡点集 $\{(\delta_s, 0)\}$ ，其中 δ_s 为式(7)的解。

$$\delta_s = 2k\pi + \arcsin(C/U_s) \quad (8)$$

将方程式(5)在平衡点处线性化，计算得到系统的雅克比矩阵 J ，如式(9)所示。

$$J = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{U_s \cos \delta_s}{M} & -\frac{D(\delta_s)}{M} \end{bmatrix} \quad (9)$$

对应的以 λ 为特征值的特征方程为

$$\lambda^2 + \frac{D(\delta_s)}{M} \lambda + \frac{U_s \cos \delta_s}{M} = 0 \quad (10)$$

由于稳态功角应满足 $\cos \delta_s > 0$ ，由此得到平衡点的存在条件，如式(11)所示。

$$\begin{cases} \frac{D(\delta_s)}{M} > 0 \\ \frac{U_s \cos \delta_s}{M} > 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} M > 0 \\ D(\delta_s) > 0 \end{cases} \quad (11)$$

与平衡点 $(\delta_s, 0)$ 相邻的两个不稳定平衡点分别为 $(\delta_{u1}, 0)$ 和 $(\delta_{u2}, 0)$ ，其关系如式(12)所示。

$$\begin{cases} \delta_s = \arcsin \frac{C}{U_s} \\ \delta_{u1} = \pi - \delta_s \\ \delta_{u2} = -\pi - \delta_s \end{cases} \quad (12)$$

2.2 稳定域估计和暂态同步稳定判定

目前, 暂态同步稳定性的判定方法主要有等面积法和传统能量函数法, 等面积法因其计算过程中忽略阻尼项, 稳定域估计结果往往偏冒进; 传统能量函数法在估计稳定域时, 由于李雅普诺夫函数自身的特性, 结果往往偏保守。

因此, 综合考虑李雅普诺夫直接法在分析非线性稳定问题的优势, 本文通过寻找不同形式的李雅普诺夫函数, 精确系统稳定域。由锁相环等效框图可以得到以锁相环 PI 控制器的积分器的值 x_{int} 和 δ 为变量的锁相环二阶动态方程, 如式(13)所示。

$$\begin{cases} \dot{x}_{\text{int}} = k_i \int_0^t (C - U_s \sin \delta) dt \\ \dot{\delta} = \frac{x_{\text{int}}}{1 - k_p C_1} - \frac{1}{M} \int_{\delta_s}^{\delta} (C_2 \cos x - C_1) dx \end{cases} \quad (13)$$

令 $x_a = \frac{x_{\text{int}}}{1 - k_p C_1}$, 则式(13)可转化为

$$\begin{cases} \dot{x}_a = \frac{1}{M} (C - U_s \sin \delta) \\ \dot{\delta} = x_a - \frac{1}{M} \int_{\delta_s}^{\delta} (C_2 \cos x - C_1) dx \end{cases} \quad (14)$$

由此构造李雅普诺夫函数, 如式(15)所示。

$$V(x_a, \delta) = \frac{x_a^2}{2} + \frac{1}{M} \int_{\delta_s}^{\delta} (U_s \sin x - C) dx \quad (15)$$

式(15)对时间求导可得

$$\dot{V} = \frac{1}{M^2} (C - U_s \sin x) \int_{\delta_s}^{\delta} (C_2 \cos x - C_1) dx \quad (16)$$

根据李雅普诺夫定理, 如果 V 关于时间的导数是负定或半负定的, 则所研究的系统对于所考虑的平衡点是稳定的, 即

$$C_2 \sin \delta - C_2 \sin \delta_s - C_1 (\delta - \delta_s) \leq 0 \quad (17)$$

当 $\delta = \delta_s$ 时, 式(17)成立。李雅普诺夫函数正定应满足式(18)。

$$\begin{cases} C - U_s \sin \delta < 0, \delta > \delta_s \\ C - U_s \sin \delta > 0, \delta < \delta_s \end{cases} \quad (18)$$

从而式(17)的条件转化为

$$\begin{cases} C_2 \sin \delta - C_2 \sin \delta_s - C_1 (\delta - \delta_s) > 0, \delta > \delta_s \\ C_2 \sin \delta - C_2 \sin \delta_s - C_1 (\delta - \delta_s) < 0, \delta < \delta_s \end{cases} \quad (19)$$

求解式(19)得到系统稳定域为

$$\delta_{\text{II}} \leq \delta \leq \delta_{\text{III}} \quad (20)$$

式中, δ_{II} 与 δ_{III} 分别对应式(21)的两个解。

$$C_2 \sin \delta - C_2 \sin \delta_s - C_1 (\delta - \delta_s) = 0 \quad (21)$$

为验证本文所提方法的正确性, 图4展示了仿真算例导出的本文李雅普诺夫函数、传统能量函数

以及等面积法得到的稳定域的范围。其中 δ_{I} 为传统能量函数法估计的稳定域边界; δ_{II} 为等面积法估计的稳定域边界; δ_{cr} 为时域仿真得到的系统极限切除角, 即系统真实稳定域正向边界。

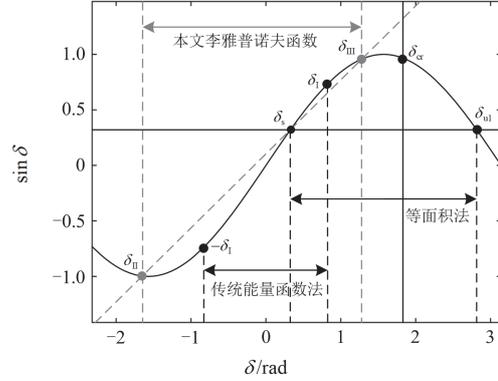


图4 不同方法的稳定域对比

Fig. 4 Comparison of stability regions obtained by different methods

从图4可以看出, 用等面积法估算出的稳定域超出了实际的稳定区域。用传统的能量函数方法得到的稳定域虽然总是处于实际的稳定区域, 但是它所得到的范围却很窄。因此, 本文方法在稳定域估计中, 与现有方法相比具有较高的精度和较大的稳定域, 从而凸显出该方法的优越性。

在本文稳定域内, $V(\omega, \delta)$ 在 $\omega = 0, \delta = \delta_s$ 时取得最小值0, 在 $\omega = 0, \delta = \delta_{\text{III}}$ 时取得最大值。因此取 $\delta = \delta_{\text{III}}$ 时的李雅普诺夫函数值 $V_{\text{III max}}$ 作为临界能量。

$$V_{\text{III max}} = \frac{1}{M} \int_{\delta_s}^{\delta_{\text{III}}} (U_s \sin x - C) dx \quad (22)$$

传统李雅普诺夫函数信号获取方便, 物理意义明确, 所以式(22)采用传统表达形式。

综上所述, 本文提出一种基于临界能量的暂态同步稳定判定方法, 即系统保持稳定须满足式(23)。

$$V(\omega, \delta) \leq V_{\text{III max}} \quad (23)$$

将式(23)作为稳定判据时应注意所提方法具有一定保守性, 这是李雅普诺夫方法难以避免的, 因此不能将其作为严格的暂态同步稳定判据, 但保守性判据在实际操作中可以为故障切除保证一定的时间裕度。

3 参数对同步稳定性的影响分析

3.1 参数对小扰动同步稳定性的影响

根据2.1节的分析, 平衡点小扰动渐进稳定等价于PLL的阻尼系数为正。由式(11)可得

$$\begin{cases} k_p < \frac{1}{C_1} \\ \frac{C_1}{\sqrt{U_s - C^2}} < \frac{k_p}{k_i} \end{cases} \quad (24)$$

由式(24)可以看出, 增大 PLL 比例增益 k_p , 减小积分增益 k_i 有助于增大 PLL 阻尼, 提高系统的同步稳定性, 但在弱电网条件下 k_p 不能过大。进一步分析式(6)中 C 和 C_1 表达式可以看出, 减小 MMC1 的有功电流参考值 I_{cd} 或增大 MMC2 的有功电流参考值 I_{hd} , 有助于增大 PLL 阻尼, 提高系统的同步稳定性。

3.2 参数对稳定域的影响

借鉴直接法的思路, 可以从能量的角度分析系统参数对稳定域的影响。分析式(21), 采用本文李雅普诺夫函数分析系统稳定域时, 减小 C_1 或增大 C_2 可以增大 δ_{III} , 扩大稳定域。

下面用一组算例分析 PLL 参数以及变换器有功参考值变化对本文所提稳定域的影响。相关参数为: $R_c = R_s = R_h = 0 \Omega$ 、 $L_c = 0.018 \text{ H}$ 、 $L_s = 0.001 \text{ H}$ 、 $L_h = 0.001 \text{ H}$ 、 $U_s = 6.6 \text{ kV}$ 。其中 R_h 和 L_h 分别表示 MMC2 到交流电网线路的等效电阻和电感。结果如图 5 所示。从图中可以看出, 增大 PLL 的 k_p 或减小

k_i 有助于增大稳定域; 从图 5(b)中可以看出, 减小 I_{cd} 或增大 I_{hd} , 可以增大稳定域。

3.3 不同控制方式对判定结果的影响

3.2 节分析了变换器有功电流参考值对稳定域的影响, 该分析适用于定电流控制模式下的变换器, 如果考虑变换器外环控制, 则 I_{cd} 与 I_{hd} 将不再作为控制参数。

MMC1 作为新能源侧并网变换器, 通常需要加入功率外环, 以定功率模式输出。电网故障期间, 变换器有功功率参考值固定, 电网电压跌落会引起变换器输出电流增大。此时利用式(22)作为临界能量判稳时会有 I_{cd} 小于实际值, 进而导致计算的李雅普诺夫函数值大于真实临界能量, 可能存在稳定性判定偏冒进的情况。所以该控制下的失稳判据应在式(22)的基础上乘一个小于 1 的系数作为裕度, 以保证判定结果的准确性。

MMC2 作为柔直送端变换器, 通常采用定功率控制或定直流电压控制。在本文中作为非临界变换器, 其短路比远大于 MMC1, 即与电网连接阻抗小, 变换器传输功率小; 电网故障期间锁相环失稳速度慢, 控制参数变化小; 再考虑李雅普诺夫直接法自身的保守性, MMC2 控制参数的改变对式(22)计算结果的影响远不及 MMC1, 故可以在判定时忽略其控制方式的影响。

4 仿真实验

为验证本文结论, 在 Matlab/Simulink 中搭建如图 1 所示的仿真模型, 并在附录 A 表 A1 中给出了相应的系统参数。在仿真中, MMC 采用半桥型子模块, 电平数为 22, 考虑了桥臂环流抑制, 应用最近电平逼近调制策略和基于冒泡排序法的均压控制; 系统阻抗为: $L_c = 18 \text{ mH}$, $L_s = 0.1 \text{ mH}$, $L_h = 1 \text{ mH}$; 新能源侧交流系统短路比为 3.1, 电网强度弱。

4.1 接入对比

在验证本文研究问题之前, 先探究柔直外送环节的接入对单变换器并网系统暂态同步稳定性的影响。令电网电压在 0.4 s 时跌落至 0.5 p.u., 观察接入前后 MMC1 的功角变化情况, 结果如图 6 所示。图中: t_{cr} 为当前系统结构下的极限切除时间; t_{cr} 时刻对应的功角为极限切除角。通过观察可知, 与柔直外送环节接入前相比, 接入后变换器功角的发散速度减慢, 极限切除角增大, 极限切除时间延长。说明柔直外送环节的加入不会恶化原有变换器的暂态同步稳定性, 单变换器并网系统暂态稳定性的研究方法适用于本文系统。

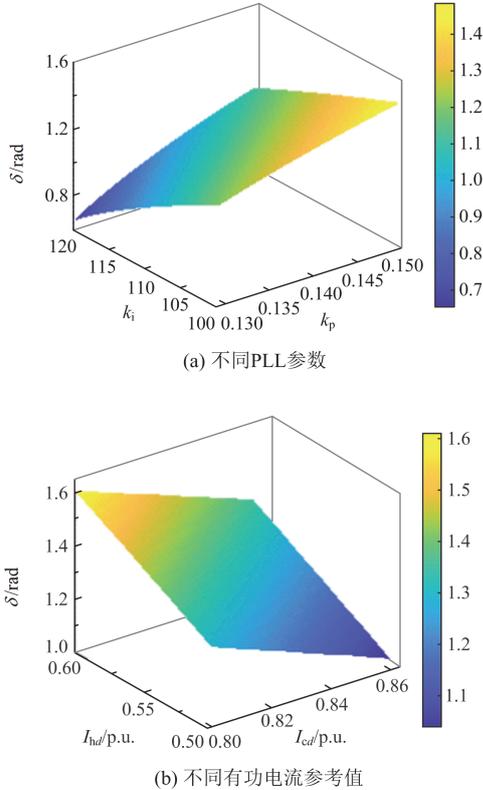


图 5 参数变化对系统稳定域的影响

Fig. 5 Influence of parameter change on system stability region

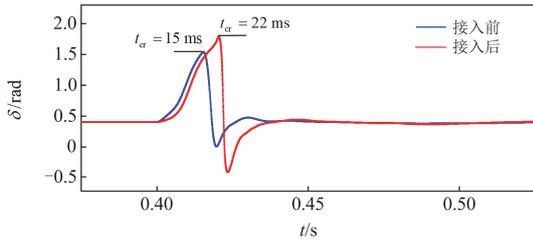


图 6 柔直接入前后 MMC1 稳定性对比

Fig. 6 Comparison of MMC1 stability before and after MMC-HVDC integration

接下来对临界变换器进行验证。图 7 为系统两变换器故障后的稳定情况, MMC1 的角频率在故障后明显增大, 而 MMC2 的角频率在增大到一定值后开始减小, 这就导致了 MMC1 的功角发散速度明显大于 MMC2, 说明 MMC1 是该系统的临界变换器, 故障后会率先失稳。

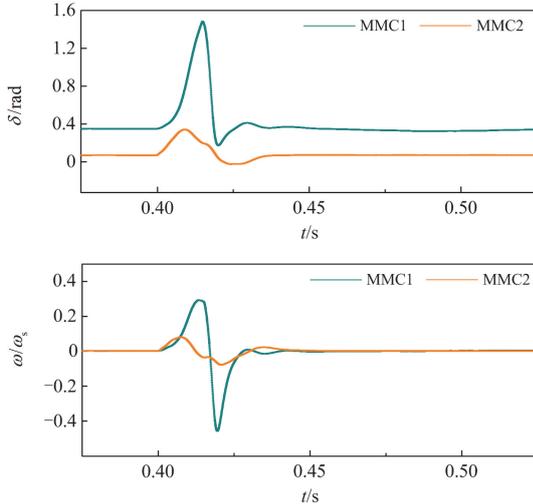


图 7 两变换器稳定性比较

Fig. 7 Stability comparison between two converters

4.2 稳定域与判定方法

首先计算系统的平衡点及系统稳定域边界值:

$\delta_s = 0.33 \text{ rad}$ 、 $\delta_1 = 0.84 \text{ rad}$ 、 $\delta_{III} = 1.28 \text{ rad}$ 、 $\delta_{ul} = 2.81 \text{ rad}$ 。令电网电压在 0.4 s 时跌落至 0.5 p.u., 故障后系统运行点的相轨迹如图 8 所示。

当故障切除时间 $t_c = 14 \text{ ms}$ 时, 切除点 A 超出传统能量函数法得到的稳定域范围, 但在本文推导的稳定域内, 即 $\delta_1 < \delta < \delta_{III}$, 相轨迹如图 8 中黑色实线所示, 最终返回至平衡点, 验证了本文暂态同步稳定判定方法的准确性。

系统的极限切除时间是 20 ms, 此时的运行点 B 超出本文稳定域范围, 即 $\delta > \delta_{III}$, 但仍能沿灰色实线返回平衡点, 说明本文稳定域估计方法存在一定

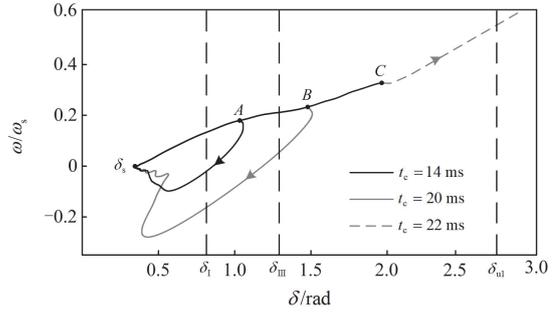


图 8 故障情况下的相轨迹图

Fig. 8 Phase trajectory diagram in fault condition

保守性。

当 $t_c = 22 \text{ ms}$ 时, 运行轨迹由切除点 C 沿灰色虚线开始向外发散, 最终不能返回平衡点, 系统失稳。此时切除点仍未超出等面积法所得的稳定域范围, 即 $\delta < \delta_{ul}$, 说明在利用等面积法估计稳定域时结果偏冒险。

为验证本文所提判定方法的正确性, 首先计算 $\delta = \delta_{III}$ 时的李雅普诺夫函数极限值 $V_{III \max} = 60.48$, 通过与切除时刻的李雅普诺夫函数值比较, 可以判定系统是否保持暂态同步稳定, 结果如表 1 所示。在 $t_c = 14 \text{ ms}$ 时, 系统的李雅普诺夫函数值为 38.88, 小于 $V_{III \max}$, 系统最终恢复稳定, 仿真结果与判定结果一致。

表 1 不同时刻的函数值与判定情况

Table 1 Function value and decision at different time			
故障切除时间 t_c/ms	t_c 时刻的李雅普诺夫 函数值 $V(x_0, \delta)$	稳定性分析	
		判定	结果
14	38.88	$V \leq V_{III \max}$	稳定
20	80.68	$V > V_{III \max}$	稳定
22	111.56	$V > V_{III \max}$	失稳

若切除时刻系统的李雅普诺夫函数值大于 $V_{III \max}$, 则系统可能恢复稳定也可能同步失稳, 具体取决于切除时刻的李雅普诺夫函数值是否小于极限切除时刻的李雅普诺夫函数值。如 22 ms 对应的李雅普诺夫函数值大于极限切除时间 20 ms 的对应值, 系统发生同步失稳。

4.3 参数对稳定域的影响

为验证控制参数对稳定域的影响, 在 4.2 节算例的基础上, 单独改变某个变量的值, 以极限切除角和极限切除时间为稳定性判据, 观察系统稳定情况, 仿真结果如图 9 所示。观察图 9(a)与图 9(b), 随着 k_p 的增加, 系统极限切除角增大, 稳定域增大, 极限切除时间小幅增加; 而 k_i 对系统的稳定性有相反的作用。

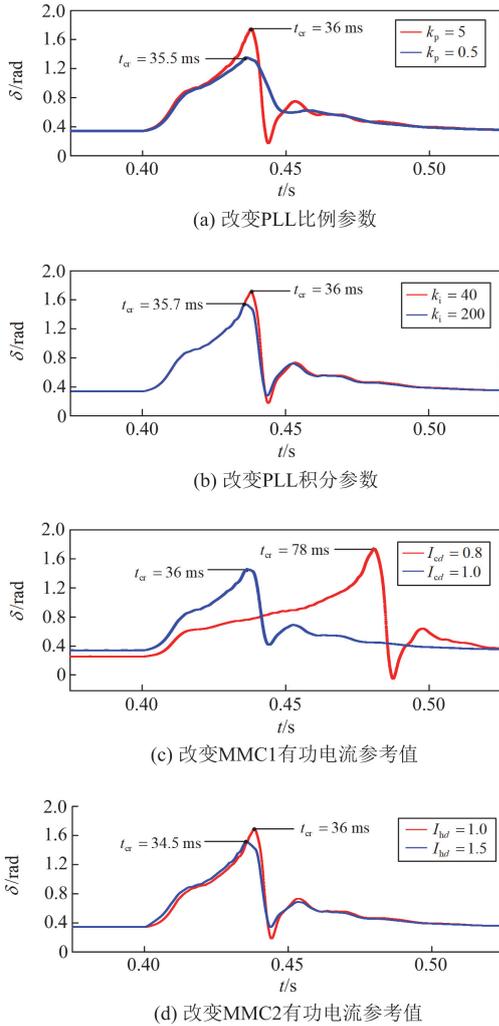


图9 参数对系统稳定域的影响

Fig. 9 Parameter influence on system stability region

有功电流参考值对系统稳定性的影响结果如图9(c)和图9(d)所示。可以看出，减小 I_{cd} 或增大 I_{hd} 都会增大系统稳定域与极限切除时间，其中 I_{cd} 的变化对系统稳定性的影响最为明显。结合式(6)和式(8)可知，系统有功电流参考值将影响平衡点位置，由于该系统 I_{cd} 的值大于 I_{hd} ，所以图9(c)中平衡点位置变化明显。以上仿真结果均与3.2节分析相吻合。

4.4 不同控制方式分析

以上仿真分析时MMC1与MMC2均采用定电流控制模式，做稳定域估计和失稳判定时认为 I_{cd} 与 I_{hd} 故障前后始终保持不变，但定电流控制模式未必可以在故障发生后保持电流值不变。因此本节在4.2节算例基础上，具体研究不同控制方式下有功电流及功角在系统故障时的波动情况。

图10展示了MMC1与MMC2均采用定电流控制模式时，故障后有功电流和功角的波动情况。可

以看出 I_{cd} 在故障后开始增大，随后在原来值的1.25倍左右波动，故障切除后 I_{cd} 在经历一个短暂的电流跌落之后逐渐恢复至稳定值； I_{hd} 在故障后先降低至原来的0.7倍左右，然后持续升高，故障切除后 I_{hd} 逐渐恢复至稳定值。

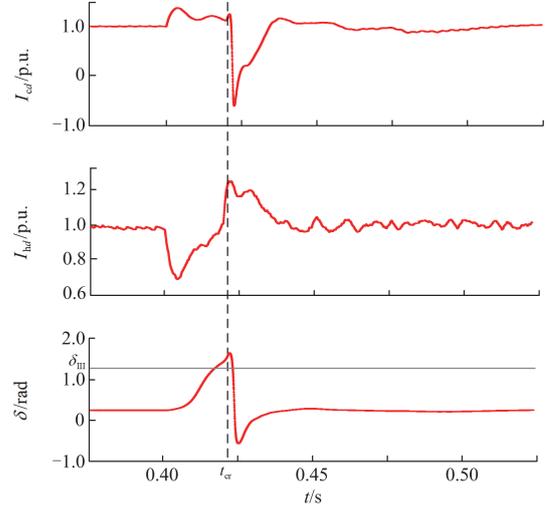


图10 定电流控制模式下参数波动情况

Fig. 10 Parameter fluctuation in constant current control mode

综上所述，稳定域估计所采用的稳态值与故障后相比， I_{cd} 偏小， I_{hd} 偏大，这就可能出现估计结果冒进的情况。但观察功角的极限值可以看出，极限切除角大于 δ_{lim} ，这是由于李雅普诺夫方法自身的保守性和电流变化幅度不大，因此本文方法估计的稳定域仍在真实范围之内。

变换器控制方式的不同可能导致其暂态同步稳定性的不同，因此为了仿真验证的完整性，有必要比较不同控制方式下变换器的暂态稳定情况。

图11(a)对比了MMC1分别采用定电流控制与定功率控制时的稳定情况，可以看出，定功率控制模式下 I_{cd} 在故障时持续增大，并且很快超过定电流控制模式下 I_{cd} 的最大值，直至故障切除时刻电流停止增大并逐步恢复。由于 I_{cd} 的持续增大，定功率控制方式下变换器的功角发散速度变快，极限切除时间明显缩短，极限切除角变小。此时极限切除角接近用定值计算得到的稳定域边界，说明此时如果不考虑故障后 I_{cd} 的动态，就可能引起稳定性估计结果偏冒进的风险。

图11(b)对比了MMC2分别采用定电流控制与定直流电压控制时的稳定情况，可以看出两种控制模式下，故障后 I_{hd} 的变化差别不大，MMC1的功角曲线几乎完全相同。

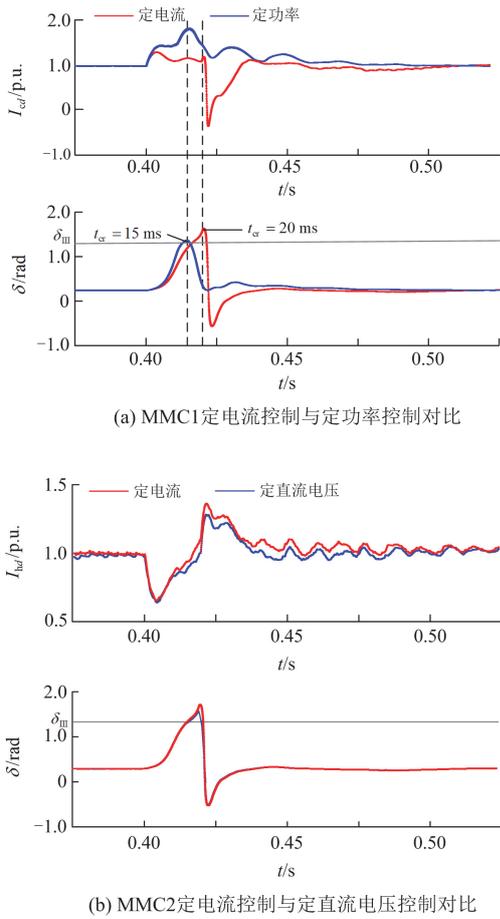


图 11 不同控制方式的稳定性对比

Fig. 11 Stability comparison of different control modes

综上所述, 临界变换器不同的控制方式在故障后表现出明显的稳定性差异, 非临界变换器不同的控制方式对临界变换器的稳定性影响很小。

5 结论

针对新能源经柔直外送系统的暂态同步稳定性问题, 本文利用李雅普诺夫直接法, 得出系统稳定域表达式和暂态同步稳定判据; 并根据理论推导, 分析了控制参数对系统暂态同步稳定性的影响机理; 最后通过时域仿真对稳定域的估计方法和参数分析结果进行了充分验证。得出以下结论:

1) 在李雅普诺夫直接法基础上, 给出了一种判断变换器并联系统暂态同步稳定的新方法。与传统方法相比, 本文提出的方法具有较高的精度和较宽的稳定域。

2) 根据理论推导分析了控制参数对变换器并联系统同步稳定性的影响。研究表明, 临界变换器锁相环的比例增益对系统暂态同步稳定性起到正阻尼作用, 积分增益与其作用相反; 整流器的有功电流

起到正阻尼作用, 逆变器的有功电流与其作用相反。

3) 仿真对比了本文判定方法在不同变换器控制方式下的准确程度, 并且发现临界变换器控制方式不同, 系统的暂态同步稳定性差异明显。

需要强调的是, 本文所提李雅普诺夫函数形式具有一般性, 暂态同步稳定判据适用于两个或两个以上跟网型变换器并联系统。然而本文仅研究了两个变换器间的交互稳定, 后续可基于本文结论在以下两方面继续开展工作: 一是讨论本文研究方法结论在多类型变换器并联系统的适用性; 二是将变换器外环的影响和电流环动态做更加细致化的分析, 研究工程上更为实用的失稳解决方案。

附录 A

表 A1 系统仿真模型参数

Table A1 System simulation model parameters

参数	取值
直流侧额定电压 U_{dcn}/kV	11
交流侧额定电压 U_n/kV	6.6
外送直流电压 U_{dc}/kV	25.2
基频 f_n/Hz	50
输出功率 S_{1n}/MVA	2.5
锁相环比例增益 k_{p1}/s^{-1}	0.14
锁相环积分增益 k_{i1}/s^{-2}	100
d 轴电流参考值 $I_{cd_ref}/p.u.$	1.0
q 轴电流参考值 $I_{cq_ref}/p.u.$	0
电流控制器比例增益 k_{pc1}/s^{-1}	13.86
电流控制器积分增益 k_{ic1}/s^{-2}	158.58
输出功率 S_{2n}/MVA	1
锁相环比例增益 k_{p2}/s^{-1}	2.5
锁相环积分增益 k_{i2}/s^{-2}	200
d 轴电流参考值 $I_{cd_ref}/p.u.$	1.0
q 轴电流参考值 $I_{cq_ref}/p.u.$	0
电流控制器比例增益 k_{pc2}/s^{-1}	11.71
电流控制器积分增益 k_{ic2}/s^{-2}	117.26

参考文献

- [1] 李宇骏, 华凤林, 陆艺源, 等. 基于李雅普诺夫函数的带锁相环的 VSC 大扰动稳定性判据[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 46-54.
LI Yujun, HUA Fenglin, LU Yiyuan, et al. Large disturbance stability criterion for a VSC with phase-locked loop based on a Lyapunov function[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 46-54.
- [2] 杨效, 曾成碧, 赖辉, 等. 弱电网下基于谐波状态空间模型的光储一虚拟同步发电机稳定性分析与优化控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 34-47.

- YANG Xiao, ZENG Chengbi, LAI Hui, et al. A stability analysis method and optimal control of a photovoltaic energy storage-virtual synchronous generator based on a harmonic state space model in a weak grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(16): 34-47.
- [3] 吴应双, 杨子千, 刘明顺, 等. 新能源经柔性直流孤岛送出系统小信号同步稳定机理[J]. *南方电网技术*, 2024, 18(7): 3-10, 26.
- WU Yingshuang, YANG Ziqian, LIU Mingshun, et al. Small signal synchronous stability mechanism of renewable energy transmission system through VSC-HVDC working as island mode[J]. *Southern Power System Technology*, 2024, 18(7): 3-10, 26.
- [4] 陈启超, 李晖, 王智冬, 等. 计及柔性直流的系统短路电流实用计算方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2023, 35(12): 134-141.
- CHEN Qichao, LI Hui, WANG Zhidong, et al. Practical calculation method for short-circuit current of system considering VSC-HVDC[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2023, 35(12): 134-141.
- [5] HU Qi, FU Lijun, MA Fan, et al. Large signal synchronizing instability of PLL-based VSC connected to weak AC grid[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(4): 3220-3229.
- [6] 张鹏程, 张玉江, 王晓辉, 等. VSC 并网逆变器振荡的频率耦合导纳建模及影响因素分析[J]. *智慧电力*, 2024, 52(5): 44-51.
- ZHANG Pengcheng, ZHANG Yujiang, WANG Xiaohui, et al. Frequency-coupled admittance modeling of VSC grid-connected inverter oscillation & influencing factors analysis[J]. *Smart Power*, 2024, 52(5): 44-51.
- [7] HE Xiuqiang, GENG Hua, LI Ruiqi, et al. Transient stability analysis and enhancement of renewable energy conversion system during LVRT[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(3): 1612-1623.
- [8] 李建林, 丁子洋, 游洪灏, 等. 构网型储能支撑新型电力系统稳定运行研究[J]. *高压电器*, 2023, 59(7): 1-11.
- LI Jianlin, DING Ziyang, YOU Honghao, et al. Research on stable operation of new power system supported by grid-forming energy storage system[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(7): 1-11.
- [9] LEI Jintao, XIANG Xin, LI Wuhua, et al. The analysis and calculation of power angle dynamics in grid forming converter under large disturbances based on KBM asymptotic method[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(2): 1494-1508.
- [10] JIANG Shan, ZHU Ye, KONSTANTINOU G. Settling angle-based stability criterion for power-electronics-dominated power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(3): 2972-2984.
- [11] LUO Yi, YAO Jun, CHEN Zhaoyang, et al. Transient synchronous stability analysis and enhancement control strategy of a PLL-based VSC system during asymmetric grid faults[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8(2): 1-16.
- [12] 崔幼石, 严干贵, 刘耀芮, 等. 一种基于双馈风机锁相环动态响应的风-火协同调频策略[J]. *智慧电力*, 2023, 51(1): 38-45, 77.
- CUI Youshi, YAN Gangui, LIU Zhaorui, et al. Wind-thermal power coordinated frequency regulation strategy based on dynamic response of phase-locked loop for double-fed wind turbine[J]. *Smart Power*, 2023, 51(1): 38-45, 77.
- [13] WANG Xiongfei, HARNEFORS L, BLAABJERG F. Unified impedance model of grid-connected voltage-source converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(2): 1775-1787.
- [14] 金国彬, 谢飞, 李国庆, 等. 弱电网且谐波畸变背景下分布式电源并网系统谐振抑制[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(5): 1-10.
- JIN Guobin, XIE Fei, LI Guoqing, et al. Resonance suppression of a distributed power grid-connected system in a weak grid and with harmonic distortion background[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(5): 1-10.
- [15] 曾平, 张琛, 李征. 电网故障期间全功率风电机组的暂态同步稳定控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(16): 5935-5947.
- ZENG Ping, ZHANG Chen, LI Zheng. Control strategy of transient synchronization stability of full-scale wind turbines during grid faults[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(16): 5935-5947.
- [16] HE Xiuqiang, GENG Hua, XI Jiangbei, et al. Resynchronization analysis and improvement of grid-connected VSCs during grid faults[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(1): 438-450.
- [17] 刘俊良, 杜雄, 管勃, 等. 变工作点下的逆变器并网系统建模与稳定性分析[J]. *电网技术*, 2022, 46(9): 3642-3650.
- LIU Junliang, DU Xiong, GUAN Bo, et al. Impedance modeling and stability analysis for grid-connected inverter containing operating point variables[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(9): 3642-3650.
- [18] 张宇, 张琛, 蔡旭, 等. 并网变换器的暂态同步稳定性分析: 稳定域估计与镇定控制[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(21): 7871-7883.
- ZHANG Yu, ZHANG Chen, CAI Xu, et al. Transient

- grid-synchronization stability analysis of grid-tied voltage source converters: stability region estimation and stabilization control[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7871-7883.
- [19] ZHANG Yu, ZHANG Chen, CAI Xu. Large-signal grid-synchronization stability analysis of PLL-based VSCs using Lyapunov's direct method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(1): 788-791.
- [20] ZHANG Chen, MOLINAS M, LI Zheng, et al. Synchronizing stability analysis and region of attraction estimation of grid-feeding VSCs using sum-of-squares programming[J]. Frontiers in Energy Research, 2020, 56(8): 3389-3401.
- [21] 闫培雷, 葛兴来, 王惠民, 等. 弱电网下新能源并网逆变器锁相环参数优化设计方法[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2210-2221.
- YAN Peilei, GE Xinglai, WANG Huimin, et al. PLL parameter optimization design for renewable energy grid-connected inverters in weak grid[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2210-2221.
- [22] 熊佳旺, 孔力, 叶华, 等. 弱电网中锁相环型并网变换器非线性暂态稳定解析分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(24): 76-84.
- XIONG Jiawang, KONG Li, YE Hua, et al. Analytical analysis on nonlinear transient stability of phase-locked loop type grid-connected converter in weak power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 76-84.
- [23] 黄萌, 凌扬坚, 耿华, 等. 功率同步控制的构网型变流器多机交互分析与稳定控制研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(11): 4571-4583.
- HUANG Meng, LING Yangjian, GENG Hua, et al. An overview on multi-VSCs interaction analysis and stability controls of grid-forming converters with power synchronization control[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4571-4583.
- [24] HE Xiuqiang, GENG Hua. Synchronization stability analysis and enhancement of grid-tied multi-converter systems[C]// Industry Applications Society Annual Meeting, October 10-16, 2020, Detroit, MI, USA: 1-8.
- [25] MENG Peiyu, XIANG Wang, HE Yongjie, et al. Coordination control of wind farm integrated cascaded hybrid HVDC system in weak grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(3): 1837-1847.
- [26] 易相彤, 黄文, 沈超, 等. 锁相环同步型变流器并联系统暂态同步稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(17): 6338-6347.
- YI Xiangtong, HUANG Wen, SHEN Chao, et al. Transient synchronization stability analysis of paralleled converter systems with phase-locked loop[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(17): 6338-6347.
- [27] 杜步阳, 邵德军, 朱建行, 等. 电压源型变流器并网系统多时间尺度间相互作用[J]. 电工技术学报, 2023, 38(20): 5547-5559.
- DU Buyang, SHAO Dejun, ZHU Jianhang, et al. The interaction between multiple timescales of the grid-tied voltage source converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(20): 5547-5559.
- [28] 辛焕海, 甘德强, 鞠平. 多馈入电力系统广义短路比: 多样化新能源场景[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5516-5527.
- XIN Huanhai, GAN Deqiang, JU Ping. Generalized short circuit ratio of power systems with multiple power electronic devices: analysis for various renewable power generations[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5516-5527.
- [29] CHENG Huijie, SHUAI Zhikang, SHEN Chao, et al. Transient angle stability of paralleled synchronous and virtual synchronous generators in islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 8751-8765.
- [30] 李胜男, 高源, 何廷一, 等. 新能源临界短路比对电网运行参数灵敏度分析方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(5): 96-102.
- LI Shengnan, GAO Yuan, HE Tingyi, et al. Sensitivity analysis method for critical short circuit ratio of new energy to power grid operating parameters[J]. Smart Power, 2023, 51(5): 96-102.

收稿日期: 2024-07-06; 修回日期: 2024-10-21

作者简介:

金国彬(1977—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新能源发电及其并网、电力电子化电力系统稳定运行与控制; E-mail: jgbjgb2005@126.com

杨阳(1999—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为并网变换器暂态同步稳定性分析与控制方法。E-mail: 1242835349@qq.com

(编辑 周金梅)