

多控制模式变流器异构系统的暂态同步稳定分析

王顺亮¹, 蒋奥博¹, 马俊鹏¹, 刘天琪¹, 郑俊²

(1. 四川大学电气工程学院, 成都 610065; 2. 中国建筑西南设计研究院有限公司, 成都 610042)

摘要: 电压源型变流器的暂态同步稳定问题是一种典型的非线性问题, 在多机系统中更是表现出复杂的高阶特性与交互耦合特性。为明确多控制模式变流器异构系统的交互耦合特性与暂态失稳机理, 以跟网型变流器(grid-following voltage source converter, GFL-VSC)、构网型变流器(grid-forming voltage source converter, GFM-VSC)双机混合并网系统为研究对象, 首先采用相量分析法建立了适用于暂态稳定分析的混合并联系统的数学模型, 揭示了变流器之间交互耦合作用的产生机理。然后, 通过引入三维曲面和等高线提出了一种可视化的稳定性分析方法, 直观描绘了系统的平衡关系, 并揭示了GFM-VSC有功功率参考值、无功功率控制回路以及GFL-VSC电流参考值对系统暂态同步稳定性的影响。结果表明, GFM-VSC无功功率控制的引入会恶化系统的平衡关系。在电网故障时, 可以通过减小GFL-VSC有功电流注入并适当增大其无功电流注入, 或减小GFM-VSC有功功率参考值来改善系统的稳定性。最后, 利用硬件在环测试验证了理论分析的正确性。

关键词: 跟网型控制; 构网型控制; 异构系统; 暂态同步稳定

Transient Synchronous Stability Analysis of Heterogeneous Systems with Multiple Control Mode Converters

WANG Shunliang¹, JIANG Aobo¹, MA Junpeng¹, LIU Tianqi¹, ZHENG Jun²

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. China Southwest Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610042, China)

Abstract: The transient synchronous stability issue of voltage source converters is a typical nonlinear problem, which especially exhibits complex higher-order and interacting coupling characteristics in multi-converter systems. To clarify the interactive coupling characteristics and transient instability mechanism of the heterogeneous system with multiple control mode converters, a dual-converter hybrid grid-connected system consisting of grid-following voltage source converter (GFL-VSC) and grid-forming voltage source converter (GFM-VSC) is studied. Firstly, the mathematical modeling of the hybrid parallel system for transient stability analysis is developed using phasor analysis, and the mechanism of interactive coupling between two inverters is revealed. Then, by introducing three-dimensional surfaces and contour lines, a visual stability analysis method is proposed, which can intuitively describe the system balance relationship. Furthermore, the effects of the active power reference and reactive power control circuit of GFM-VSC and the current reference of GFL-VSC on transient stability are revealed in detail. The results show that the reactive power control introduction of GFM-VSC deteriorates the system balance relationship. The stability of the system can be improved by decreasing the active current injection of GFL-VSC and increasing its reactive current injection, or by decreasing the active power reference of GFM-VSC during grid faults. Finally, the hardware-in-the-loop experiments verify the correctness of the theoretical analysis.

Key words: grid-following control; grid-forming control; heterogeneous system; transient synchronous stability

0 引言

随着新型电力系统的快速发展,风电、光伏等新能源通过电压源型变流器(voltage source converter, VSC)大规模接入电网^[1-4]。与同步发电机不同,变流器的动态特性完全由其控制算法所决定^[5-6],这为电力系统稳定性相关问题的分析带来了新的挑战^[7-9]。目前变流器的控制方式主要包括跟网型控制和构网型控制,跟网型变流器(grid-following voltage source converter, GFL-VSC)利用锁相环采集公共耦合点(point of common coupling, PCC)处的相位,并以此相位为基准输出指定的有功和无功电流,该控制方式功率解耦、控制简单。但是,由于其锁相同步策略与受控电流源特性^[10-12],GFL-VSC的电网支撑能力很弱。为了解决这一问题,构网型控制被提出,构网型变流器(grid-forming voltage source converter, GFM-VSC)采集PCC处的输出功率并利用功率差与电网实现同步。其可在PCC处输出指定幅值和相位的电压,可以为电网提供可靠的电压和频率的支撑^[13-16]。在可预见的未来,这两类变流器将长期共存于电力系统中。

变流器并网系统的暂态同步稳定问题是典型的非线性问题^[17-18],因此在小信号稳定性分析中常用的局部线性化思想^[19-21]将不再适用于暂态稳定分析。针对变流器相关的暂态稳定问题,目前相关的研究多集中于单变流器系统,文献[22]建立了GFL-VSC暂态数学模型,指出GFL-VSC并网系统的暂态特性是由锁相环(phase lock loop, PLL)的动态特性所决定。文献[23]应用线性矩阵不等式优化法构建了变流器并网系统的最大估计吸引域,并基于此吸引域提出了电流参数可行域的求解算法。文献[24]研究了功率同步控制(power synchronization control, PSC)变流器的暂态失稳现象,并提出一种正交功率同步控制策略,从而改善了GFM-VSC在不同电网电压跌落深度下的平衡关系。文献[25]揭示了基于PSC控制的GFM-VSC在暂态稳定问题中呈现的过阻尼特性,但是研究并未涉及无功功率控制对暂态稳定性的影响。文献[26]提出了各类常用构网控制策略下变流器的统一暂态数学模型,并利用相图分析法分析了各种控制策略的GFM-VSC的暂态稳定性。

然而,多变流器系统暂态稳定问题相关的研究目前还处于起步阶段,特别是针对多控制模式变流器混合并联系统的研究还非常有限。由于多机系统复杂的高阶特性与交互耦合特性,单机系统中常用的暂稳分析方法在多机系统的稳定性分析时将面临挑战,如Lyapunov直接法在构造能量函数时将异常复杂,传统相图分析法也将因高阶耦合特性而失去其直观性^[27-29]。为解决上述问题,本文提出了一种具有高度可视化特征的暂态稳定分析方法。通过引入三维曲面和等高线实现了系统功率平衡关系与电压平衡关系的可视化,并揭示了GFM-VSC和GFL-VSC的运行方式对系统暂态稳定性的影响。本文的组织结构如下:第1节构建了适用于暂态稳定分析的混合并联系统的数学模型,并揭示了变流器之间交互耦合作用的产生机理;第2节利用三维曲面和等高线详细分析了系统的平衡关系;第3节分析了GFM-VSC的有功功率参考值、无功功率控制以及GFL-VSC的电流参考值对暂态同步稳定性的影响;第4节进行了实验验证;第5节对全文进行了总结。

1 混合并联异构系统的数学模型

图1为变流器混合并联系统的主电路拓扑,GFL-VSC、GFM-VSC分别通过等效复导纳为 $Y_1(Y_1 \angle \theta_1)$ 、 $Y_2(Y_2 \angle \theta_2)$ 的集电线路连接至汇流母线Bus-C,而后通过等效复导纳为 $Y_3(Y_3 \angle \theta_3)$ 的输电线路与主网相连。

控制方面,GFL-VSC采用锁相环与电网实现

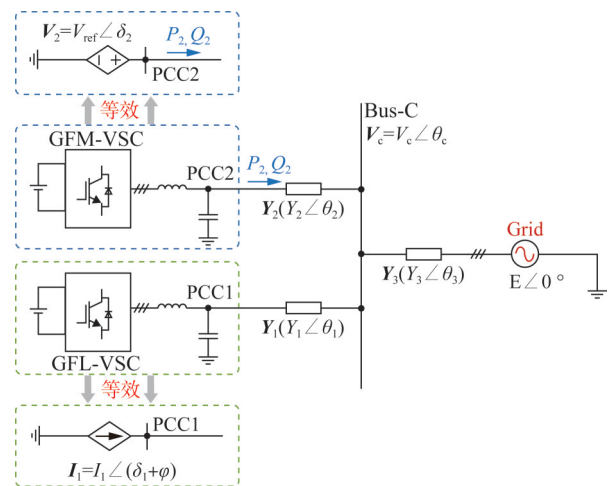


图1 变流器混合并联系统的主电路拓扑

Fig. 1 Circuit topology of converter hybrid parallel system

同步, 并利用基于定电流控制的电流内环输出指定幅值和相位的电流。GFM-VSC 采用基本下垂控制, 并利用内部电压电流双闭环输出指定幅值和相位的电压。图 2 为锁相环和下垂控制环的控制框图。其中 ω_{gn} 为系统的额定角频率即电网的角频率; P_2 、 Q_2 分别为 GFM-VSC 注入系统的有功功率和无功功率; P_{ref} 为 GFM-VSC 有功功率参考值; K_p 为有功功率下垂系数; K_Q 为无功功率下垂系数。定义锁相环输出相位 θ_{PLL} 与电网电压相位 $\omega_{gn}t$ 的差值 δ_1 为 GFL-VSC 的功角, 有功功率下垂控制环输出相位 θ_D 与电网电压相位 $\omega_{gn}t$ 的差值 δ_2 为 GFM-VSC 的功角。

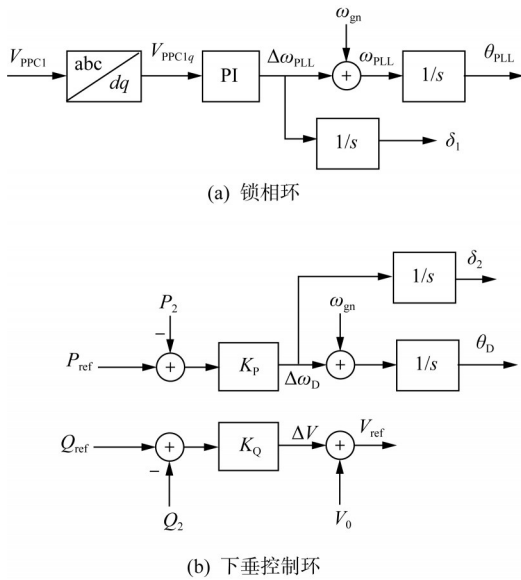


图 2 变流器的同步控制框图

Fig. 2 Block diagram of synchronization control of converters

VSC 内部电压、电流控制环比 PLL 和下垂控制环快得多, 因此在进行暂态稳定分析时内环控制可被视为单位增益^[22, 26-27]。将 GFL-VSC 等效为受控电流源, GFM-VSC 等效为受控电压源。可得到图 1 所示的简化电路拓扑, 其中 V_{ref} 为 GFM-VSC 构建的电压幅值; I_1 为 GFL-VSC 注入系统的电流幅值, φ 为 GFL-VSC 的期望功率因数角; V_c 为汇流母线的电压幅值; θ_c 为电压相角; E 为电网电压的幅值。

根据图 2, 描绘系统功角动态的微分方程为:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_1 = K_{p-PLL} V_{PCC1q} + K_{i-PLL} \int V_{PCC1q} dt \\ \dot{\delta}_2 = K_p (P_{ref} - P_2) \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_{p-PLL} 和 K_{i-PLL} 分别为锁相环 PI 环节的比例和积分增益系数; V_{PCC1q} 为 PCC1 处的电压矢量在 PLL

同步参考坐标系中的 q 轴分量。

基于图 1 所示主电路拓扑, 可列写基尔霍夫电路方程为:

$$I_1 + Y_2 \cdot (V_2 - V_c) + Y_3 \cdot (E - V_c) = 0 \quad (2)$$

式中: I_1 为 GFL-VSC 注入 Bus-C 的电流矢量; V_2 为 PCC2 处的电压矢量; V_c 为 Bus-C 处的电压矢量; E 为电网电压矢量。

进而可得母线电压为:

$$V_c = \frac{I_1 + Y_2 \cdot V_2 + Y_3 \cdot E}{Y_2 + Y_3} \quad (3)$$

PCC1 处的电压 V_{PCC1} 为:

$$V_{PCC1} = \frac{I_1 + Y_2 \cdot V_2 + Y_3 \cdot E}{Y_2 + Y_3} + \frac{I_1}{Y_1} \quad (4)$$

联立式 (1) — (4) 可得 PCC1 处的电压矢量在锁相环同步参考坐标系下的 q 轴电压分量为:

$$V_{PCC1q} = Y_{10} I_1 \sin(\varphi + \theta_{10}) + Y_{11} E \sin(\theta_{11} - \delta_1) + Y_{12} V_{ref} \sin(\theta_{12} + \delta_2 - \delta_1) + \frac{I_1}{Y_1} \sin(\varphi - \theta_1) \quad (5)$$

GFM-VSC 注入系统的有功和无功功率为:

$$P_2 = \frac{3}{2} [V_{ref}^2 \cdot Y_{23} \cos \theta_{23} - V_{ref} E Y_{23} \cos(\delta_2 - \theta_{23}) - V_{ref} I_1 Y_{12} \cos(\delta_2 - \delta_1 - \varphi - \theta_{12})] \quad (6)$$

$$Q_2 = \frac{3}{2} [V_{ref}^2 Y_{23} \sin \theta_{23} - V_{ref} E Y_{23} \sin(\delta_2 - \theta_{23}) - V_{ref} I_1 Y_{12} \sin(\delta_2 - \delta_1 - \varphi - \theta_{12})] \quad (7)$$

式中: Y_{10} 、 Y_{12} 、 Y_{11} 、 Y_{23} 分别为上述等效复导纳的模值; θ_{10} 、 θ_{12} 、 θ_{11} 、 θ_{23} 分别为上述等效复导纳的相角。

根据图 2(b) 中无功功率下垂控制框图, GFM-VSC 在 PCC2 处构建的电压幅值可由式 (10) 来表示。

联立上述方程 (1) — (7) 可得, 适用于混合并联系统暂态同步稳定分析的数学模型可表示为:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_1 = K_{p-PLL} V_{PCC1q} + K_{i-PLL} \int V_{PCC1q} dt \\ V_{PCC1q} = Y_{10} I_1 \sin(\varphi + \theta_{10}) + Y_{11} E \sin(\theta_{11} - \delta_1) + Y_{12} V_{ref} \sin(\theta_{12} + \delta_2 - \delta_1) + \frac{I_1}{Y_1} \sin(\varphi - \theta_1) \\ \dot{\delta}_2 = K_p (P_{ref} - P_2) \\ P_2 = \frac{3}{2} [V_{ref}^2 \cdot Y_{23} \cos \theta_{23} - V_{ref} E Y_{23} \cos(\delta_2 - \theta_{23}) - V_{ref} I_1 Y_{12} \cos(\delta_2 - \delta_1 - \varphi - \theta_{12})] \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$\begin{cases} Y_{10} = Y_{10} \angle \theta_{10} = \frac{1}{Y_2 + Y_3}, Y_{11} = Y_{11} \angle \theta_{11} = \frac{Y_3}{Y_2 + Y_3} \\ Y_{12} = Y_{12} \angle \theta_{12} = \frac{Y_2}{Y_2 + Y_3}, Y_{23} = Y_{23} \angle \theta_{23} = \frac{Y_2 \cdot Y_3}{Y_2 + Y_3} \end{cases} \quad (9)$$

$$V_{\text{ref}} = \frac{\begin{bmatrix} 1.5K_Q E Y_{23} \sin(\delta_2 - \theta_{23}) + \\ 1.5K_Q I_1 Y_{12} \sin(\delta_2 - \delta_1 - \varphi - \theta_{12}) - 1 \end{bmatrix}}{3K_Q Y_{23} \sin \theta_{23}} -$$

$$\sqrt{\frac{\begin{bmatrix} 1.5K_Q E Y_{23} \sin(\delta_2 - \theta_{23}) + 1.5K_Q I_1 Y_{12} \sin(\delta_2 - \delta_1 - \varphi - \theta_{12}) - 1 \end{bmatrix}^2 -}{6K_Q Y_{23} \sin \theta_{23} (K_Q Q_{\text{ref}} + V_0)}} \quad (10)$$

上述混合并联系统的数学模型是一个以 δ_1 、 δ_2 为状态变量的微分代数方程组。根据该数学模型可得, 两变流器通过等效复导纳 Y_{12} 产生耦合效应。图 3 为混合并联系统的大信号模型, 直观呈现了交互耦合作用的产生机理: GFL-VSC 的功角特征由 V_{PCC1q} 所决定, GFM-VSC 的功角特征由 P_2 所决定, 这两个关键量都是以两类功角 δ_1 、 δ_2 为自变量的二元函数, 这就导致 GFL-VSC 会通过影响 P_2 对 GFM-VSC 的功角 δ_2 产生影响, GFM-VSC 会通过影响 V_{PCC1q} 对 GFL-VSC 的功角 δ_1 产生影响, 两变流器的交互耦合效应由此产生。

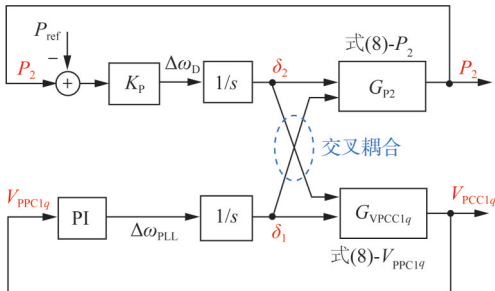


图 3 混合并联系统的大信号模型

Fig. 3 Large-signal model of the hybrid parallel system

2 混合并联系统的平衡关系

根据式(8), 决定变流器功角动态的两关键量 V_{PCC1q} 和 P_2 都是以 δ_1 、 δ_2 为自变量的二元函数。在任意给定的运行工况下, 式(8)中各正/余弦项的系数都是确定的, 因此, V_{PCC1q} 和 P_2 都可表示为三维空间中的曲面, 如图 4 所示。图 4 为三维空间中的平衡关系。

根据式(8)可得两变流器达到稳态时的约束条

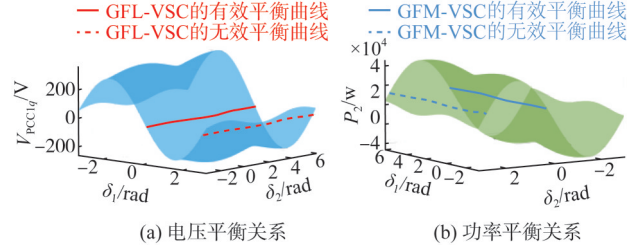


图 4 三维空间中的平衡关系

Fig. 4 Equilibrium relationships in three-dimensional space

件为:

$$V_{\text{PCC1q}} = Y_{10} I_1 \sin(\varphi + \theta_{10}) + Y_{11} E \sin(\theta_{11} - \delta_1) +$$

$$Y_{12} V_{\text{ref}} \sin(\theta_{12} + \delta_2 - \delta_1) + \frac{I_1}{Y_1} \sin(\varphi - \theta_1) = 0 \quad (11)$$

$$P_2 = \frac{3}{2} [V_{\text{ref}}^2 \cdot Y_{23} \cos \theta_{23} - V_{\text{ref}} E Y_{23} \cos(\delta_2 - \theta_{23}) -$$

$$V_{\text{ref}} I_1 Y_{12} \cos(\delta_2 - \delta_1 - \varphi - \theta_{12})] = P_{\text{ref}} \quad (12)$$

GFL-VSC 的电压平衡关系可表示为图 4(a) 曲面上高度为 0 的一簇等高线。将其投影至相平面 δ_1 - δ_2 内, 可以表示为 δ_1 - δ_2 平面内的若干曲线, 该曲线上所有的点都满足 GFL-VSC 的平衡关系, 该曲线为 GFL-VSC 的平衡曲线。描述 GFM-VSC 的功率平衡关系, 可表示为图 4(b) 曲面上高度为 P_{ref} 的一簇等高线。将其投影至相平面 δ_1 - δ_2 内, 也可以表示为 δ_1 - δ_2 平面内的若干曲线, 该曲线上所有的点都满足 GFM-VSC 的平衡关系, 该曲线为 GFM-VSC 的平衡曲线。

$$\begin{cases} \frac{\partial V_{\text{PCC1q}}}{\partial \delta_1} < 0 & (a) \\ \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} > 0 & (b) \end{cases} \quad (13)$$

根据式(8)可得, 图 4 中红色实线和蓝色实线可以对其邻域内的点产生有效吸引, 而红色虚线和蓝色虚线无法吸引其邻域内的点, 因此将满足式(13)(a)项的红色实线定义为 GFL-VSC 的有效平衡曲线, 将满足式(13)(b)项的蓝色实线定义为 GFM-VSC 的有效平衡曲线。站在整个系统的角度, 若要保证混合并联系统的暂态稳定性, 则需同时保证 GFL-VSC 和 GFM-VSC 的稳定性。因此, 混合并联系统的有效平衡点必然由两类 VSCs 的有效平衡曲线相交产生。平衡点的有效性判据如式(13)所示。

当变流器的数量超过两台时, 利用与第 1 节中

相同的建模思路, 可以得到与式(8)具有类似结构的多机并网系统的数学模型。在 n 机系统中, 描绘系统暂态特性的微分代数方程组中将包含 n 个状态变量($\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n$)。由于系统中存在 n 个变流器, 因此系统将存在 n 类平衡关系, 包括各 GFL-VSC 的电压平衡关系 $V_{PCCQ}=0$ 以及各 GFM-VSC 的功率平衡关系 $P=P_{\text{ref}}$ 。这 n 类平衡关系可以被描绘为 n 维欧几里得空间中的 n 个高维图形, 这 n 类高维图形的位置相交关系便可以反映整个系统的平衡关系。图 5 为多机系统扩展流程。

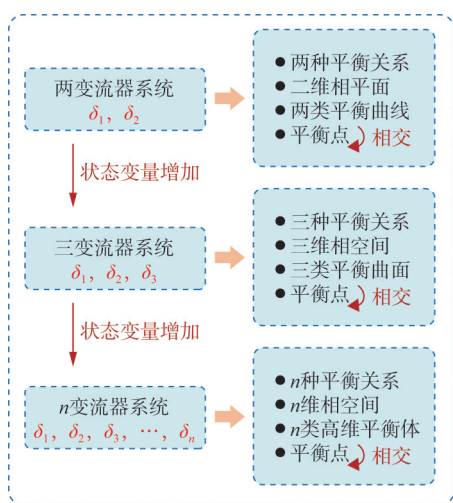


图 5 多机系统扩展流程

Fig. 5 Extended procedure of multi-converter system

3 混合并联系统的稳定性分析

表 1 列出了混合并联系统额定运行工况下的主电路参数和控制参数, 后续所有的算例分析均采用表 1 所列参数。

3.1 GFM-VSC 的 P_{ref} 对暂态稳定性的影响

在不同的电网电压跌落深度下, GFM-VSC 的平衡曲线均可表示为正弦功率曲面 P_2 上以 P_{ref} 为高度的一簇等高线。

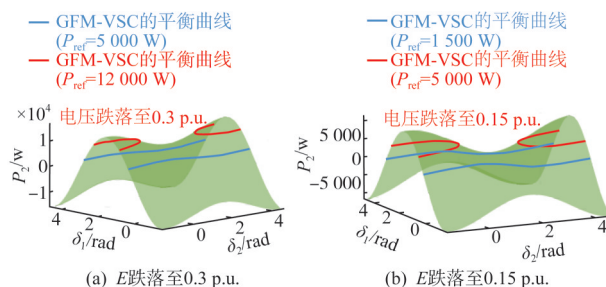
图 6 描述了 P_{ref} 对 GFM-VSC 功率平衡关系的影响, 正弦曲面 P_2 的整体高度会随着电压跌落程度的加深而降低, 即呈现纵向压缩的趋势。这将导致同一 P_{ref} 对应的等高线随着电压跌落程度的加深收缩。此外, 在任意确定的电压跌落深度下, GFM-VSC 的平衡曲线的位置和形状会随有功功率参考值的变化而发生改变, 正弦曲面的形状特征决定了等高线将随着高度的增加而呈现收缩趋势。这意味着, 有

表 1 混合并联系统的额定运行参数

Tab. 1 Rated operating parameters for the hybrid parallel systems

变量	变量含义	数值
$L_1/\text{mH}, R_1/\Omega$	GFL-VSC 的线路电感/电阻	1、0.1
$L_2/\text{mH}, R_2/\Omega$	GFM-VSC 的线路电感/电阻	10、0
$L_3/\text{mH}, R_3/\Omega$	电网的线路电感/电阻	1、0
E/V	电网电压的幅值	311
P_{ref}/W	GFM-VSC 的有功功率参考值	12 000
$Q_{\text{ref}}/\text{var}$	GFM-VSC 的无功功率参考值	0
K_Q	无功功率下垂系数	0.002
K_P	有功功率下垂系数	0.000 8
$I_{\text{dref}}/\text{A}, I_{\text{qref}}/\text{A}$	GFL-VSC 的电流参考值	80、0
$K_{\text{p-PLL}}$	PLL 的比例增益系数	1
$K_{\text{i-PLL}}$	PLL 的积分增益系数	110

功率参考值越大, GFM-VSC 平衡曲线收缩的程度越严重。

图 6 P_{ref} 对 GFM-VSC 功率平衡关系的影响Fig. 6 Effect of P_{ref} on the power equilibrium relationship of GFM-VSC

在本节中, 不考虑 GFM-VSC 无功功率控制回路的影响, 变流器采用定交流电压控制模式, 即 GFM-VSC 在 PCC2 处构建的电压幅值 V_{ref} 始终为一个定值, 其值为电网电压额定值 311 V。无功功率控制回路的影响将在下一节中详细阐述。

图 7 为电网故障工况下, 即电网电压幅值跌落至 0.3 p. u. 时, GFM-VSC 采用不同的有功功率参考值时, 混合并联系统的平衡关系。利用平衡点有效性判据式(13)可以得到图 7 中只有红色实线为 GFL-VSC 的有效平衡曲线, 蓝色实线为 GFM-VSC 的有效平衡曲线。如图 7(a)所示, 当 $P_{\text{ref}}=12 000 \text{ W}$ 时, 两类有效平衡曲线不存在交点, 系统因缺失有效平衡点而将无法保持稳定。如图 7(b)所示, 若将 P_{ref} 减小至 5 000 W, GFM-VSC 的平衡曲线将沿 δ_2

方向显著扩张, 并呈现连续状态, 这将促使两类有效平衡曲线相交产生有效平衡点 a , 系统稳定性得到了显著改善。

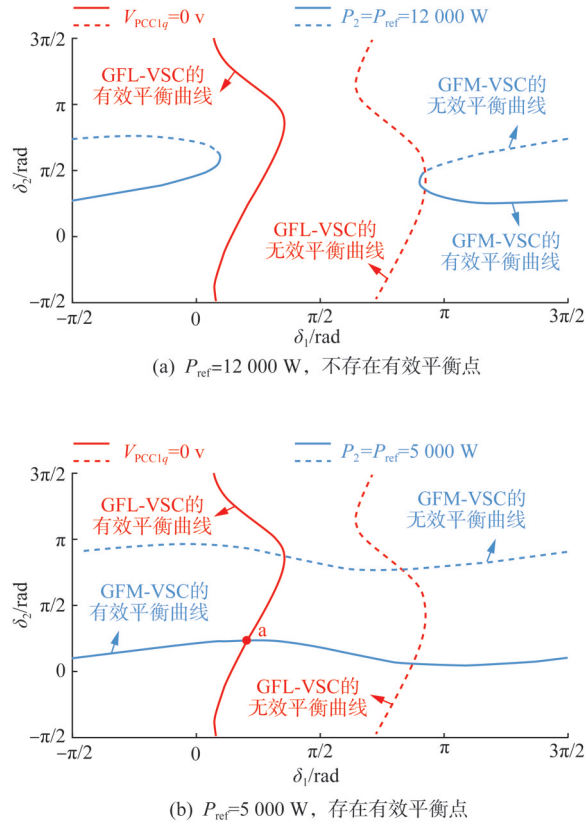


图7 电网电压跌落至0.3 p.u. 时混合并联系统的平衡关系

Fig. 7 Equilibrium relationship of the hybrid parallel system when the grid voltage drops to 0.3 p.u.

图8为电网电压跌落至0.15 p.u. 时混合并联系统的平衡关系, 当电网电压跌落深度加深时, 由于平衡曲线随着电压跌落程度的加深而显著收缩, 图8(a)表明, P_{ref} 设定为5 000 W已无法保证系统存在有效平衡点; 图8(b)表明, 需要将 P_{ref} 进一步降低至1 500 W才能使得两类平衡曲线相交产生有效的平衡点 a' , 从而改善系统的稳定性。

综上所述, 电网故障下过大的 P_{ref} 设定值会恶化混合并联系统的平衡关系, 在故障工况下可以通过适度减小GFM-VSC的 P_{ref} 取值保证系统存在有效的平衡点, 以改善系统的稳定性。

3.2 GFM-VSC的无功控制对暂态稳定性的影响

引入无功功率控制后, GFM-VSC构建的电压幅值将受到无功功率下垂控制的调节, 当系统发生

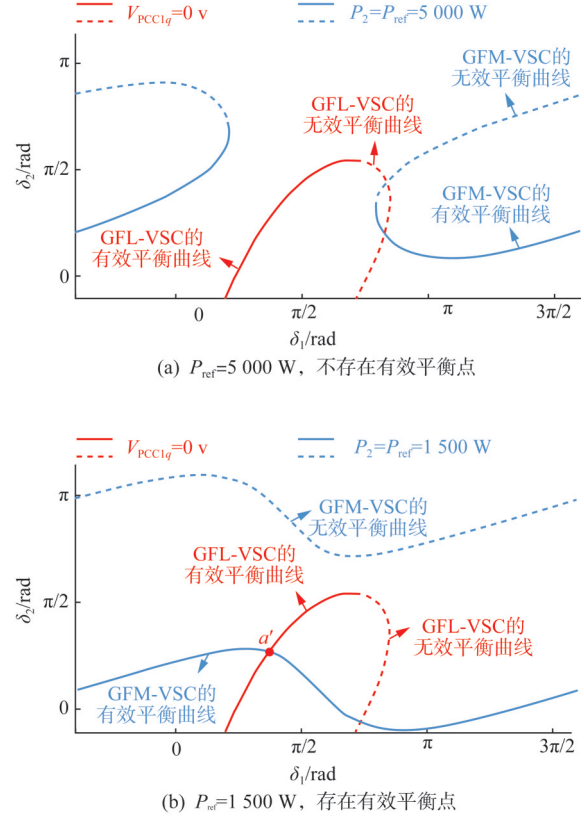


图8 电网电压跌落至0.15 p.u. 时混合并联系统的平衡关系

Fig. 8 Equilibrium relationship for hybrid parallel system when the grid voltage drops to 0.15 p.u.

故障后, PCC2处的电压幅值将随变流器功角的摆动而发生变化。根据式(10)可得, GFM-VSC在PCC2处构建的电压幅值可被视为一个以 δ_1 和 δ_2 为自变量的二元函数, 以 δ_1 为 x 轴、 δ_2 为 y 轴、 V_{ref} 为 z 轴, GFM-VSC在PCC2处构建的电压幅值可表示为三维空间内的一个曲面, 图9为GFM-VSC构建的电压幅值的三维表示图。在变流器功角的典型运行区间内, V_{ref} 值会随着 δ_2 的增大而显著降低。

图10描述了GFM-VSC无功功率控制对混合并

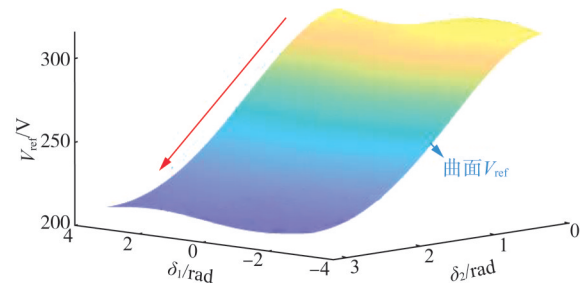
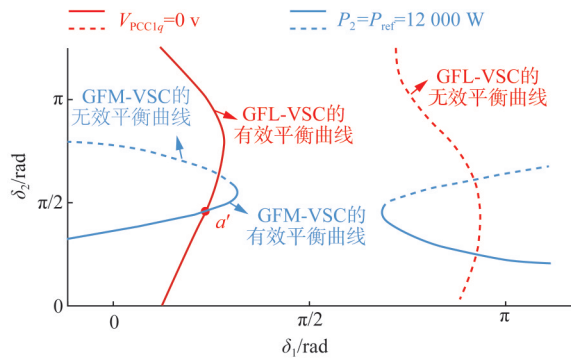


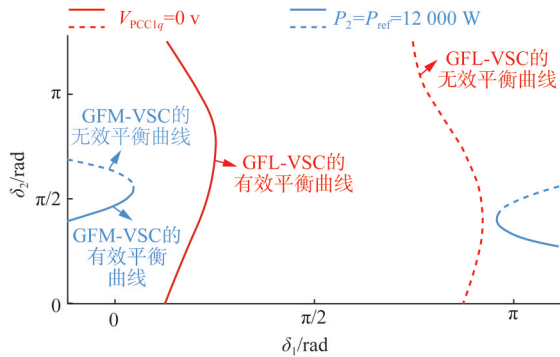
图9 GFM-VSC构建的电压幅值

Fig. 9 Voltage amplitude of GFM-VSC construction

联系统平衡关系的影响。当 GFM-VSC 采用定交流电压控制时, 式(11)—(12)中的 V_{ref} 可始终保持为 311 V, 并不会随着运行工况的改变而发生变化。在电网电压 E 跌落至 0.35 p. u. 时, 结合表 1 相关参数, 可在 δ_1 - δ_2 平面内绘制式(11)所示的 GFL-VSC 的电压平衡关系和式(12)所示的 GFM-VSC 的功率平衡关系, 利用平衡有效性判据式(13)可判断各平衡曲线的有效性。如图 10(a)所示, 两类变流器均存在有效的平衡曲线, 且两类有效的平衡曲线可以相交产生有效平衡点 a' , 系统可以保持暂态稳定。



(a) GFM-VSC 采用定交流电压控制, 存在有效平衡点



(b) GFM-VSC 采用无功功率下垂控制, 不存在有效平衡点

图 10 无功功率控制对混合并联系统平衡关系的影响

Fig. 10 Effect of reactive power control on the equilibrium relationships of the hybrid parallel system

当 GFM-VSC 采用无功功率下垂控制时, 式(11)—(12)中的 V_{ref} 将会随着系统运行工况的改变而受到无功功率下垂控制的调节, 其调节规律可由式(10)所描述。当电网发生电压跌落时, GFM-VSC 为保证功率平衡, 其功角 δ_2 会持续增大, 根据图 9 可得, GFM-VSC 构建的电压幅值 V_{ref} 在电网故障工况下会显著降低。式(8)表明, V_{ref} 降低会导致在电网故障工况下 GFM-VSC 注入系统的有功功率

P_2 降低。根据 3.1 节分析, 这会导致同一 P_{ref} 对应的等高线收缩。图 10(b)进一步阐述了这一机理, 结合表 1 相关参数, 联立式(10)—(12)可绘制引入无功功率控制后系统的平衡关系。如图 10(b)所示, 无功功率控制的引入会导致 GFM-VSC 的平衡曲线显著收缩, 这将不利于其与 GFL-VSC 的平衡曲线相交产生有效的平衡点, 在此工况下系统将因丧失有效的平衡点而发生暂态失稳。

3.3 GFL-VSC 的电流参考对暂态稳定性的影响

GFL-VSC 的电流参考值直接决定其注入系统的电流幅值 I_1 和相位 φ , 它们直接会对式(11)—(12)所示的两类平衡约束产生影响, 进而影响系统的暂态同步稳定性。

$$\begin{cases} I_1 = \sqrt{I_{d\text{ref}}^2 + I_{q\text{ref}}^2} \\ \varphi = \arctan \frac{I_{q\text{ref}}}{I_{d\text{ref}}} \end{cases} \quad (14)$$

式中 $I_{q\text{ref}}$ 、 $I_{d\text{ref}}$ 分别为注入系统的 q 、 d 轴的电流幅值。

图 11 描述了 GFL-VSC 的电流参考值对系统稳定性的影响, 其中电网电压均跌落至 0.35 p. u., 构网型变流器的有功功率参考值均设定为 12 000 W。3 种工况下跟网型变流器的有功/无功电流参考值设定存在不同。

图 11(a)表明, 当 GFL-VSC 采用 80 A 的纯有功电流注入策略时, 两类变流器的有效平衡曲线没有交点, 系统不存在有效的平衡点; 图 11(b)表明, 当减小 GFM-VSC 的有功电流注入至 20 A 时, GFL-VSC 的平衡曲线向两侧呈现明显的扩张趋势, 且 GFM-VSC 的有效平衡曲线也向 GFL-VSC 的有效平衡曲线靠近, 虽然此时依然没有产生有效平衡点, 但通过减小 GFL-VSC 注入系统的有功电流可以促使两类平衡曲线相互靠近, 为两类有效平衡曲线的相交创造更好的条件; 最后, 如图 11(c)所示, 将 GFL-VSC 注入系统的有功电流进一步减小为 0, 并向系统注入 20 A 的无功电流时 GFL-VSC 的平衡曲线继续扩张, 且 GFM-VSC 也继续向右移动, 此时, 两类有效平衡曲线相交产生了有效平衡点 a 。上述分析表明, 在电网故障时可以通过减小 GFL-VSC 注入的有功电流, 并适当提高其注入的无功功率电流以改善系统的稳定性。

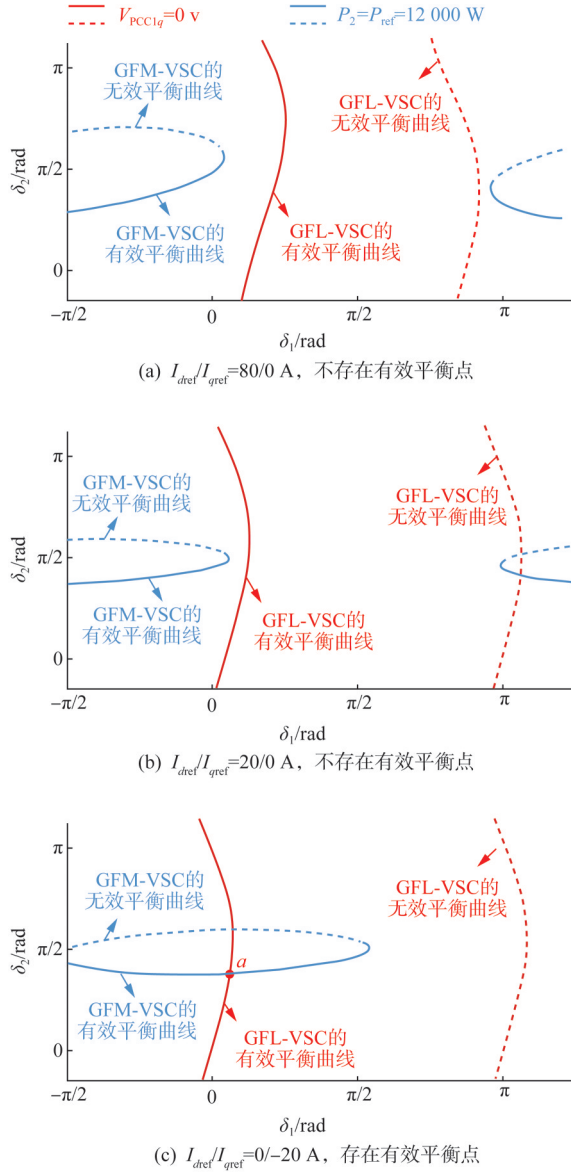


图 11 GFL-VSC 的电流参考值对系统稳定性的影响

Fig. 11 Effect of the current reference of the GFL-VSC on stability

4 实验验证

为验证上述理论分析的正确性, 利用 RT-Box 实验平台搭建了图 1 所示的多控制模式变流器混合并联系统的硬件在环实验电路 (hardware in the loop, HIL)。图 12 为硬件在环实验测试平台, GFL-VSC、GFM-VSC 以及主网相关的主电路部分在 PLECS RT-Box1 中运行, 利用 TMS320F28379 进行数字信号处理 (digital signal processing, DSP), 变流器相关的所有控制部分在 DSP 中运行。实验中

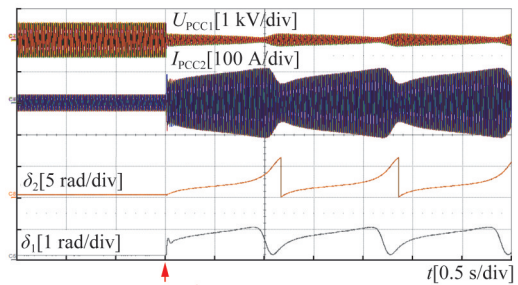
的主电路参数和变流器的控制参数与表 1 保持一致, 相应的电网故障工况与第 3 节的理论分析部分保持一致。



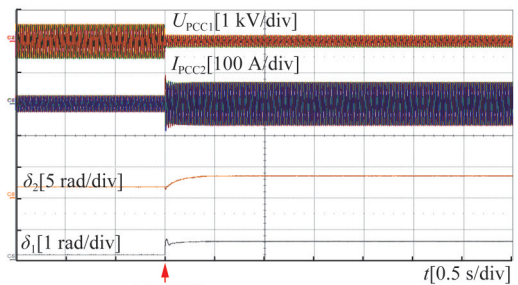
图 12 硬件在环实验测试平台

Fig. 12 Hardware-in-the-Loop experimental platform

图 13 为电网电压跌落至 0.3 p. u. 时, GFM-VSC 采用不同的 P_{ref} 值时系统的电压、电流以及功角的波形图。如图 13(a) 所示, 当 P_{ref} 的值为 12 000 W 时, 混合并联系统将发生暂态失稳现象, 这是由于在电网故障工况下, P_{ref} 的取值过大导致系统丧失了有效的平衡点, 系统也因此无法过渡到一个新的稳定状态, 进而发生暂态失稳。而图 13(b) 所示



电网故障
(a) $P_{ref}=12\ 000$ W, 失稳



电网故障
(b) $P_{ref}=5000$ W, 稳定

图 13 电网电压跌落至 0.3 p. u. 时不同 P_{ref} 工况下的实验结果

Fig. 13 Experimental results for operating conditions with different P_{ref} when the grid voltage drops to 0.3 p. u.

的实验结果表明, 若把 GFM-VSC 的 P_{ref} 减小到 5 000 W, 系统的暂态稳定性得到了明显的改善, GFM-VSC 和 GFL-VSC 的两类功角经过一定的暂态过渡过程后都能够达到新的稳定状态, 系统可以保持暂态稳定。

图 14 为电网电压跌落至 0.15 p. u. 时, GFM-VSC 采用不同的 P_{ref} 值时系统的电压、电流以及功角的波形图。如图 14(a) 所示, 随着电网电压跌落程度的加深, 即使将 P_{ref} 的值设定为 5 000 W 时, 也已经无法保证系统的稳定性, 系统将因失去有效平衡点而失稳。若将 P_{ref} 的设定值进一步降低为 1 500 W, 如图 14(b) 所示, 系统稳定性依然可以得到明显改善, 两类功角均可以过渡到一个新的稳态值, 在严重电网电压跌落的故障工况下, 依然可以保持暂态稳定。实验结果验证了理论分析的正确性。

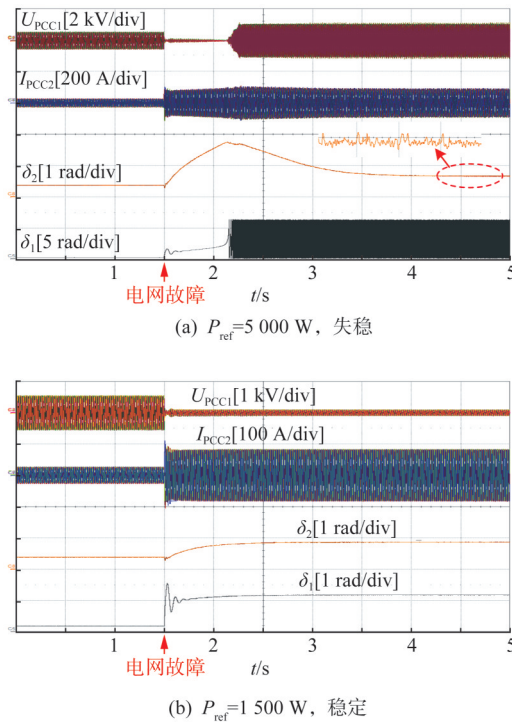


图 14 电网电压跌落至 0.15 p. u. 时不同 P_{ref} 工况的实验结果

Fig. 14 Experimental results for operating conditions with different P_{ref} when the grid voltage drops to 0.15 p. u.

图 15 为电网电压跌落至 0.35 p. u. 时, GFM-VSC 采用不同的控制策略时系统的电压、电流以及功角的波形图。实验结果表明, 当 GFM-VSC 采用恒定交流电压控制时, 系统在电网故障下依然可以保持暂态稳定, 两变流器的功角经过一定的暂态过

渡过程后都能够达到新的稳定运行状态。但是当 GFM-VSC 采用无功功率下垂控制时, 在电网故障下 GFM-VSC 的电压调整效应导致系统的平衡关系被破坏, 系统失去了有效平衡点, 混合并联系统也因此将发生暂态失稳现象。上述实验结果验证了理论分析的正确性。

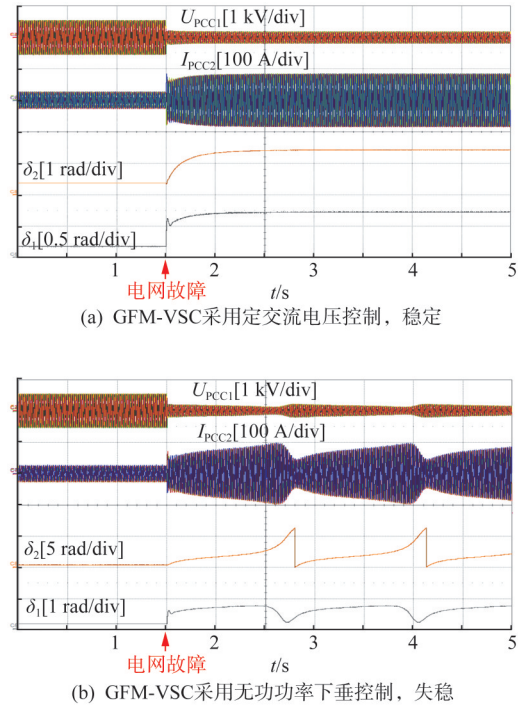


图 15 不同控制策略的实验结果

Fig. 15 Experimental results of different control strategies

图 16 为电网电压跌落至 0.35 p. u. 时, GFL-VSC 采用不同的电流参考值时系统的电压、电流以及功角的波形图。实验结果表明, 随着 GFL-VSC 注入系统有功电流的减小和无功电流的增大, 在同样的电网故障下系统的稳定性得到了明显的改善, 将由不稳定变为稳定, 实验结果验证了理论分析。

5 结论

本文研究了含 GFL-VSC 和 GFM-VSC 混合异构并网系统的暂态同步稳定问题。通过理论分析和实验测试得到了以下结论: 适用于混合并联系统暂态稳定性分析的数学模型是一个高阶非线性微分代数方程组, GFL-VSC 在其 PCC1 处的 q 轴电压分量 $V_{\text{PCC1}q}$ 和 GFM-VSC 注入其 PCC2 的有功功率 P_2 决定了混合并联系统的平衡关系, 两变流器通过线路阻抗产生耦合效应; GFL-VSC 的有效平衡曲线与

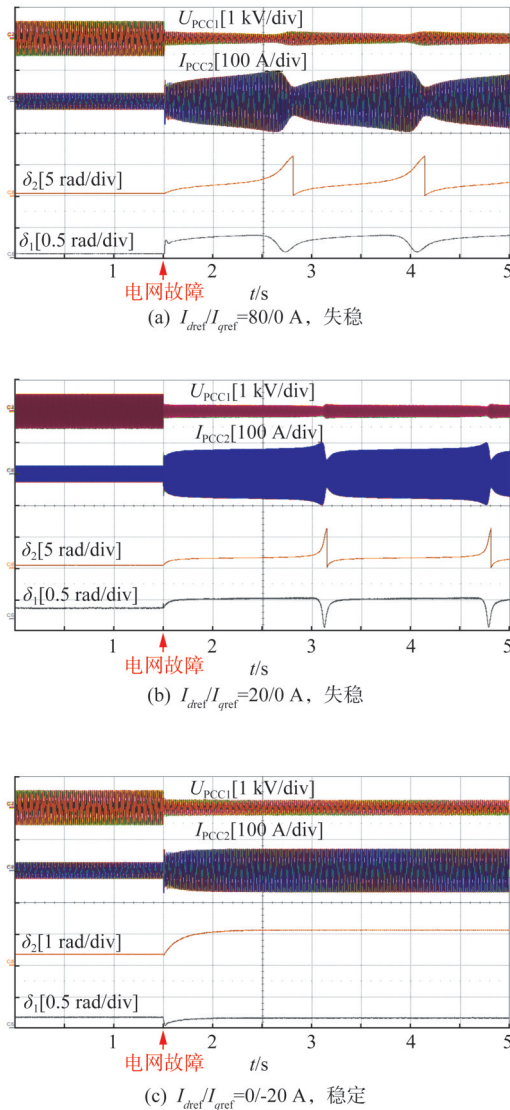


图 16 不同 GFL-VSC 的电流参考下的实验结果

Fig. 16 Experiment results under different current references of GFL-VSC

GFM-VSC 的有效平衡曲线相交产生混合并联系统的有效平衡点, 电网故障下只有存在有效的平衡点, 系统才能保持暂态同步稳定; GFM-VSC 的无功功率控制回路的电压调整效应会恶化系统的平衡关系, 不利于系统的暂态稳定性; 电网故障时可以通过减小 GFL-VSC 注入的有功电流并合理增大其无功电流, 或减小 GFM-VSC 的有功功率参考值来改善系统的暂态稳定性。

参考文献

[1] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461

- 475.

XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461 - 475.

[2] 徐政. 高比例非同步机电源电网面临的三大技术挑战[J]. 南方电网技术, 2020, 14(2): 1 - 9.

XU Zheng. Three technical challenges faced by power grids with high proportion of non-synchronous machine sources [J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(2): 1 - 9.

[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.

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.

[4] 冯俊杰, 辛清明, 赵晓斌, 等. 大规模新能源超远距离送出的柔性直流系统集成设计方案[J]. 南方电网技术, 2024, 18(3): 34 - 44.

FENG Junjie, XIN Qingming, ZHAO Xiaobin, et al. Integrated design scheme of VSC-HVDC system for large-scale renewable energy ultra-long-distance transmission [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(3): 34 - 44.

[5] 李建林, 田立亭, 来小康. 能源互联网背景下的电力储能技术展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 15 - 25.

LI Jianlin, TIAN Liting, LAI Xiaokang. Outlook of electrical energy storage technologies under energy internet background [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 15 - 25.

[6] 杨鹏, 刘锋, 姜齐荣, 等. “双高”电力系统大扰动稳定性: 问题、挑战与展望[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(5): 403 - 414.

YANG Peng, LIU Feng, JIANG Qirong, et al. Large-disturbance stability of power systems with high penetration of renewables and inverters: phenomena, challenges, and perspectives [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(5): 403 - 414.

[7] HE X Q, GENG H, MU G. Modeling of wind turbine generators for power system stability studies: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021 (143): 110865.1 - 110865.17.

[8] TSE C K, HUANG M, ZHANG X, et al. Circuits and systems issues in power electronics penetrated power grid [J]. IEEE Open Journal of Circuits and Systems, 2020(1): 140 - 156.

[9] WANG X, TAUL M G, WU H, et al. Grid synchronization stability of converter-based resources—an overview [J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2020(1): 115 - 134.

[10] 梁军, 李传玥. 并网换流器控制模式发展与弱电网稳定研究[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3703 - 3712.

LIANG Jun, LI Chuanyue. Recent development of grid-connected inverters and weak-grid stabilization [J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3703 - 3712.

[11] 张兴, 曹仁贤. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2018.

[12] LIU Q, CALDOGNETTO T, BUSO S. Review and comparison of grid-tied inverter controllers in microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(7): 7624

- 7639.
- [13] ROSSO R, WANG X, LISERRE M, et al. Grid-forming converters: control approaches, grid synchronization, and future trends-a review[J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2021(2): 93 - 109.
- [14] 李明, 常永康, 毛永涛, 等. 高渗透率新能源发电并网变流器跟网/构网型稳定控制技术综述与展望[J]. 高电压技术, 2024, 50(11): 4773 - 4788.
LI Ming, CHANG Yongkang, MAO Yongtao, et al. Review and prospect of stability control techniques for grid-following/grid-forming converters in high-penetration renewable energy generation [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50 (11) : 4773 - 4788.
- [15] ZHANG L, HARNEFORS L, NEE H P. Power synchronization control of grid-connected voltage-source converters [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25 (2) : 809 - 820.
- [16] ELWAKIL M M, ZOGHABY H M E, SHARAF S M, et al. Adaptive virtual synchronous generator control using optimized bang-bang for islanded microgrid stability improvement [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8 (4): 1 - 21.
- [17] FU X, SUN J, HUANG M, et al. Large-signal stability of grid-forming and grid-following controls in voltage source converter: a comparative study [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 7832 - 7840.
- [18] 胡家兵, 袁小明, 程时杰. 电力电子并网装备多尺度切换控制与电力电子化电力系统多尺度暂态问题[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5457 - 5467, 5594.
HU Jiabing, YUAN Xiaoming, CHENG Shijie. Multi-time scale transients in power-electronized power systems considering multi-time scale switching control schemes of power electronics apparatus [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39 (18): 5457 - 5467, 5594.
- [19] 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.
- [20] WANG X, BLAABJERG F. Harmonic stability in power electronic-based power systems: concept, modeling, and analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2858 - 2870.
- [21] FIRUZI M F, ROOSTA A, GITIZADEH M. Stability analysis and decentralized control of inverter-based AC microgrid [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4 (1): 1 - 24.
- [22] WU H, WANG X. Design-oriented transient stability analysis of PLL-synchronized voltage-source converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35 (4) : 3573 - 3589.
- [23] 李霞林, 王智, 郭力, 等. 基于最大估计吸引域的 VSC 接入弱网下的锁相环同步暂态稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(20): 7485 - 7497.
LI Xialin, WANG Zhi, GUO Li, et al. Transient stability analysis of PLL synchronization in weak-grid-connected VSCs based on the largest estimated domain of attraction [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(20): 7485 - 7497.
- [24] 王顺亮, 孙瑞婷, 马俊鹏, 等. 弱电网下并网逆变器正交功率同步控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(23): 8475 - 8486.
WANG Shunliang, SUN Ruiting, MA Junpeng, et al. Quadrature power synchronization control for grid-connected inverters under weak grids [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(23): 8475 - 8486.
- [25] WU H, WANG X. Design-oriented transient stability analysis of grid connected converters with power synchronization control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 66 (8) : 6473 - 6482.
- [26] PAN D, WANG X, LIU F, et al. Transient stability of voltage-source converters with grid-forming control: a design-oriented study [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1019 - 1033.
- [27] 耿华, 何长军, 刘浴霜, 等. 新能源电力系统的暂态同步稳定研究综述[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3367 - 3383.
GENG Hua, HE Changjun, LIU Yushuang, et al. Overview on transient synchronization stability of renewable-rich power systems [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3367 - 3383.
- [28] SHUAI Z, SHEN C, LIU X, et al. Transient angle stability of virtual synchronous generators using Lyapunov's direct method [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4648 - 4661.
- [29] 张宇, 蔡旭, 张琛, 等. 并网变换器的暂态同步稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1687 - 1702.
ZHANG Yu, CAI Xu, ZHANG Chen, et al. Transient synchronization stability analysis of voltage source converters: a review [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1687 - 1702.

收稿日期: 2024-12-19; 网络首发日期: 2025-03-24

作者简介:

王顺亮(1987), 男, 教授, 博士, 研究方向为高压直流输电、多电平变流器、电力电子、电力电子化电力系统, slwang@scu.edu.cn;

蒋奥博(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为并网逆变器的稳定性分析, jab_scu@163.com;

马俊鹏(1990), 男, 通信作者, 副教授, 博士, 研究方向为并网变换器建模与控制, jma@scu.edu.cn。