

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.02.002

低阻抗下构网型变流器多机系统小信号建模与稳定性分析

陈永康, 黄云辉, 方正, 王栋, 唐金锐, 周克亮

(武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430071)

摘要: 构网型变流器具有电压源特性, 可为高阻抗弱电网提供阻尼和频率支撑, 具有良好的稳定性, 但在低阻抗电网下可能会出现失稳现象。文中围绕低阻抗下构网型变流器多机系统小信号建模和稳定性展开分析。首先, 建立低阻抗下构网型变流器多机系统接入电网的小信号模型, 揭示系统的动态特性与耦合机理。其次, 通过特征根轨迹和参与因子分析, 研究不同电网强度和控制参数下系统的主导振荡模态及其对系统稳定性的影响。最后, 通过MATLAB时域仿真验证了建模和稳定性分析结果的准确性。研究表明, 电网强度增大、有功降低、下垂系数减小以及联络阻抗减小, 均会削弱构网型变流器多机系统稳定性, 其中功率环和电压环为影响系统稳定性的主导控制环路。

关键词: 构网型变流器; 低阻抗电网; 小信号建模; 特征根轨迹; 主导振荡模态; 稳定性分析

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)02-0013-10

0 引言

为满足不断增加的电力需求以及应对环境压力, 电力系统向高比例新能源和电力电子设备的方向发展^[1-4]。传统的以同步发电机为主的电力系统正逐渐被电力电子主导的新型电力系统取代。而电压源型变流器(voltage source converter, VSC)在高比例新能源接入电网中起关键作用, 也是当前新型电力系统研究的热点^[5-8]。VSC具有灵活多变的特点, 使得新型电力系统呈现非线性、多时性和复杂性等特性^[9], 给系统的稳定性和安全运行带来了严峻的挑战。

目前在实际应用中, 大多采用跟网型变流器。该变流器基于矢量电流控制, 根据电网的功率需求, 通过精确调节输出电流变流器控制其有功和无功功率输出, 实现对电网的功率供给, 确保电网功率平衡; 同时, 利用锁相环(phase locked loop, PLL)等机制, 实时跟踪电网的电压相位和频率, 确保其输出与电网同步^[10]。但跟网型控制不具备频率、惯性和阻尼调节特性及电压支撑能力, 且面临系统惯性降低、电网故障时频率波动大和依赖外部电源等问题, 不利于新能源消纳和电力供应保障^[11-12]。

为确保未来高比例新能源电力系统的稳定运行, 需要将部分新能源发电单元构建为电压源, 支撑大电网的电压和频率。因此, 具备频率、电压动态调节和支撑能力的构网型变流器受到广泛关注。目前, 国内外均已开始规划构网型变流器的大

规模工程应用: 国内, 张北柔性直流电网示范工程的四端柔性直流环形电网组网中张北和康保站采用构网控制技术, 具备新能源孤岛和交流连接方式; 国外, 德国电网公司宣布2035年德国接入电网的变流器中构网型占比将达到35%, 并计划在2021年之后新增的变流器中一半以上采用构网型控制。构网型变流器通过控制输出功率或直流电压跟踪电网相位, 利用电压比例积分(proportional integral, PI)控制器调节交流侧的并网电压, 模拟同步发电机转子的惯量和阻尼特性, 从而为电网提供频率支撑。该变流器无须借助电网相位和频率实现同步, 在高阻抗弱电网下具有良好的稳定性, 且对电压和频率的调节更加灵活, 降低了次同步振荡和低频振荡的可能性, 有助于系统稳定运行, 因此展现出广阔的发展和应用前景^[13-19]。

文献[20-21]指出, 构网型变流器接入低阻抗强电网时, 其稳定裕度随电网强度的增加而降低, 可能无法与电网同步。尽管构网型变流器借鉴了同步发电机的模型, 二者的并网动态都可描述为2个电压源并联^[22], 但由于同步发电机具备较大的电枢阻抗, 在低阻抗强电网下仍然存在足够大的连接阻抗, 并不存在2个电压源直接并联的风险。而构网型变流器仅通过电网阻抗并网连接, 在强电网下电网阻抗很小, 不利于电压源并联, 因此构网型变流器在强电网下的失稳风险剧增^[23]。

状态空间小信号建模是分析系统小干扰稳定性的重要方法^[24-25], 尤其是在构网型变流器的研究领域。文献[26]将构网型变流器的全阶多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)小信号

收稿日期: 2024-07-22; 修回日期: 2024-11-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52307217); 广东省基础与应用基础研究基金(2023A1515240052)

模型简化为正交轴上的单输入单输出(single-input single-output, SISO)模型,揭示了在低阻抗强电网下电压控制环路中引入积分项的功率同步环路是引起不稳定的主要原因。降低电网强度或功率压降增益可以降低积分项的增益并增强稳定性。

此外,构网型变流器多机系统之间存在复杂的交互作用^[27-28]。文献^[29-30]通过构网型变流器有功功率变化与负载变化之间的传递函数,分析参数对传递函数极点的影响。考虑负载变化对有功功率控制的影响,建立闭环状态空间模型,进而分析不同参数对多机系统有功功率的影响^[31-32]。然而,现有文献大多在建模时忽略了系统稳态工作点的动态变化,尽管这有助于降低分析的复杂性和适用性。此外,在当前的研究中,虽然单一构网型变流器的建模分析受到广泛关注,但针对构网型多机并联系统的小信号建模及其精准分析,仍是一个亟待突破的关键点。因此,有必要进一步对构网型变流器多机系统接入低阻抗电网时小干扰稳定性进行研究。

文中旨在对低阻抗下构网型变流器多机系统的稳定性进行深入的理论研究。首先,建立构网型变流器多机系统的小信号模型,揭示系统的动态特性与耦合作用。其次,通过特征根轨迹和主导振荡模态参与因子的分析,研究在不同电网强度和控制参数下系统的主导振荡模态及其稳定趋势,重点分析影响构网型变流器多机系统稳定性的主导控制环路,剖析系统稳定性受不同控制参数影响的关键要素。最后,利用 MATLAB/Simulink 环境建立时域仿真模型,验证所构建模型的准确性以及稳定性分析的可靠性。

1 构网型变流器多机系统控制与建模

1.1 构网型变流器多机系统主电路及控制策略

图1为构网型变流器多机系统并网的主电路和控制策略。变流器直流侧功率可由风力发电机/光伏电池板等新能源设备提供。构网型变流器交流侧使用滤波器滤除高频谐波,随后通过公共并网点(point of common coupling, PCC)汇集,接入交流电网。构网型控制系统包含交流电压控制(alternating voltage control, AVC)、交流电流控制(alternating current control, ACC)和功率同步控制(power synchronization control, PSC)。内环电压、电流控制能够有效提高机端电压、输出电流的动态响应性能,并限制变流器故障电流。文中利用下垂控制对

功率进行调节,功率环输出电压幅值给定信号及电压相位参考值,将该相位作为同步信号。此外,将输出电压作为内环电压控制的目标参数,内环电压控制输出的电流作为内环电流控制的目标参数。内环电流输出的调制信号,经过脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)发生器调制,生成变流器的触发信号。

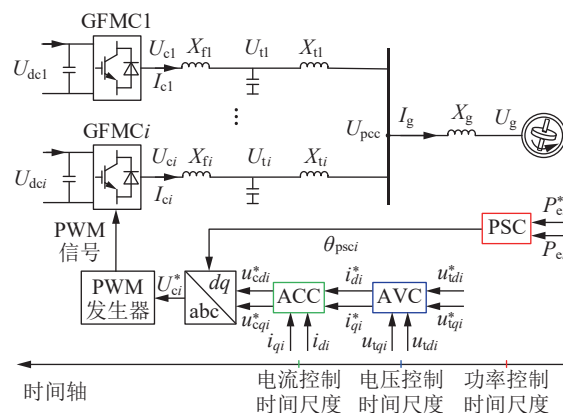


图1 构网型变流器多机系统主电路及控制策略

Fig.1 Main circuit and control strategy of multi-VSCs for grid-forming converters

图1主电路拓扑中, GFMCI为构网型变流器; U_{dci} 为第*i*台构网型变流器直流侧电压; U_{ci} 为第*i*台构网型变流器的内电势; I_{ci} 为第*i*台构网型变流器输出电流; X_{fi} 为第*i*台构网型变流器的滤波器等效电抗; U_{fi} 为第*i*台构网型变流器的端电压; X_{li} 为第*i*台构网型变流器与并网点之间的输电线路等效联络电抗; U_{pcc} 为并网点电压; I_g 为流入电网的电流; U_g 、 X_g 分别为电网电压及其等效电抗。

图1构网型控制系统拓扑中,物理量上标带“*”为参考值,不带“*”则为实际值, P_{ci} 为第*i*台构网型变流器输出有功功率; u_{di} 、 u_{qi} 分别为第*i*台构网型变流器端电压在功率环*d*、*q*轴上的分量; i_{di} 、 i_{qi} 分别为第*i*台构网型变流器输出电流在功率环*d*、*q*轴上的分量; u_{cdi} 、 u_{cqi} 分别为第*i*台构网型变流器内电势在功率环*d*、*q*轴上的分量; θ_{psci} 为第*i*台构网型变流器功率环输出的相位。

1.2 构网型变流器多机系统建模

文中主要分析新能源电力系统中构网型变流器在不同电网强度和控制参数下对系统小干扰稳定性的关键影响因素。对于构网型变流器多机系统,每台变流器的稳定性由其自身稳定性和其他变流器的影响共同决定。因此,将多台构网型变流器视为一个集群并等效为一台进行研究,忽略变流器之间的复杂交互作用。这种简化处理对双机系统和多机系统的稳定性分析具有代表性,所得结论适

用于由多个构网型变流器组成的系统。

以两台机为例,图2为构网型变流器控制系统矢量图。 abc 为三相静止坐标系;PSC d_1q_1 为以功率同步角速度 ω_{psc1} 的旋转坐标系;PSC d_2q_2 为以功率同步角速度 ω_{psc2} 的旋转坐标系; rs 为同步参考坐标系,该坐标系的转速 ω_g 固定等于 $2\pi f_N$, f_N 为基准频率。其中, U_{t1} 、 U_{t2} 分别为第1台构网型变流器GFMC1和第2台构网型变流器GFMC2的端电压矢量; U_g 为电网电压矢量,其在 abc 坐标系的角度为 θ_{g0} 。

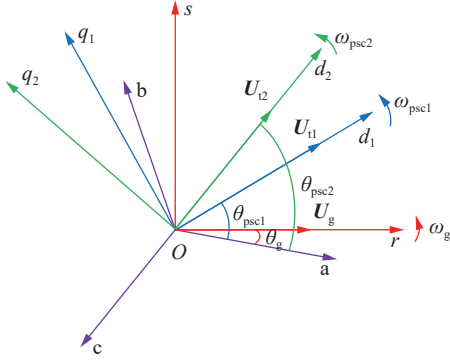


图2 构网型变流器控制系统矢量

Fig.2 Vectors of grid-forming converter control system

在稳态条件下, PSC d_1q_1 坐标系 d_1 轴方向与端电压矢量 U_{t1} 保持一致, PSC d_2q_2 坐标系 d_2 轴方向与端电压矢量 U_{t2} 保持一致。以第1台构网型变流器为例,当系统遭遇小干扰时,端电压矢量 U_{t1} 会从原本的 d_1 轴位置偏离,导致端电压矢量 U_{t1} 与 d_1 轴之间产生一个偏差角度,记作 $\theta_{psc1} - \theta_{g0}$ 。功率同步环控制端电压矢量 U_{t1} 与 a 轴的夹角 θ_{psc1} 与 d_1 轴重合。第2台构网型变流器发生小扰动时同理。因此,在动态过程中,需要转换到一个以同步速旋转的参考坐标系进行统一计算。从 PSC d_1q_1 坐标系、PSC d_2q_2 坐标系转换到 rs 同步参考坐标系可以表示为:

$$\begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{s1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{psc1} - \theta_g) & -\sin(\theta_{psc1} - \theta_g) \\ \sin(\theta_{psc1} - \theta_g) & \cos(\theta_{psc1} - \theta_g) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} u_{r1} \\ u_{s1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{psc1} - \theta_g) & -\sin(\theta_{psc1} - \theta_g) \\ \sin(\theta_{psc1} - \theta_g) & \cos(\theta_{psc1} - \theta_g) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{d1} \\ u_{q1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} i_{r2} \\ i_{s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{psc2} - \theta_g) & -\sin(\theta_{psc2} - \theta_g) \\ \sin(\theta_{psc2} - \theta_g) & \cos(\theta_{psc2} - \theta_g) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d2} \\ i_{q2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} u_{r2} \\ u_{s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{psc2} - \theta_g) & -\sin(\theta_{psc2} - \theta_g) \\ \sin(\theta_{psc2} - \theta_g) & \cos(\theta_{psc2} - \theta_g) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{d2} \\ u_{q2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: u_{ri} 、 u_{si} 分别为第 i 台构网型变流器在 r 、 s 轴

的电压分量, $i=1, 2$; i_{ri} 、 i_{si} 分别为第 i 台构网型变流器在 r 、 s 轴的电流分量; u_{di} 、 u_{qi} 分别为第 i 台构网型变流器在 d 、 q 轴的电压分量。

根据图1可得构网型变流器多机系统主电路方程:

$$\dot{U}_{t1} = \dot{U}_{psc} + jX_{l1} \dot{I}_{c1} \quad (5)$$

$$\dot{U}_{t2} = \dot{U}_{psc} + jX_{l2} \dot{I}_{c2} \quad (6)$$

$$\dot{U}_{psc} = \dot{U}_g + jX_g (\dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2}) \quad (7)$$

式中: \dot{U}_i 为第 i 台构网型变流器的端电压相量; \dot{I}_{ci} 为第 i 台构网型变流器输出电流相量; \dot{U}_{psc} 为并网点电压相量; \dot{U}_g 为电网电压相量。

电压控制环的数学模型可以表示为:

$$i_{d1}^* = (u_{d1}^* - u_{d1}) \left(k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s} \right) \quad (8)$$

$$i_{q1}^* = (u_{q1}^* - u_{q1}) \left(k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s} \right) \quad (9)$$

$$i_{d2}^* = (u_{d2}^* - u_{d2}) \left(k_{p3} + \frac{k_{i3}}{s} \right) \quad (10)$$

$$i_{q2}^* = (u_{q2}^* - u_{q2}) \left(k_{p3} + \frac{k_{i3}}{s} \right) \quad (11)$$

式中: k_{p1} 、 k_{p3} 和 k_{i1} 、 k_{i3} 分别为两机电压控制环的比例和积分控制参数; s 为拉普拉斯算子。

电流控制环的数学模型可以表示为:

$$u_{cd1}^* = (i_{d1}^* - i_{d1}) \left(k_{p2} + \frac{k_{i2}}{s} \right) \quad (12)$$

$$u_{cq1}^* = (i_{q1}^* - i_{q1}) \left(k_{p2} + \frac{k_{i2}}{s} \right) \quad (13)$$

$$u_{cd2}^* = (i_{d2}^* - i_{d2}) \left(k_{p4} + \frac{k_{i4}}{s} \right) \quad (14)$$

$$u_{cq2}^* = (i_{q2}^* - i_{q2}) \left(k_{p4} + \frac{k_{i4}}{s} \right) \quad (15)$$

式中: k_{p2} 、 k_{p4} 和 k_{i2} 、 k_{i4} 分别为两机电流控制环 PI 控制器的比例和积分控制参数。

功率同步环基于下垂控制,其数学模型可以表示为:

$$\omega_{psc1} = \omega_{ref} + k_1 \frac{\omega_c}{s + \omega_c} (P_{e1}^* - P_{e1}) \quad (16)$$

$$\omega_{psc2} = \omega_{ref} + k_2 \frac{\omega_c}{s + \omega_c} (P_{e2}^* - P_{e2}) \quad (17)$$

$$\theta_{psc1} = \frac{1}{s} \omega_{psc1} \quad (18)$$

$$\theta_{psc2} = \frac{1}{s} \omega_{psc2} \quad (19)$$

式中: ω_{ref} 为额定频率参考值,等于系统额定频率 ω_g ; ω_c 为构网型变流器输出角频率的实际值, $\omega_c/(s + \omega_c)$ 为低通滤波器; k_1 、 k_2 为两机功率同步环的下垂系数。

其中系统有功输出可由式(20)、式(21)求得。

$$P_{e1} = \frac{3}{2}(u_{d1}i_{d1} + u_{q1}i_{q1}) \quad (20)$$

$$P_{e2} = \frac{3}{2}(u_{d2}i_{d2} + u_{q2}i_{q2}) \quad (21)$$

传输电路的数学模型建立在 r 、 s 轴上, 可以表示为:

$$u_{cr1} = L_{f1} \frac{di_{r1}}{dt} + u_{vr1} - X_{f1}i_{s1} \quad (22)$$

$$u_{cs1} = L_{f1} \frac{di_{s1}}{dt} + u_{vs1} + X_{f1}i_{r1} \quad (23)$$

$$u_{cr2} = L_{f2} \frac{di_{r2}}{dt} + u_{vr2} - X_{f2}i_{s2} \quad (24)$$

$$u_{cs2} = L_{f2} \frac{di_{s2}}{dt} + u_{vs2} + X_{f2}i_{r2} \quad (25)$$

$$u_{vr1} = L_{t1} \frac{di_{r1}}{dt} + u_{pr1} - X_{t1}i_{s1} \quad (26)$$

$$u_{vs1} = L_{t1} \frac{di_{s1}}{dt} + u_{ps1} + X_{t1}i_{r1} \quad (27)$$

$$u_{vr2} = L_{t2} \frac{di_{r2}}{dt} + u_{pr2} - X_{t2}i_{s2} \quad (28)$$

$$u_{vs2} = L_{t2} \frac{di_{s2}}{dt} + u_{ps2} + X_{t2}i_{r2} \quad (29)$$

$$i_{gr} = i_{r1} + i_{r2} \quad (30)$$

$$i_{gs} = i_{s1} + i_{s2} \quad (31)$$

$$u_{pr} = L_g \frac{di_{gr}}{dt} + u_{gr} - X_g i_{gs} \quad (32)$$

$$u_{ps} = L_g \frac{di_{gs}}{dt} + u_{gs} + X_g i_{gr} \quad (33)$$

式中: u_{cri} 、 u_{csi} 分别为第 i 台构网型变流器内电势在 r 、 s 轴的分量; u_{vri} 、 u_{vsi} 分别为第 i 台构网型变流器端电压在 r 、 s 轴的分量; u_{pri} 、 u_{psi} 分别为第 i 台构网型变流器并网点电压在 r 、 s 轴的分量; u_{gr} 、 u_{gs} 分别为交流电网电压在 r 、 s 轴的分量; i_{gr} 、 i_{gs} 分别为流入电网的电流在 r 、 s 轴的分量; L_{fi} 为第 i 台构网型变流器的滤波器等效电感; L_{ti} 为第 i 台构网型变流器与并网点之间的输电线路等效联络电感; L_g 为电网等效电感。

结合式(1)—式(33), 对其进行线性化处理, 得到图3所示构网型变流器多机系统的小信号模型, 该模型可用状态空间方程表示, 如式(34)所示。图3中, K_1 — K_{36} 为所列状态空间方程的系数; Δ 表示对应变量的变化量。在小信号模型中, 电力设备和交流电网被区分开来。图3左侧, 每个构网型变流器的控制系统都被视为一个单独模块; 图3右侧为构网型变流器多机系统与交流电网之间的耦合关系矩阵。每台构网型变流器输出电流 Δi_{di} 、 Δi_{qi} 和相位 $\Delta \theta_{psc i}$ 到电网, 而电网将功率 ΔP_{ei} 和端电压 Δu_{di} 、

Δu_{qi} 反馈给每台构网型变流器, 可见, 构网型变流器多机系统通过电网进行耦合作用。

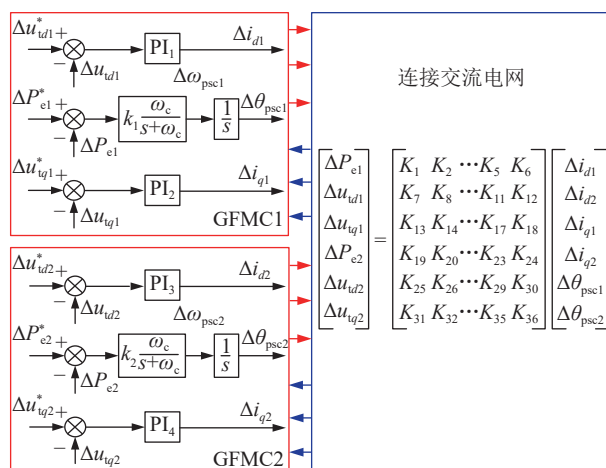


图3 构网型变流器多机系统小信号模型示意
Fig.3 Schematic diagram of small signal model of multi-VSCs for grid-forming converters

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} \quad (34)$$

$$\Delta \mathbf{x} = [\Delta i_{d1} \quad \Delta i_{q1} \quad \Delta \omega_{psc1} \quad \Delta \theta_{psc1} \quad \Delta i_{d2} \quad \Delta i_{q2} \quad \Delta \omega_{psc2} \quad \Delta \theta_{psc2}]^T \quad (35)$$

式中: $\Delta \mathbf{x}$ 为构网型变流器多机系统的状态变量; \mathbf{A} 为状态矩阵。利用状态矩阵 \mathbf{A} 的计算, 可以得出系统的特征值、特征向量和各状态变量的参与因子, 这些结果有助于分析系统在小扰动情况下的稳定性, 从而为系统设计和运行提供重要依据。

2 低阻抗下构网型变流器多机系统稳定性分析

基于第1章建立的模型, 使用特征值分析法研究低阻抗下构网型变流器多机系统的稳定性。通过调整系统中的不同参数, 观察系统稳定性以及 GFMCI 和 GFMCI2 对系统稳定性的影响程度。

2.1 电网强度对构网型变流器多机系统主导模式的影响分析

根据国际电气和电子工程师协会输配电委员会的标准, 电网强度可以通过短路比进行度量。对于单馈入系统, 短路比 I_{SCR} 定义为:

$$I_{SCR} = \frac{U_{pcc}^2}{S_N} \times \frac{1}{Z_g} \quad (36)$$

式中: S_N 为并网点馈入的额定容量; Z_g 为线路阻抗。线路阻抗增大使得短路比 I_{SCR} 减小, 电网强度变弱; 相反, 线路阻抗减小导致短路比 I_{SCR} 增大, 电网强度随之增大。当短路比大于3时, 电网被视为强电网; 而当短路比小于3时, 则被视为弱电网。

设置两台机有功输出 P_{e1} 、 P_{e2} 分别为 1.5、0.9 MW, 下垂系数 k_1 、 k_2 均为 0.5×10^{-4} , 其他系统参数和控制参数如表1所示。

表 1 构网型变流器多机系统参数
Table 1 Parameters of multi-VSCs for grid-forming converters

参数	数值
变流器基准容量/MW	1.5
变流器基准电压/V	1 000
变流器给定有功功率/MW	1.5
直流电压/V	1 100
电网电压/V	1 000
滤波电感/mH	0.1
线路电感/mH	0.05
下垂系数	0.5×10^{-4}
截止频率/(rad·s ⁻¹)	100
电压环比例、积分参数	5、150
电流环比例、积分参数	3、100

构网型变流器的短路比 I_{SCR} 从 3 增大至 8 时, 系统特征根的变化趋势如图 4(a) 所示。在电网强度不断增大的情况下, 共轭特征根 λ_3 、 λ_4 逐渐接近虚轴, 而实数特征根 λ_5 始终保持在左侧的复平面。以上特征根对系统稳定性影响很小。此时, 系统主导振荡模态为 λ_1 、 λ_2 , 对系统的稳定性和动态性能起决定作用, 系统呈现欠阻尼特性。主导振荡模态 λ_1 、 λ_2 逐渐向实轴正半轴移动, 系统趋向不稳定。当短路比 I_{SCR} 约为 7.95 时, 主导振荡模态 λ_1 、 λ_2 越过虚轴进入右半平面, 说明在此控制参数下系统的稳定性极限约为 $I_{SCR}=7.95$ 。

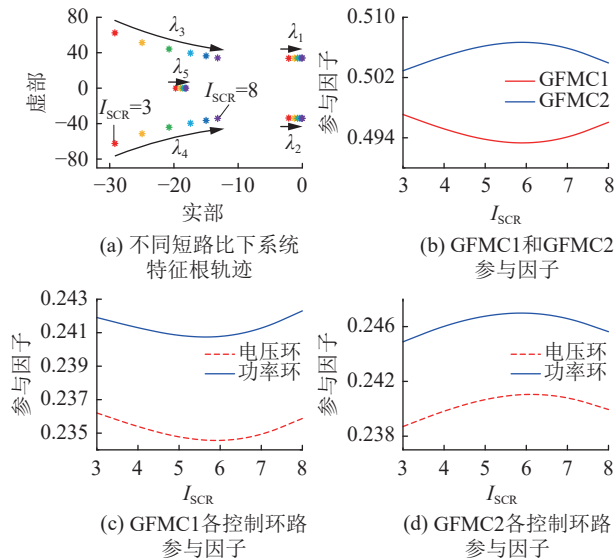


图 4 不同电网强度下构网型变流器多机系统的稳定性分析
Fig.4 Stability analysis of multi-VSCs for grid-forming converters under different values of grid strength

在电力系统动态分析中, 参与因子用来量化评估系统中每个状态变量对特定振荡模态的影响

程度。参与因子的绝对值越大, 说明该状态变量对特定振荡模态的贡献越大, 反之则越小。通过计算参与因子, 可以识别控制环路对系统稳定性的影响。

由于电流环及传输线路的参与因子极小, 其对主导振荡模态的贡献较小, 故此处忽略主导振荡模态电流环和传输线路。由图 4(b)—(d) 的参与因子曲线可知, GFM1、GFM2 主要由功率环、电压环主导。随着短路比增大, GFM1 的参与程度先减小后增大, GFM2 的参与程度先增大后减小。变流器各控制环路的参与程度整体变化极小, 且始终由功率环和电压环主导。

综上, 在低阻抗下, 随着短路比增大, 构网型变流器多机系统整体稳定性逐渐减弱。其中, 电流环和传输线路对系统主导振荡模态的贡献较小, 功率环和电压环对系统主导振荡模态的贡献较大, 功率环和电压环控制对系统稳定性起关键作用。

2.2 系统运行点对构网型变流器多机系统主导模式的影响分析

构网型变流器多机系统会随着功率输出的变化而改变其运行点, 此处研究构网型变流器有功功率输出变化对系统稳定性的影响。

设置短路比 I_{SCR} 为 3.45, GFM2 的输出有功功率参考值 P_{e2}^* 从 1 p.u. 下降至 0.07 p.u., 系统的特征根轨迹如图 5(a) 所示。由图可知, 共轭特征根 λ_3 、 λ_4 逐渐向虚轴移动, 实数特征根 λ_5 缓慢向正实轴移动但始终位于复平面的左半平面。以上特征根对系统稳定性几乎没有影响。主导振荡模态 λ_1 、 λ_2 随着 P_{e2}^* 减小逐渐往正实轴移动, 当 $P_{e2}^*=0.07$ p.u. 时越过虚轴进入右半平面导致系统失稳。

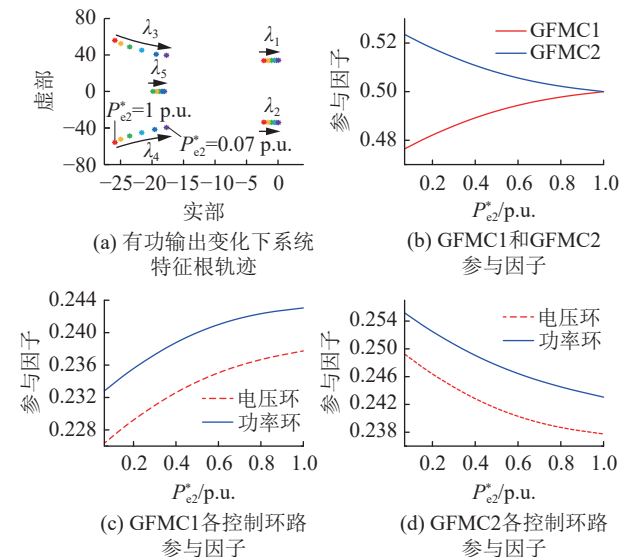


图 5 有功输出变化下构网型变流器多机系统的稳定性分析
Fig.5 Stability analysis of multi-VSCs for grid-forming converters with active power output variation

由于电流环及传输线路的参与因子极小,其对主导振荡模态的贡献较小,故此处忽略主导振荡模态电流环和传输线路。由图5(b)—(d)的参与因子曲线可知,GFMC1、GFMC2主要由功率环、电压环主导,随着输出有功功率减小,GFMC1参与程度逐渐减小,GFMC1各控制环路的参与程度缓慢减小;GFMC2参与程度逐渐增大,GFMC2各控制环路的参与程度缓慢增大,但2台变流器始终由功率环和电压环主导。

综上,在低阻抗下,随着输出有功功率减小,构网型变流器多机系统整体稳定性逐渐减弱,有功输出较大的变流器参与主导振荡模态的程度略有提升,而有功输出较小的变流器参与程度略有下降。其中,电流环和传输线路对系统主导振荡模态的贡献较小,功率环和电压环对系统主导振荡模态的贡献较大,因此功率环和电压环控制对系统稳定性起关键作用。

2.3 功率环对构网型变流器多机系统主导模式的影响分析

为研究功率环下垂系数对系统稳定性的影响,设置短路比 I_{SCR} 为 3.45,GFMC1 的下垂系数 k_1 从 2.5×10^{-4} 下降至 0.2×10^{-4} ,系统的特征根轨迹如图6(a)所示。由图可见,随着下垂系数减小,共轭特征根 λ_3 、 λ_4 逐渐向虚轴移动,共轭特征根 λ_5 、 λ_6 变为 2 个实数特征根,减少了一个振荡模态。随着 k_1 减小,主导振荡模态 λ_1 、 λ_2 逐渐向正实轴移动,当 $k_1=0.29 \times 10^{-4}$ 时, λ_1 、 λ_2 穿越虚轴进入右半平面导致系统失稳。

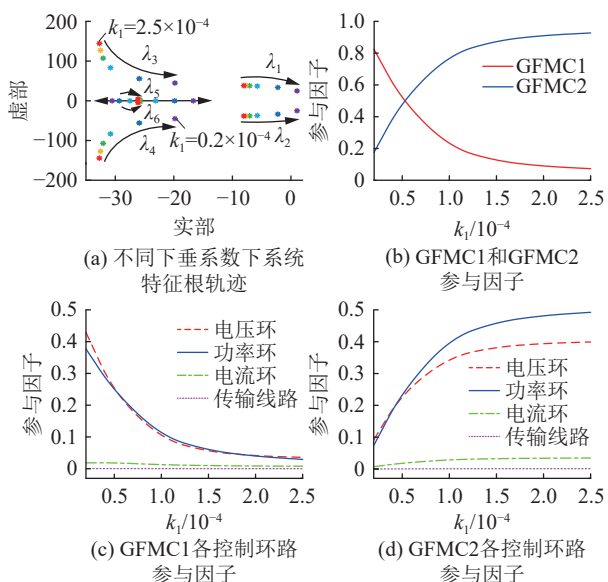


图6 不同功率环下垂系数下构网型变流器多机系统的稳定性分析

Fig.6 Stability analysis of multi-VSCs for grid-forming converters under different power loop sag coefficients

由图6(b)—(d)的参与因子曲线可知,随着功率环下垂系数减小,GFMC1参与程度迅速增大,其功率环及电压环参与程度迅速增大,对系统主导振荡模态的贡献迅速增加,而电流环和传输线路参与程度略微增大;GFMC2参与程度迅速减小,其功率环及电压环参与程度迅速减小,对主导振荡模态的贡献迅速减少,而电流环和传输线路略微减小。

综上,在低阻抗下,随着功率环下垂系数减小,构网型变流器多机系统整体稳定性逐渐减弱,下垂系数的变化对功率环和电压环的影响较大。其中,下垂系数较小的变流器参与主导振荡模态的程度逐渐提升,对系统稳定性的影响占主导地位且越来越强;下垂系数较大的变流器参与主导振荡模态的程度逐渐下降,对系统稳定性的影响变弱。

2.4 联络阻抗对构网型变流器多机系统主导模式的影响分析

为研究线路联络阻抗对系统稳定性的影响,设置短路比 I_{SCR} 为 3.45,GFMC1 的联络阻抗 Z_{t1} 从 $8.5 \times 10^{-4} \Omega$ 下降至 $0.5 \times 10^{-4} \Omega$,系统的特征根轨迹如图7(a)所示。由图可知,共轭特征根 λ_3 、 λ_4 逐渐向虚轴移动,共轭特征根 λ_5 、 λ_6 变为 2 个实数特征根,减少了一个振荡模态。以上特征根对系统稳定性几乎没有影响。主导振荡模态 λ_1 、 λ_2 随着 Z_{t1} 减小逐渐向正实轴移动,系统由稳定变为不稳定。

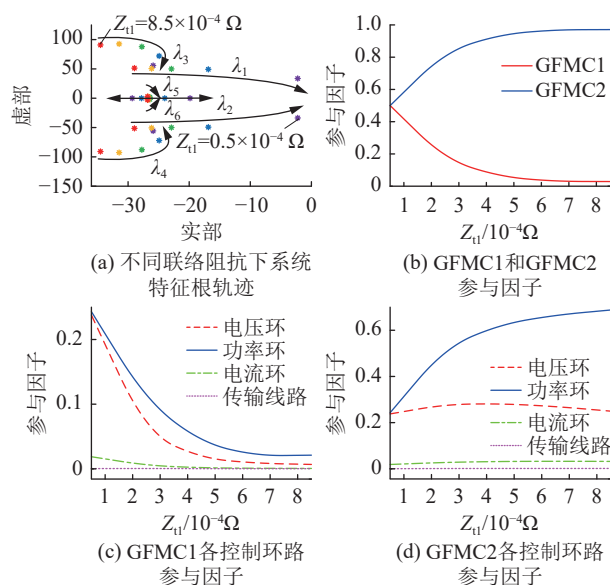


图7 不同联络阻抗下构网型变流器多机系统的稳定性分析
Fig.7 Stability analysis of multi-VSCs for grid-forming converters with different connection impedances

图7(b)—(d)展示了在不同联络阻抗条件下,2台构网型变流器各控制环路对系统主导振荡模态的参与因子情况。随着联络阻抗减小,系统主导振荡模态受功率环和电压环影响更大。当联络阻抗

较大时,与功率环有关的状态变量的参与因子明显高于与电压环有关的状态变量。其中 GFM1 参与程度迅速增大,其功率环和电压环参与程度迅速增大,对系统主导振荡模式的贡献迅速增加,而电流环和传输线路参与程度略微增大;GFM2 参与程度迅速减小,其功率环参与程度迅速减小,对系统主导振荡模式的贡献迅速减少,电压环参与程度先增大后减小,总体参与程度略微减小,而电流环和传输线路参与程度略微减小。

综上,在低阻抗下,随着联络阻抗减小,构网型变流器多机系统整体稳定性逐渐减弱。其中,联络阻抗较小即离并网点更近的变流器参与主导振荡模式的程度较高,其对系统稳定性的影响占主导地位且越来越强;联络阻抗较大即离并网点更远的变流器参与主导振荡模式的程度较低,对系统稳定性的影响越来越弱。另外,联络阻抗的变化对功率环和电压环的影响较大,但此时功率环和电压环依旧是影响系统主导振荡模式的关键控制环路。

3 时域仿真验证

为验证上述理论分析的正确性,在 MATLAB/Simulink 中搭建构网型变流器两机系统接入低阻抗电网的时域仿真模型,分析不同场景下系统的稳定状态。首先,设置合理的参数,使两机系统稳定运行,在 $t=3$ s,系统达到稳态之后,利用 GFM1 侧功率参考值设置阶跃小扰动,使变流器输出有功功率突增。通过观测 GFM1、GFM2 侧输出功率的响应波形,评估系统在受到小扰动时的稳定性情况。

图 8 为不同电网强度下的构网型变流器有功功率输出响应波形。可见,当短路比由 3 增大至 8 时,响应波形由收敛逐渐发散,振幅逐渐增大,阻尼比减小,系统逐渐失稳,与图 4 分析结果吻合。

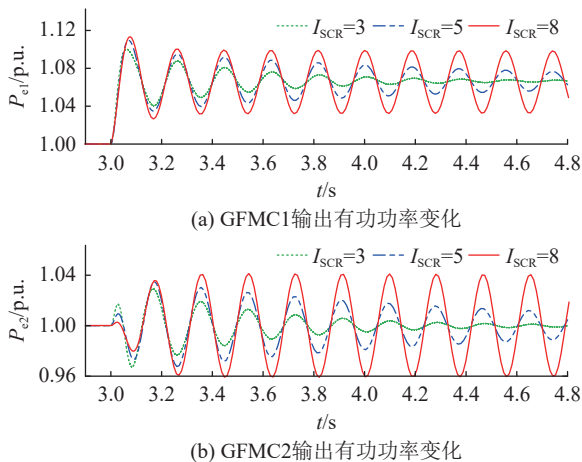


图 8 不同电网强度下变流器输出功率响应
Fig.8 Converter output power response under different values of grid strength

图 9 为不同系统运行点下的构网型变流器有功功率输出响应波形。当构网型变流器输出有功功率由 1.5 MW 逐渐下降至 0.1 MW,即由 1 p.u.逐渐下降至 0.007 p.u.时,可以观察到响应波形振幅逐渐增大,阻尼比减小,波形由收敛逐渐发散,系统由稳定逐渐变为不稳定,与图 5 分析结果吻合。

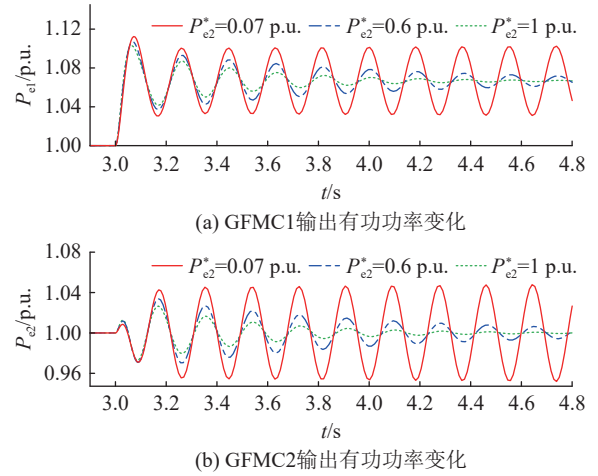


图 9 不同系统运行点下变流器输出功率响应
Fig.9 Converter output power response under different system operating points

图 10 为不同下垂系数下的构网型变流器有功功率输出响应波形。可见,当下垂系数 k_1 由 0.2×10^{-4} 增大至 1.5×10^{-4} 时,响应波形由发散振荡逐渐收敛,振荡幅度减小,阻尼比增大,系统稳定性逐渐增强,与图 6 分析结果吻合。

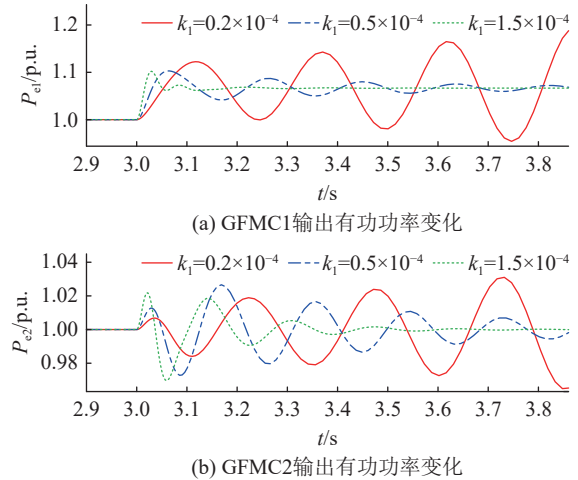


图 10 不同下垂系数下变流器输出功率响应
Fig.10 Converter output power response under different sag coefficients

图 11 为不同联络阻抗下的构网型变流器有功功率输出响应波形。可见,当联络阻抗由 $0.5 \times 10^{-4} \Omega$ 增大至 $6.5 \times 10^{-4} \Omega$ 时,系统的响应波形从发散状态转变为收敛状态,同时振荡频率下降,系统的稳定性提高,与图 7 分析结果吻合。

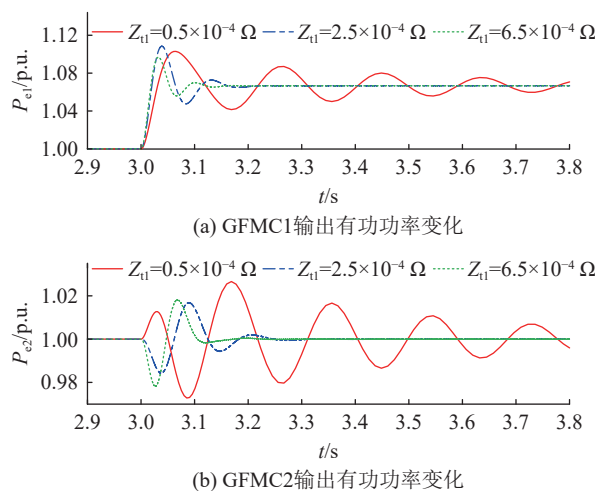


图 11 不同联络阻抗下变流器输出功率响应
Fig.11 Converter output power response under different connection impedances

4 结论

文中深入研究了低阻抗环境下构网型变流器多机系统接入的稳定性问题。首先,构建了该多机系统的小信号模型。然后,利用特征根分析和主导振荡模态参与因子的计算,对影响构网型变流器多机系统稳定性的核心控制环节进行剖析,进一步分析了不同参数对系统在小干扰作用下的稳定性影响。最后,构建了构网型变流器多机系统的时域仿真模型,以验证理论分析的准确性。文中具体结论如下:

(1) 在构网型变流器控制环路中,由参与因子分析可知,功率环和电压环在主导振荡模态中的参与因子较高,构网型变流器多机系统的稳定性主要受到功率同步控制环路和电压控制环路的影响。在合理的参数设计范围之内,优化功率环或者电压环的控制策略,有助于提高构网型变流器多机系统的稳定性。

(2) 在低阻抗条件下,电网强度增大、有功降低、下垂系数减小及联络阻抗减小,都会使得构网型变流器多机系统的稳定性变差,其中下垂系数较小及离并网点越近的构网型变流器对多机系统稳定性的影响更大,在实际应用中应重点关注。

参考文献:

[1] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].*电力系统自动化*,2021,45(9):171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(9): 171-191.

[2] 鲁宗相,李海波,乔颖.含高比例可再生能源电力系统灵活性

规划及挑战[J].*电力系统自动化*,2016,40(13):147-158.

LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(13): 147-158.

[3] 张爱军,刘会强,慕腾,等.计及经济-低碳时空匹配的高比例新能源电力系统扩展规划[J].*智慧电力*,2024,52(11):72-80.
ZHANG Aijun, LIU Huiqiang, MU Teng, et al. Expansion planning for high proportion of renewable energy power system considering economy-low carbon spatiotemporal matching[J]. *Smart Power*, 2024, 52(11): 72-80.

[4] 刘洪波,刘坤诚,盖雪扬,等.高比例新能源接入的主动配电网规划综述[J].*发电技术*,2024,45(1):151-161.
LIU Hongbo, LIU Shencheng, GAI Xueyang, et al. Power Generation Technology, 2024, 45(1): 151-161.

[5] 李宇骏,陆艺源,牟同鹏,等.新能源发电经换流器并网系统的稳定性分析与控制综述[J].*电网与清洁能源*,2023,39(12):79-94.
LI Yujun, LU Yiyuan, MU Tongpeng, et al. A review of stability analysis and control of renewable energy integration systems via converters[J]. *Power System and Clean Energy*, 2023, 39(12): 79-94.

[6] 朱建昆,高红均,贺帅佳,等.考虑VSC与光-储-充协同配置的交直流混合配电网规划[J].*智慧电力*,2023,51(11):7-14.
ZHU Jiankun, GAO Hongjun, HE Shuaijia, et al. AC-DC hybrid distribution network planning considering VSC and photovoltaic-storage-charging coordinated configuration[J]. *Smart Power*, 2023, 51(11): 7-14.

[7] 邓新昌.新能源发电并网变流器的建模与仿真研究[D].合肥:合肥工业大学,2019.
DENG Xinchang. Research on modeling and simulation of grid-connected converters in renewable energy generation[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.

[8] 魏巍.新能源发电系统并网变流器环节通用化建模研究[D].南京:东南大学,2015.
WEI Wei. Research on the general model of grid connected converter for new energy power generation systems[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.

[9] 杨子千,马锐,程时杰,等.电力电子化电力系统稳定的问题及挑战:以暂态稳定比较为例[J].*物理学报*,2020,69(8):103-116.
YANG Ziqian, MA Rui, CHENG Shijie, et al. Problems and challenges of power-electronic-based power system stability: a case study of transient stability comparison[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(8): 103-116.

[10] 程亮.跟网型变流器并网系统同步稳定性研究[D].济南:山东大学,2023.
CHENG Liang. Studies on synchronization stability of grid-connected system with grid-following converter[D]. Jinan: Shandong University, 2023.

- [11] 孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6183-6192.
SUN Huadong, XU Tao, GUO Qiang, et al. Analysis on black-out in Great Britain power grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to power grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183-6192.
- [12] ZHOU J Z, DING H, FAN S T, et al. Impact of short-circuit ratio and phase-locked-loop parameters on the small-signal behavior of a VSC-HVDC converter[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, 29(5): 2287-2296.
- [13] WANG X F, 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.
- [14] WANG X F, 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.
- [15] 伍双喜, 过亮, 刘洋, 等. 构网型风电机组的惯量阻尼特性分析[J]. 浙江电力, 2024, 43(7): 56-63.
WU Shuangxi, GUO Liang, LIU Yang, et al. Analysis of inertia damping characteristics of GFM wind turbines[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(7): 56-63.
- [16] WANG X F, HARNEFORS L, BLAABJERG F. Unified impedance model of grid-connected voltage-source converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(2): 1775-1787.
- [17] 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.
- [18] 郭佳俊, 陈俊儒, 刘雨珊, 等. 构网型新能源电网支撑性能测试评估[J]. 智慧电力, 2023, 51(12): 23-29.
GUO Jiajun, CHEN Junru, LIU Yushan, et al. Support performance test and evaluation of grid-forming renewable energy systems[J]. *Smart Power*, 2023, 51(12): 23-29.
- [19] 王盼宝, 王鹏, 李坤光, 等. 电网故障下构网型逆变器动态限流控制策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3829-3837.
WANG Panbao, WANG Peng, LI Shenguang, et al. Dynamic current-limiting control strategy of grid-forming inverter under grid faults[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3829-3837.
- [20] ROSSO R, WANG X F, 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.
- [21] SUN P, YAO J, ZHAO Y, et al. Stability assessment and damping optimization control of multiple grid-connected virtual synchronous generators[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2021, 36(4): 3555-3567.
- [22] 詹长江, 吴恒, 王雄飞, 等. 构网型变流器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2339-2359.
ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2339-2359.
- [23] HARNEFORS L, MAHAFUGUR RAHMAN F M, HINKKANEN M, et al. Reference-feedforward power-synchronization control[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(9): 8878-8881.
- [24] COELHO E A A, CORTIZO P C, GARCIA P F D. Small-signal stability for parallel-connected inverters in stand-alone AC supply systems[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2002, 38(2): 533-542.
- [25] 林涛, 林政阳, 李晨, 等. 基于 TCN 的跟网/构网混合型新能源场站并网系统小干扰稳定性快速评估[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(4): 169-177.
LIN Tao, LIN Zhengyang, LI Chen, et al. Small signal stability assessment of grid-connected system for grid-following/grid-forming hybrid new energy stations based on TCN[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 169-177.
- [26] QU Z S, PENG J C, YANG H, et al. Modeling and analysis of inner controls effects on damping and synchronizing torque components in VSG-controlled converter[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2021, 36(1): 488-499.
- [27] 曾德银, 姚骏, 张田, 等. 虚拟同步发电机多机并联系统的频率小信号稳定性分析研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2048-2061, 2385.
ZENG Deyin, YAO Jun, ZHANG Tian, et al. Research on frequency small-signal stability analysis of multi-parallel virtual synchronous generator-based system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2048-2061, 2385.
- [28] 但扬清, 黄莹, 韩连山, 等. 计及功率控制型构网变流器接入的交流系统暂态稳定性仿真研究[J]. 浙江电力, 2024, 43(6): 1-12.
DAN Yangqing, HUANG Ying, HAN Lianshan, et al. Simulation study on transient stability of AC systems considering the connected power-controlled grid-forming converters[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(6): 1-12.
- [29] CHEN S M, SUN Y, HAN H, et al. Active power oscillation suppression and dynamic performance improvement for multi-VSG grids based on consensus control via COI frequency[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, 147: 108796.
- [30] FU S Q, SUN Y, LI L, et al. Power oscillation suppression of multi-VSG grid via decentralized mutual damping control[J].

IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(10): 10202-10214.

- [31] LIU J, MIURA Y, BEVRANI H, et al. Enhanced virtual synchronous generator control for parallel inverters in micro-grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2268-2277.
- [32] SHUAI Z K, HUANG W, SHEN Z J, et al. Active power oscillation and suppression techniques between two parallel synchronverters during load fluctuations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 4127-4142.

作者简介:



陈永康

陈永康(2000),男,硕士在读,研究方向为新能源发电并网稳定性分析与控制(E-mail: 970304501@qq.com);

黄云辉(1986),男,博士,副教授,研究方向为电力电子化电力系统、新能源发电系统并网控制与稳定运行;

方正(1999),男,博士在读,研究方向为新能源发电并网稳定与控制。

Small signal modeling and stability analysis of multi-VSCs for grid-forming converters under low impedance grid

CHEN Yongkang, HUANG Yunhui, FANG Zheng, WANG Dong, TANG Jinrui, ZHOU Keliang
(School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430071, China)

Abstract: The grid-forming converter has voltage source characteristics, providing damping and frequency support to high-impedance weak grids, and demonstrates good stability. However, instability may occur under low impedance grids. This paper focuses on the small-signal modeling and stability analysis of multi-voltage source converters (VSCs) for grid-forming converters under low-impedance condition. Firstly, a small-signal model of multi-VSCs for grid-forming converters connected to the grid under low impedance is established, clarifying the system's dynamic characteristics and coupling mechanism. Secondly, through eigenvalue trajectory and participation factor analysis, the dominant oscillation modes and their impact on system stability under different grid strengths and different control parameters are discussed. Finally, MATLAB time-domain simulations are conducted to verify the accuracy of the modeling and stability analysis results. The research results show that the increase in grid strength, reduction in active power, decrease in the droop coefficient, and reduction in interconnection impedance all weaken the stability of multi-VSCs for grid-forming converters, with the power loop and voltage loop being the dominant control loops affecting system stability.

Keywords: grid-forming converter; low impedance grid; small-signal modeling; eigenvalue trajectory; dominant oscillation modes; stability analysis

(编辑 陆海霞)