

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240664

宽短路比工况下构网型逆变器功率自同步控制的稳定性分析

马俊鹏¹, 李磊², 迟程缤¹, 王顺亮², 刘天琪²

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 基于功率同步控制(power synchronization control, PSC)的构网型(grid-forming, GFM)电压源型逆变器(voltage source converter, VSC)通过模拟同步机功角特性以实现电网支撑, 但其在宽短路比(short-circuit ratio, SCR)运行工况下存在振荡风险。为分析构网型逆变器在宽短路比工况下的稳定情况, 首先建立了 PSC-VSC 小信号模型, 得到了有功、无功功率的传递函数, 并以此揭示了 GFM 逆变器在宽短路比工况下小干扰失稳机理。结果表明, PSC-VSC 在强电网下面临小信号失稳风险。进而提出基于功率自同步控制(power self-synchronization control, PSSC)的 VSC 控制策略, 通过限制有功功率传递函数的增益, 增强构网型逆变器强电网下的稳定性。然后分析了基于 PSSC 的 GFM 逆变器在电网故障下的稳定性。最后通过半实物实时仿真验证了所提分析方法的正确性和有效性。

关键词: 宽短路比; 构网型逆变器; 功率自同步; 稳定性分析; 半实物实时仿真

Stability analysis of power self-synchronization control of grid-forming converters in wide range of short-circuit ratio conditions

MA Junpeng¹, LI Lei², CHI Chengbin¹, WANG Shunliang², LIU Tianqi²

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China, 2. School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Grid forming (GFM) voltage source converters (VSC) based on the power synchronization control (PSC) are used to support the grid by emulating the power angle characteristics of synchronous machines. However, they face oscillation risks under wide range of short-circuit ratio (SCR) conditions. To analyze the stability of GFM converters under wide range SCR conditions, this paper establishes a small-signal PSC-VSC model, and the transfer functions of active and reactive power are derived. Based on this, the small-signal instability mechanism of GFM converters under wide range of SCR conditions is revealed. The results show that PSC-VSC faces small-signal instability risks in strong grid conditions. Subsequently, by limiting the gain of the active power transfer function, the power self-synchronization control (PSSC) based VSC control strategy is proposed to enhance the stability of GFM converters in strong grid conditions. Furthermore, the stability of PSSC-based GFM converters under grid faults is analyzed. Finally, the correctness and effectiveness of the proposed analysis method are verified through hardware-in-the-loop real-time simulation.

This work is supported by the Young Scientists Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 52207216).

Key words: wide short-circuit ratio; grid-forming converter; power self-synchronization; stability analysis; hardware-in-the-loop real-time simulation

0 引言

为加快能源绿色转型发展, 国家提出“碳达峰、碳中和”目标, 构建以新能源为主体的新型电力系

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目资助(52207216); 先进输电技术全国重点实验室开放基金项目资助

统成为我国能源电气领域的主旋律^[1-3]。高比例电力电子装备馈入电网是新型电力系统的重要特征。新能源并网系统缺乏同步发电机的实体转轴, 导致新型电力系统呈现低惯量、弱阻尼、低短路比的“三低”特性, 这将使电网的电压与频率稳定性缺乏相应的惯性支撑^[4-6], 从而导致电网系统抗干扰能力弱, 存在全面崩溃及大面积停电的风险^[7]。构网控

制技术下的变流设备可以在很大程度上避免这种情况的发生,以典型的构网型并网(grid-forming, GFM)逆变器为例,它具有新型电力系统“双高”电压支撑和主动惯性支撑的特点,可以替代同步机实现电网支撑^[8],并且可以在孤岛情况下带载运行,从而保持电力系统的稳定。

传统电压源型逆变器(voltage source converter, VSC)的并网控制方法为跟网型(grid-following, GFL)控制,其特点是需要利用锁相环(phase-locked loop, PLL)估计公共耦合点(point of common coupling, PCC)处电压的相位角进行同步^[9-10]。跟网型逆变器的稳定运行受制于电网的强弱,在弱电网工况下,受锁相环带宽影响,并网逆变器、锁相环和电网之间存在耦合,系统易失去同步,并由此引发稳定性问题^[11-12]。

GFM 逆变器的稳定性研究,需要关注不同电网强度和不同电网扰动形式^[13-15]。与 GFL 在强电网下极佳的稳定性不同, GFM 逆变器在弱电网下具有良好的表现,但在极弱电网下,系统失去稳定点,逆变器难以稳定^[16]。典型 GFM 控制方案可分为两种类型:一种是非惯性构网控制,包括功率同步控制和传统下垂控制,另一种是虚拟惯性控制,包括带有低通滤波器的下垂控制和虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制^[17-19]。文献[20]推导了静止坐标系中下垂控制 VSC 的阻抗模型,并根据基于阻抗的稳定性分析,得出下垂控制 VSC 在强电网下的稳定性问题更为突出的结论。文献[21]推导了下垂控制 VSC 的小信号模型,得到了极点图,验证了 VSC 的稳定性随着短路比(short-circuit ratio, SCR)的增加而降低,表明 GFM 逆变器在强电网工况下存在小扰动失稳风险。文献[22]推导了基于 VSG 的 VSC 小信号模型,通过该模型,推导并分析了 GFM 逆变器-电网耦合系统的极点分布,在强电网工况下,构网逆变器-电网耦合系统在虚轴附近存在一对共轭极点,导致系统不稳定。文献[23]通过特征值和基于阻抗的分析,设计了控制参数,提高了 VSC 在宽短路比工况下的鲁棒性。与传统同步发电机类似, GFM 逆变器大信号扰动下的稳定性取决于系统的功角动态特性^[24]。相比之下, GFM 逆变器随不同的控制方法具有很大的灵活性,因此具备更复杂的非线性动力学特性^[25]。如上所述,现有 GFM 控制下的逆变器在弱电网下运行具有良好的稳定性,但在强电网下面临小信号失稳风险,因此亟需一种实现全短路比工况下稳定运行的 GFM 控制。

针对以上不足,本文基于功率同步控制的构网型逆变器(PSC-VSC)小信号模型提出一种功率自同步控制策略,从物理层面为 VSC 在短路比趋向无穷

大的理想电网下的稳定运行提供了基础条件,实现了极强电网下的 GFM 逆变器稳定运行。同时分析了弱电网下所提控制策略的暂态同步稳定性,量化了所提构网控制方法在全短路比工况下的稳定能力。最后,通过半实物实时仿真验证了所提分析方法的正确性和有效性。

1 功率同步控制

1.1 PSC-VSC 的小信号模型

PSC-VSC 连接至交流电网拓扑结构如图 1 所示。图中: L_g 为线路电感; r_g 为线路电阻; e_g 为交流电网电压; u_{abc} 、 i_{abc} 分别为并网逆变器在 PCC 处的输出电压、电流; V_{dc} 为直流母线电压。值得注意的是,滤波电容 C_f 对于消除 PCC 处的电压谐波至关重要,特别是在弱电网工况下,可以保证 PCC 处的采样电压为平均值。

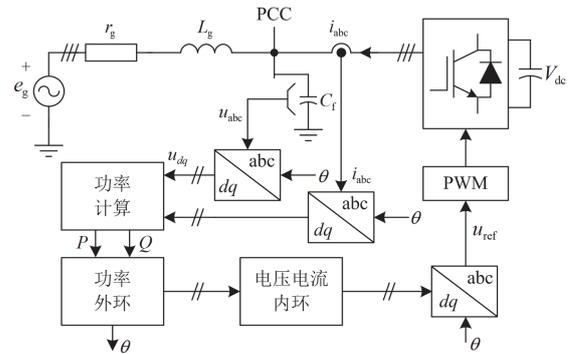


图 1 PSC-VSC 拓扑结构及控制图

Fig. 1 Topology and control diagram of PSC-VSC

在 dq 坐标系下,功率同步控制器结构如图 2 所示,分为功率控制环和电压电流环。在外控制环中,有功功率环通过调节输出电压相位 θ ,使 VSC 输出有功功率 P 跟踪有功功率参考值 P_{ref} ;无功功率环通过调节输出电压幅值 U 使 VSC 输出无功功率 Q 跟踪无功功率参考值 Q_{ref} 。内控制环包括电压控制回路和电流控制回路,调节 VSC 输出电压幅值 u_{odqref} 跟踪参考电网电压幅值 u_{dqref} 。

为了获得 PSC-VSC 的小信号模型,需要对主电路的功率传输进行分析。根据瞬时功率的定义,输出复功率 $S(t)$ 可以表示为

$$S(t) = u_{dq}(t) \cdot i_{dq}^*(t) \quad (1)$$

式中: u_{dq} 和 i_{dq} 分别为 VSC 在 dq 坐标系下的输出电压矢量和输出电流矢量;上标“*”为共轭运算符。

首先对电压矢量 u_{dq} 进行小信号扰动,如式(2)所示。

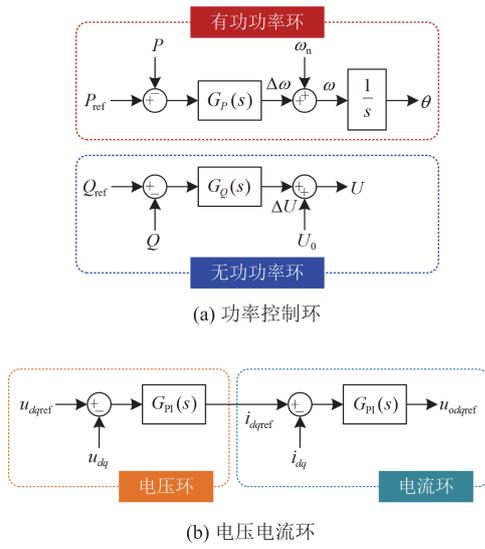


图 2 功率同步控制器结构图

Fig. 2 Structure of power synchronization controller

$$u_{dq}(t) = (U_0 + \Delta U(t))e^{j(\theta_0 + \Delta\theta(t))} \approx \underbrace{U_0 e^{j\theta_0}}_{U_{dq0}} + \underbrace{\Delta U(t)e^{j\theta_0} + jU_0 e^{j\theta_0} \Delta\theta(t)}_{\Delta U_{dq}(t)} \quad (2)$$

式中: U_0 和 θ_0 分别为 VSC 输出电压的稳态幅值和稳态相位; ΔU 和 $\Delta\theta$ 分别为 VSC 输出电压幅值和相位的小信号扰动量; U_{dq0} 为 u_{dq} 的稳态幅值; ΔU_{dq} 为 ΔU 在 dq 坐标系下的表达式。

同理, 进行小信号扰动后的输出复功率为

$$S_0 + \Delta S(t) = (U_{dq0} + \Delta u_{dq}(t)) \cdot (I_{dq0} + \Delta i_{dq}(t))^* \Rightarrow \Delta S(t) = U_{dq0} \Delta i_{dq}^*(t) + I_{dq0}^* \Delta u_{dq}(t) \quad (3)$$

式中: S_0 为输出复功率的稳态值; I_{dq0} 为 i_{dq} 的稳态幅值; ΔS 为输出复功率的小信号扰动量; Δu_{dq} 和 Δi_{dq} 分别为 u_{dq} 和 i_{dq} 的小信号扰动量。

利用 Laplace 变换, 将上述时域模型转换为频域模型, 即

$$\Delta S(s) = U_{dq0} \Delta i_{dq}^*(s) + I_{dq0}^* \Delta u_{dq}(s) \quad (4)$$

$$\begin{cases} U_{dq0} = U_0 e^{j\theta_0} \\ \Delta U_{dq}(s) = \Delta U(s) e^{j\theta_0} + jU_0 e^{j\theta_0} \Delta\theta(s) \end{cases} \quad (5)$$

同样, I_{dq0} 和 Δi_{dq} 可表示为

$$\begin{cases} I_{dq0} = \frac{U_{dq0} - E_{dq0}}{Z_{dq0}} \\ \Delta i_{dq}(s) = \frac{\Delta u_{dq}(s)}{Z_{dq}(s)} \end{cases} \quad (6)$$

式中: 电网阻抗 $Z_{dq}(s) = sL_g + r_g + j\omega_n L_g$, 额定角频率 $\omega_n = 50 \times 2\pi \text{ rad/s}$; 稳态电网阻抗 $Z_{dq0} = Z_{dq}(s)|_{s=0} =$

$r_g + j\omega_n L_g$; 稳态电网电压 $E_{dq0} = E_0$, E_0 为电网电压稳态幅值。

在高功率高压工况下, r_g 可以忽略。将式(5)和式(6)代入式(4), 可得到 VSC 复功率的小信号模型, 即 $\Delta S(s) = \Delta P(s) + \Delta Q(s) =$

$$\begin{aligned} & \underbrace{\left(\frac{U_0 \omega_n L_g}{(sL_g)^2 + (\omega_n L_g)^2} - \frac{U_0 - E_0 \cos \theta_0}{\omega_n L_g} \right)}_{G_{\Delta P}(s)} U_0 \Delta\theta(s) + \\ & \underbrace{\left(\frac{U_0 s L_g}{(sL_g)^2 + (\omega_n L_g)^2} + \frac{E_0 \sin \theta_0}{\omega_n L_g} \right)}_{G_{\Delta P}(s)} \Delta U(s) + \\ & \underbrace{j \left(\frac{E_0 \sin \theta_0}{\omega_n L_g} - \frac{U_0 s L_g}{(sL_g)^2 + (\omega_n L_g)^2} \right)}_{G_{\Delta Q}(s)} U_0 \Delta\theta(s) + \\ & \underbrace{j \left(\frac{U_0 \omega_n L_g}{(sL_g)^2 + (\omega_n L_g)^2} + \frac{U_0 - E_0 \cos \theta_0}{\omega_n L_g} \right)}_{G_{\Delta Q}(s)} \Delta U(s) \end{aligned} \quad (7)$$

式中, ΔP 和 ΔQ 分别为 VSC 输出有功和无功功率的小信号扰动量。

结合式(7)并根据图 2(a), 可得到 PSC-VSC 的小信号模型, 如图 3 所示。

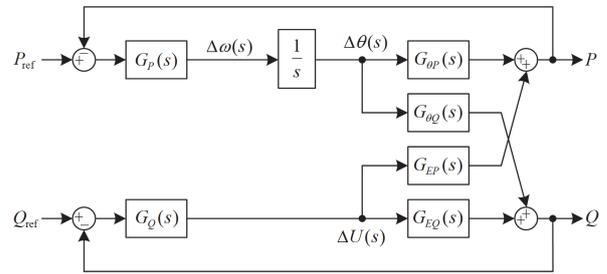


图 3 PSC-VSC 的小信号模型

Fig. 3 Small-signal model of PSC-VSC

1.2 短路比对构网型逆变器小干扰稳定性影响

交流电网的强度可以用短路比 S_{SCR} 来表示, 其表达式为

$$S_{SCR} = \frac{P_{SC}}{P_n} = \frac{U_0^2 / (\omega_n L_g)}{P_n} \quad (8)$$

式中: P_n 为 VSC 的额定有功功率; P_{SC} 为 PCC 处的短路容量。

在稳态下, VSC 的输出有功功率可表示为

$$P = \frac{EU}{\omega_n L_g} \sin \delta \quad (9)$$

式中: E 为电网电压幅值; U 为 VSC 输出电压幅值; δ 为 VSC 输出电压与电网电压的相角差, 即功角。

并网系统稳定运行需存在稳态工作点, 文献[26]给出了构网型逆变器的物理功率传输极限约束, 如式(10)所示。

$$P = EU_{SCR} \sin \delta \leq EU_{SCR} = P_{\max} \quad (10)$$

对式(10)作定性分析, 构网型逆变器临界最低短路比 $S_{SCR\min}$ 可以表示为

$$S_{SCR\min} \approx \frac{1}{\omega_n L_g} \geq \frac{P}{EU} \quad (11)$$

用式(9)替换式(8)中的 P_n , 稳态功角 δ_0 可以表示为

$$\delta_0 = \arcsin \frac{P_0 \omega_n L_g}{E_0 U_0} = \arcsin \left(\frac{P_0 U_0}{P_n E_0 S_{SCR}} \right) \quad (12)$$

式中, P_0 为稳态输出功率。

因此, 在临界最低短路比的极端弱电网工况下, 当稳态输出功率 P_0 接近其额定值 P_n 时, 稳态功角非常接近稳定运行极限 0.5π rad。

将 $s=0$ 代入式(7), 可知 VSC 有功功率中 $G_{\theta P}(s)$ 的稳态增益 $G_{\theta P}(0)$ 为

$$G_{\theta P}(0) = \frac{E_0 U_0 \cos \delta_0}{\omega_n L_g} \quad (13)$$

当极弱电网工况下 ($S_{SCR} = 1$), $G_{\theta P}(s)$ 的稳态增益接近于 0。此时, 由式(12)可知, E_0 的小扰动降低会使稳态功角 δ_0 漂移超过 90° , 这将使有功功率控制回路从负反馈控制转变为正反馈控制, 导致同步失稳。

从图 2 中可以看出, 构网型逆变器的小信号模型有功功率回路和无功功率回路相互耦合, 且其中 $G_{\theta P}(s)$ 、 $G_{EP}(s)$ 、 $G_{\theta Q}(s)$ 和 $G_{EQ}(s)$ 均包含一对共轭极点, 可以表示为

$$s_{1,2} = -r_g / L_g + j\omega_n \quad (14)$$

当 S_{SCR} 逐渐增大时, 系统阻尼比减小, 并且这对共轭极点会更接近虚轴。构网型逆变器受端接入强电网 ($S_{SCR} = \infty$) 时, $G_{\theta P}(s)$ 的稳态增益接近于无穷大, 控制回路中微小的扰动将进入反馈回路被放大。因此, 振荡可能在额定角频率 ω_n 附近被触发, 即同步频率谐振(synchronous frequency resonance, SFR)。根据表 1 的仿真参数可以绘制出 $G_{\theta P}(s)$ 、 $G_{EP}(s)$ 、 $G_{\theta Q}(s)$ 和 $G_{EQ}(s)$ 的伯德图, 当 $r_g / L_g = 1\%$ 时, 功率控制环各传递函数的频率响应如图 4 所示。可以看出, 系统在 50 Hz 存在共振峰和 -180° 相位跳变, 存在小扰动失稳风险。

2 功率自同步控制策略

2.1 控制结构

为解决 PSC-VSC 在宽短路比工况下存在的小

表 1 仿真参数

参数名称	数值
电网电压幅值 E	220 V
逆变器输出电压幅值 U	220 V
额定频率 f	50 Hz
稳态功角 δ_0	0 rad
线路电感 L_g	1 mH
线路电阻 r_g	0.001 Ω

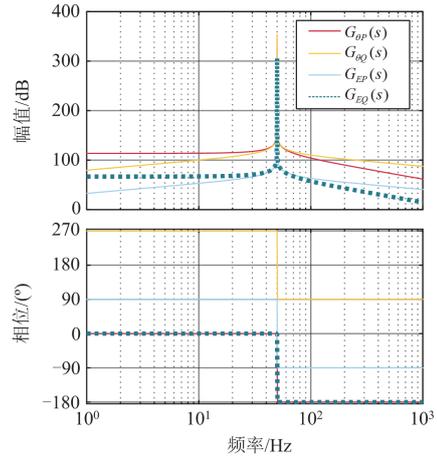


图 4 功率控制环的频率响应

Fig. 4 Frequency response of power control loop

扰动引起的振荡失稳问题, 本文基于功率自同步控制(power self-synchronization control, PSSC)思想, 提出了宽短路比下逆变器致稳控制方法, 如图 5 所示, 该策略能够使 VSC 在短路比从 1 到无穷大的电网工况下运行。

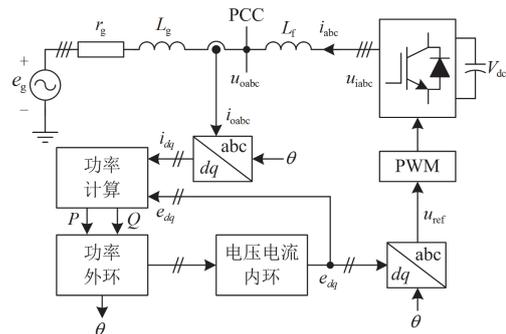


图 5 PSSC-VSC 拓扑结构及控制图

Fig. 5 Topology and control diagram of PSSC-VSC

PSSC-VSC 的控制器结构如图 6 所示。所提出的 PSSC 策略无须电网电压检测即可实现与电网的自同步。原理在于功率计算采用电流环积分器的输出(即稳态时电流内环的输出) e_{dq} , VSC 接入交流电网

无须采样 PCC 处电压(即稳态下的参考电压 $u_{dqref} = u_{odqref} = e_{dq}$), 输入端的高频分量被有效过滤。在宽短路比工况下, e_{dq} 只包含直流分量, 可用于计算功率和作为电压环的反馈。

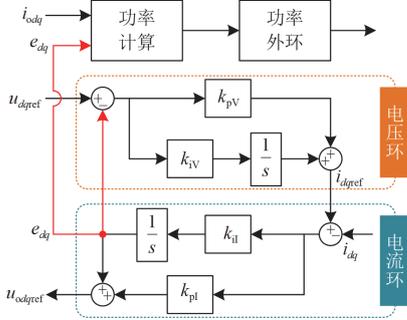


图 6 PSSC-VSC 控制器结构图

Fig. 6 Control structure of PSSC-VSC

2.2 强电网下致稳控制机理分析

在传统的 PSC-VSC 中, 需要检测 PCC 处的电压电流作为控制输入, PCC 电压受控于构网逆变器控制策略。因此, 线路阻抗为电网电压与逆变器 PCC 电压、功率交互的载体。相比而言, 所提出的 PSSC-VSC 无须检测 PCC 电压, 以逆变器桥臂输出电压为控制目标, 实现逆变器与电网的功率交互, 无需电压传感器并省去滤波电容 C_f 。

由 1.2 节可知, 当 PSC-VSC 接入强电网时, 功率环中的稳态增益都接近无穷大, 易导致系统小干扰失稳。由于无须采样线路上的电压, 原线路电感 L_g 被滤波电感 L_f 与线路电感 L_g 串联等效电感所替代, 当系统处于稳态工作点时, 假设不存在电压幅值的扰动, 则根据式(13)可得到线性化的 PSSC-VSC 有功功率小信号模型, 如式(15)所示。

$$\Delta P(s) = \frac{E_0 U_0 \cos \theta_0}{\omega_n (L_g + L_f)} \Delta \theta(s) \quad (15)$$

当并网逆变器接入强电网工况下 ($S_{SCR} = \infty$), 即式(15)中的 $L_g = 0$ 时, 会导致其稳态增益激增, 但 L_f 的存在, 解决了传统 PSC-VSC 在强电网工况下的增益激增问题。

如图 7 所示, PSSC-VSC 通过滤波电感和线路电感进行功率交互。因此, 合理设计图 3 控制器 $G_p(s)$ 中的控制参数, 可改善功率控制环的频率响应, 从而使整个系统在强电网工况下小干扰稳定。

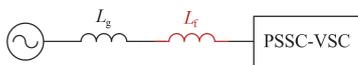


图 7 功率交互示意图

Fig. 7 Power interaction schematic

虽然强电网下 PSSC-VSC 的稳定性得到了提升, 但弱电网下, 构网控制出现的暂态同步稳定问题仍需深入研究, 以量化 PSSC-VSC 在宽短路比工况下的稳定性。

3 功率自同步控制暂态稳定分析

3.1 功率自同步控制暂态数学模型

以电网电压为参考, VSC 并网系统的矢量图如图 8 所示。

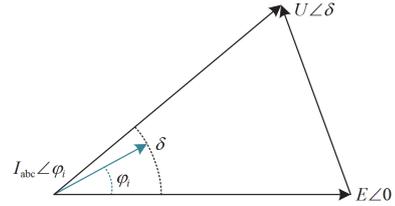


图 8 VSC 并网系统的矢量图

Fig. 8 Equivalent vector diagram of VSC

根据图 2(a)所示, PSSC-VSC 的功率同步环通过调节 VSC 输出的有功功率和相角实现与电网同步, 并网逆变器输出电压相角相位可以表示为

$$\theta = k_{\text{PSSC}} \int (P_{\text{ref}} - P) dt + \omega_n t \quad (16)$$

式中, k_{PSSC} 为 PSSC-VSC 的功率同步环增益。

VSC 输出的有功和无功功率可表示为

$$\begin{cases} P = \frac{1.5UE}{\omega_n L_g} \sin \delta \\ Q = \frac{1.5U^2}{\omega_n L_g} - \frac{1.5UE}{\omega_n L_g} \cos \delta \end{cases} \quad (17)$$

实际中, 控制器常常采用式(18)计算 VSC 输出的瞬时功率 P_e 、 Q_e 。由于 PSC 同步环的带宽远小于电网频率, 瞬时功率中的脉动量被环路大大衰减。因此, 瞬时功率可近似认为等于式(17), 即

$$\begin{cases} P_e = 1.5(e_d i_d + e_q i_q) \\ Q_e = 1.5(e_q i_d - e_d i_q) \end{cases} \quad (18)$$

式中, e_d 、 e_q 和 i_d 、 i_q 分别为 VSC 在 dq 坐标系下的输出电压和电流分量。

电压及电流内环的带宽往往是功率外环的 10 倍以上, 暂态同步稳定分析时, 通常忽略内环的动态, 将 VSC 等效为幅值和相位受控于功率外环的电压源, VSC 输出电压幅值 U 等于额定电压幅值 U_n 。将电网电压的初始相角记作: $\theta_g = \omega_n t + \varphi_g$, φ_g 为电网电压初相位。因此, 功角 δ 可以记作

$$\delta = \theta - \theta_g = k_{\text{PSSC}} \int (P_{\text{ref}} - P) dt - \varphi_g \quad (19)$$

将式(17)代入式(19)中, 得到 PSSC 的一阶动态

同步方程, 如式(20)所示。

$$\dot{\delta} = k_{\text{PSSC}} \left(P_{\text{ref}} - \frac{1.5U_n E}{X_g} \sin \delta \right) \quad (20)$$

综上所述, PSSC-VSC 通过调整变流器输出的电压相位来增大或减小传输功率, 动态同步过程与同步机间的同步过程十分相似。

3.2 PSSC-VSC 暂态稳定性的相图分析

对于式(20)所示的 PSSC-VSC 一阶动态同步方程, 可采用相图对其特性进行分析。相图分析是一种通过图解的形式直观反映系统稳定性的分析方法。图 9 为不同电网电压暂降深度 E_{sag} 下的一阶同步环相图分析曲线。通过功角 δ 与功角变化率 $\dot{\delta}$ 之间的关系, 式(20)描述了任意一点 δ 的变化趋势: $\dot{\delta}$ 大于 0 时, δ 增大; $\dot{\delta}$ 小于 0 时, δ 减小。功角变化率 $\dot{\delta}$ 等于 0 的点代表系统的平衡点, 结合图 9 可知, 功角受到稳定平衡点(stable equilibrium point, SEP)的吸引和不稳定平衡点(unstable equilibrium point, UEP)的排斥。

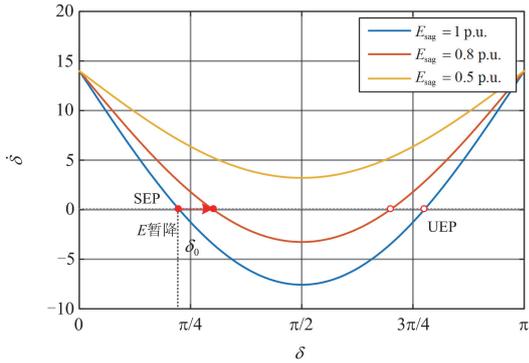
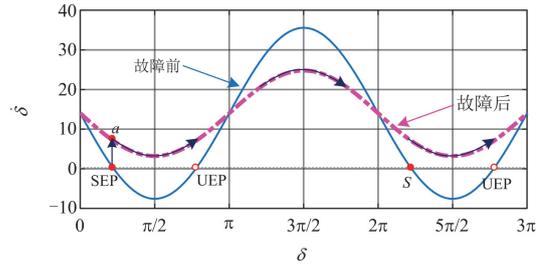


图 9 一阶同步环相图分析曲线

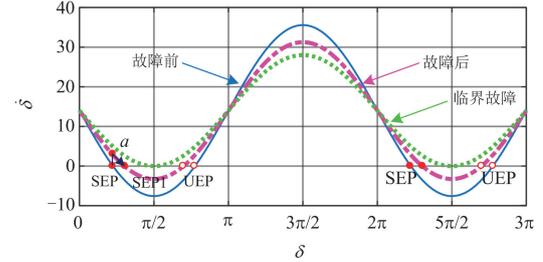
Fig. 9 Phase diagram analysis curves for the first-order synchronous loop

电网电压暂降故障后, 由于积分环节的存在, 系统功角并不会发生突变, 而是对应的相图曲线发生改变, 额定运行点由原相图切换至故障相图。系统故障后无稳定平衡点的相图曲线如图 10(a)所示, 故障发生后, 功角运行点由稳定平衡点 SEP 切换到 a 点, 此时系统功角变化率 $\dot{\delta}$ 始终大于 0, 因此, 功角将会单调增加至正无穷, 系统处于暂态失稳。系统故障后有稳定平衡点的相图曲线如图 10(b)所示, 功角运行点同样切换到 a 点, 但由于故障相图存在稳定平衡点 SEP1, 因此, 功角在增加至某一值后将不再变化, 系统在暂态故障后稳定。

不难发现, 系统存在一个临界故障点(即稳定平衡点 SEP 与不稳定平衡点 UEP 重合), 其电网电压暂降深度满足式(21)。



(a) 故障后无稳定平衡点



(b) 故障后有稳定平衡点

图 10 电网电压故障前后 PSSC-VSC 的相图分析曲线

Fig. 10 Phase diagram analysis curves of PSSC-VSC before and after grid voltage faults

$$E_{\text{sag}} = \frac{P_{\text{ref}} X_g}{1.5U} \quad (21)$$

根据上述分析可知, 与典型 PSC-VSC 类似, PSSC-VSC 存在暂态同步失稳风险, 可以通过改变有功功率参考值 P_{ref} , 实现暂态同步稳定性的提升^[27]。

4 半实物验证与分析

为进一步验证所提算法的正确性, 本文采用数字信号处理器 TMS320F28379 作为控制器, PLECS RT Box 1 作为半实物实时仿真平台, 构成硬件在环测试系统(hardware in the loop, HIL)进行验证, 如图 11 所示。构网型逆变器及电网系统参数如表 2 所

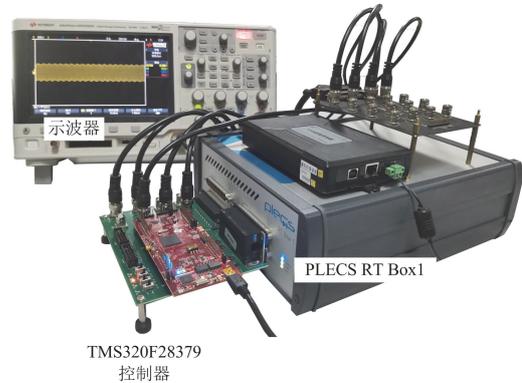


图 11 硬件在环测试系统

Fig. 11 Hardware-in-the-loop test system

表 2 实验参数

Table 2 Experimental parameters

参数名称	数值
电网电压幅值 E	220 V(1 p.u.)
逆变器输出电压幅值 U	220 V(1 p.u.)
滤波电感 L_f	1 mH
滤波电容 C_f	60 μ F
额定频率 f	50 Hz
线路电感 L_g	1 mH($S_{SCR} = \infty$)/10 mH($S_{SCR} = 1$)
功率控制环系数 k	3×10^{-4}

示。为实现极弱电网的工况，线路参数的设计满足 $S_{SCR} = 1$ 。

4.1 PSC-VSC 和 PSSC-VSC 小干扰稳定验证分析

相比 PSC-VSC, PSSC-VSC 通过限制有功功率传递函数的稳态增益来增强构网型逆变器在强电网下的稳定性。本节通过对比不同短路比工况下 PSC-VSC 和 PSSC-VSC 的 PCC 处三相电压和电流的运行状况, 验证 PSSC-VSC 在强电网工况下良好的小干扰稳定性。

由图 12(a)和图 13(a)可以看出, 在弱电网工况下, PSC-VSC 和 PSSC-VSC 并网之后的运行状态均可以保持良好的稳定性。然而, 如图 12(b)和图 13(b)所示, L_g 下降到 1 mH 时, PSC-VSC 失去了稳定性, 而 PSSC-VSC 依然能够稳定并网运行。因此, 半实物实验验证了理论分析的有效性。

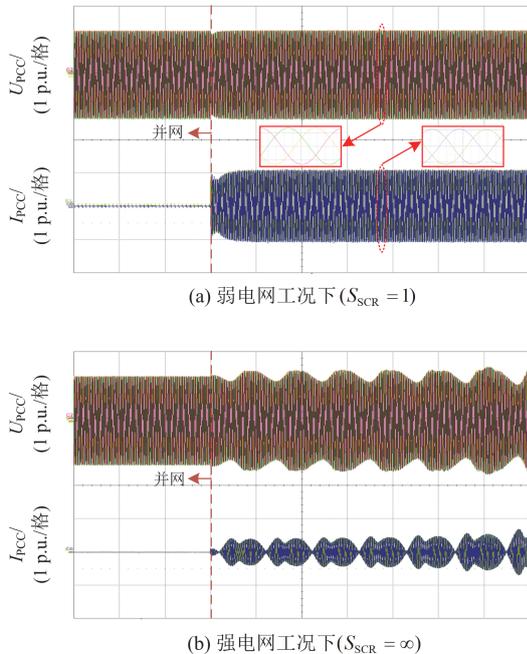


图 12 PSC-VSC 在不同短路比工况下的 PCC 处电压电流
Fig. 12 PCC voltage and current of PSC-VSC in different SCR conditions

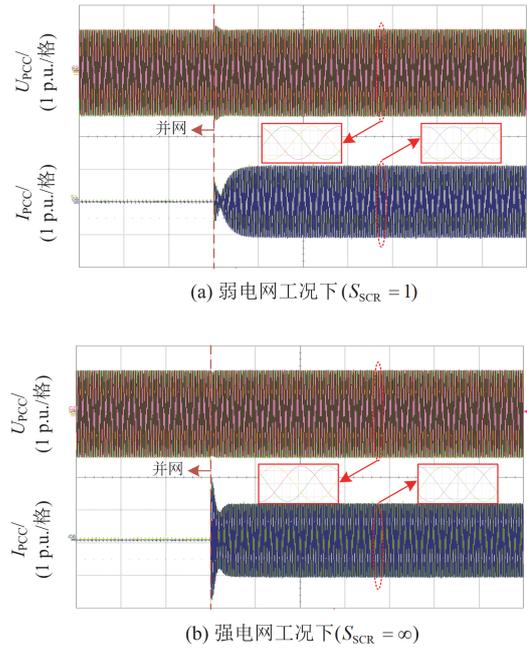


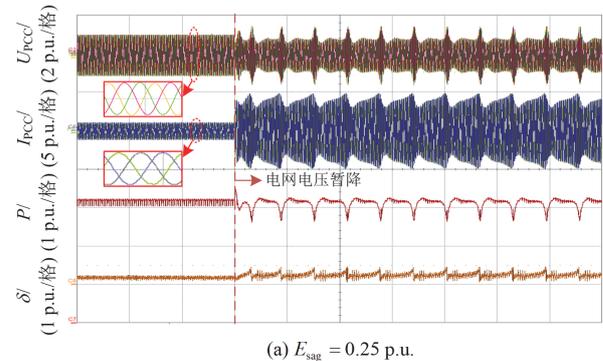
图 13 PSSC-VSC 在不同短路比工况下的 PCC 处电压电流
Fig. 13 PCC voltage and currents of PSSC-VSC in different SCR conditions

4.2 PSSC-VSC 暂态稳定性验证

由第 3 节可知, 当发生电网电压暂降时, PSSC-VSC 运行时存在暂态失稳风险。通过式(21)可以判断 PSSC-VSC 在不同电压暂降深度下是否存在稳定平衡点。将表 2 的实验参数代入式(21), 可获知理论临界暂降深度为 0.3 p.u.。图 14(a)和图 14(b)分别为电网电压从额定值暂降至 0.25 p.u.和 0.35 p.u.时 PSSC-VSC 的输出波形。

由图 14 可以看出, 当电网电压暂降至临界暂降深度以下时, 系统功角发生畸变, 导致逆变器在 PCC 处的电压电流发散失稳, 整个功率传输产生剧烈波动, 引起电网的不稳定。而当电网电压暂降至临界暂降深度之上时, 系统功角无周期振荡现象, 逆变器电压电流稳定输出, 功率传输保持稳定。

综上所述, 通过计算 PSSC-VSC 所匹配的理论临界暂降深度, 当电网发生暂态故障后, 可以为



(a) $E_{\text{sag}} = 0.25$ p.u.

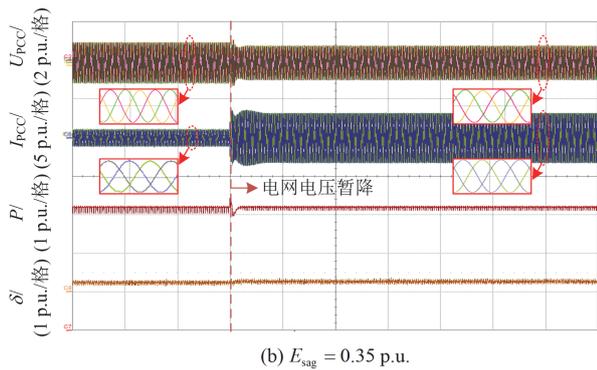


图 14 PSSC-VSC 不同电压暂降深度下的输出波形

Fig. 14 Output waveforms of PSSC-VSC at different transient voltage sags

PSSC-VSC 的稳定运行做合理规划, 有效地减少电网波动。

5 结论

为了增强构网型逆变器在宽短路比工况下的稳定性, 对构网型逆变器分别进行了小信号建模和暂态建模, 通过理论分析和实验表明:

1) PSSC-VSC 具有良好的小扰动稳定性, 其本质是通过限制有功功率传递函数的稳态增益, 增强构网型逆变器强电网下的稳定性。

2) 在宽短路比工况下, PSSC-VSC 可在无电网电压传感器和滤波电容的情况下正常运行。

3) 与 PSC-VSC 类似, PSSC-VSC 在电网暂态故障中同样存在失稳风险, 可以通过相图分析法分析其临界电网电压暂降深度, 从而判断 PSSC-VSC 在不同电网暂降深度下的运行状态。

参考文献

- [1] 习近平. 继往开来, 开启全球应对气候变化新征程——在气候雄心峰会上的讲话[N]. 人民日报, 2020-12-13(001).
- [2] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[N]. 人民日报, 2020-09-23(002).
- [3] 刘飞, 车琰璞, 田旭, 等. 新型电力系统下的抽水蓄能电站成本疏导机制: 综述与展望[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(7): 757-768.
LIU Fei, CHE Yanying, TIAN Xu, et al. Cost sharing mechanisms of pumped storage stations in the new-type power system: review and prospect[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023, 57(7): 757-768.
- [4] 李康, 黄萌, 查晓明, 等. 高压直流输电系统可靠性分析方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 174-187.
LI Kang, HUANG Meng, ZHA Xiaoming, et al. An overview of reliability analysis methods for an HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 174-187.
- [5] 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.
- [6] 张健铭, 毕天姝, 刘辉, 等. 孤网运行与频率稳定研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 149-154.
ZHANG Jianming, BI Tianshu, LIU Hui, et al. Review of frequency stability for islanded power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 149-154.
- [7] 严道波, 文劲宇, 杜治, 等. 2021 年得州大停电事故分析及其对电网规划管理的启示[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 121-128.
YAN Daobo, WEN Jinyu, DU Zhi, et al. Analysis of Texas blackout in 2021 and its enlightenment to power system planning management[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 121-128.
- [8] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [9] RODRIGUEZ P, POU J, J. BERGAS J, et al. Decoupled double synchronous reference frame PLL for power converters control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(2): 584-592.
- [10] 刘人志, 陈卓, 唐文博, 等. 弱电网下计及锁相环影响的 LCL 型并网逆变器控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(5): 178-187.
LIU Renzhi, CHEN Zhuo, TANG Wenbo, et al. Control strategy of an LCL type grid-connected inverter with the influence of a phase-locked loop under a weak power grid[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(5): 178-187.
- [11] 陈俊儒, 李冠群, 刘牧阳, 等. 电网阻抗比对跟网变换器同步稳定性的影响机理[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2331-2339.
CHEN Junru, LI Guanqun, LIU Muyang, et al. Influence mechanism of R/X ratio on synchronization stability of grid-following converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2331-2339.
- [12] 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): 1-17.
- [13] WANG Xiongfei, TAUL M G, WU Heng, et al. Grid-synchronization stability of converter-based resources—an overview[J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2020, 1: 115-134.
- [14] 李明飞, 吴在军, 全相军, 等. 计及阻尼特性的构网型并网逆变器暂态同步稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(15): 198-207.
LI Mingfei, WU Zaijun, QUAN Xiangjun, et al. Transient synchronization stability analysis of grid-forming grid-connected inverter considering damping characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15): 198-207.
- [15] 阮亮, 王杨, 肖先勇, 等. 跟网型和构网型变流器动态交互特性分析[J]. 智慧电力, 2024, 52(7): 103-110.
RUAN Liang, WANG Yang, XIAO Xianyong, et al. Dynamic interaction control characteristic analysis of grid-following and grid-forming inverters[J]. Smart Power, 2024, 52(7): 103-110.
- [16] WANG Xiongfei, HARNEFORS L, BLAABJERG F, et al. Unified impedance model of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 1775-1787.
- [17] 曹炜, 钦焕乘, 陆建忠, 等. 新型电力系统下虚拟同步机的定位和应用前景展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 190-207.
CAO Wei, QIN Huancheng, LU Jianzhong, et al. Orientation and application prospect of virtual synchronous generator in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 190-207.
- [18] 徐耀, 朱玲, 吕振宇, 等. 虚拟同步机孤岛并联系统暂态同步稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 1-11.
XU Yao, ZHU Ling, LÜ Zhenyu, et al. Transient synchronization stability analysis of a virtual synchronous machine isolated island parallel system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 1-11.
- [19] PAN Donghua, WANG Xiongfei, LIU Fangcheng, 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.
- [20] LIAO Yicheng, WANG Xiongfei, LIU Fangcheng, et al. Sub-synchronous control interaction in grid-forming VSCs with droop control[C] // 2019 4th IEEE Workshop on the Electronic Grid (eGRID), November 11-14, 2019, Xiamen, China: 1-6.
- [21] DENIS G, PREVOST T, PANCIATICI P, et al. Improving robustness against grid stiffness, with internal control of an AC voltage-controlled VSC[C] // 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), July 17-21, 2016, Boston, MA, USA: 1-5.
- [22] LI Xin, HU Yaowei, SHAO Yuting, et al. Mechanism analysis and suppression strategies of power oscillation for virtual synchronous generator[C] // IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 29-November 1, 2017, Beijing, China: 4955-4960.
- [23] WANG Peng, MA Junpeng, ZHANG Rui, et al. Power self-synchronization control of grid-forming voltage-source converters against a wide range of short-circuit ratio[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(12): 15419-15432.
- [24] 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.
- [25] 高子鹏, 肖国春, 田圆媛, 等. 考虑频率耦合的并网逆变器不同域控制的稳定性比较[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 22-32.
GAO Zipeng, XIAO Guochun, TIAN Yuanyuan, et al. Stability comparison of grid-connected inverters controlled in different domains considering frequency coupling[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 22-32.
- [26] 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.
- [27] 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. Orthogonal power synchronization control for grid-connected inverters under weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(23): 8475-8486.

收稿日期: 2024-05-29; 修回日期: 2024-08-26

作者简介:

马俊鹏(1990—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为并网变流器建模及控制、高压直流输电系统建模及分析; E-mail: junpeng_ma@163.com

李磊(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为并网变流器建模及稳定性分析。E-mail: lilei1666@stu.scu.edu.cn

(编辑 周金梅)