

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2025.1.84

中图分类号: TM46

文献标志码: A

多场景下锁相环同步 VSC 暂态失稳 边界研究

陈 征¹(中国电源学会学生会员), 胡鹏飞¹, 杨再欣², 于彦雪¹, 江崇熙³
(1.浙江大学电气工程学院, 杭州 310027; 2.内蒙古电力科学研究院, 呼和浩特 010020;
3.国网浙江省电力有限公司杭州供电公司, 杭州 310001)

摘要:针对弱网状态下基于锁相环 PLL(phase locked loop)电压源换流器 VSC(voltage source converter)的暂态失稳问题, 综合考虑电网线路阻抗、VSC 无功注入、PLL 滤波的影响, 并针对电网电压跌落、频率波动、三相不对称故障等多种故障场景, 基于临界失稳电压对 VSC 的暂态失稳边界进行全面研究。通过分析不同运行场景下 VSC 并网向量图, 建立多场景下 VSC 并网系统电网电压与线路阻抗及其阻抗角、VSC 运行功率及其功率因数、PLL 锁相误差和电网频率等因素之间的数学模型, 进而基于临界失稳电压指明 VSC 的暂态失稳边界。实验结果表明: 线路电阻和无功注入均会直接降低临界失稳电压, 提高系统的稳定性; 网侧频率增加或降低会直接导致锁相环产生相位滞后或超前、线路电抗增大或降低, 间接影响临界失稳电压, 进而影响 VSC 的暂态稳定性; 锁相环前级滤波器可能导致锁相结果产生误差, 其相位滞后或超前会分别降低或提高系统的临界失稳电压。

关键词: 电压源变流器; 暂态稳定性; 多场景; 锁相环

Transient Instability Boundary of PLL-synchronous VSC in Multiple Scenarios

CHEN Zheng¹, Student Member, CPSS, HU Pengfei¹, YANG Zaixin², YU Yanxue¹, JIANG Chongxi³
(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Inner Mongolia Electric Power Research Institute, Hohhot 010020, China; 3. Hangzhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310001, China)

Abstract: Aimed at the transient instability of a voltage source converter (VSC) based on phase locked loop (PLL) under weak network conditions and considering the influences of power grid line impedance, VSC reactive power injection and PLL filtering, the transient instability boundary of VSC is comprehensively studied based on the critical voltage in a variety of fault scenarios such as grid voltage sag, frequency fluctuation and three-phase asymmetric fault. Through the analysis of the VSC grid-connected vector diagram in different operation scenarios, the mathematical models of relationships between the grid voltage of VSC grid-connected system and factors (e.g., line impedance and impedance angle, VSC operation power and its power factor, PLL phase-locked error, and grid frequency) in multiple scenarios are established. Then, the transient instability boundary of VSC is indicated based on the critical voltage.

收稿日期: 2022-06-11; 修回日期: 2022-08-02, 2022-08-12;
录用日期: 2022-09-27; 网络首发日期: 2022-12-02
基金项目: 内蒙古自治区科技重大专项资助项目(2021ZD0026);
浙江省自然科学基金资助项目(LQ21E070004); 国家自然科学基金
基金资助项目(52007167)

This work is supported by Inner Mongolia Autonomous Region Major Science and Technology Project under the grant 2021 ZD0026; Natural Science Foundation of Zhejiang Province under the grant LQ21E070004; National Natural Science Foundation of China under the grant 52007167

Results show that both the line resistance and reactive power injection can directly reduce the critical voltage and improve the stability of the system. The increase or decrease in grid-side frequency will directly lead to the phase lag or lead of PLL and an increase or decrease in line reactance, thus indirectly affecting the critical voltage and further affecting the transient stability of VSC. The PLL pre-filter may cause errors in the phase-locked result, and its phase lag or lead will reduce or increase the critical instability voltage of the system, respectively.

Keywords: Voltage source converter (VSC); transient stability; multiple scenarios; phase locked loop (PLL)

实现“碳达峰”“碳中和”是一场广泛而深刻的经济社会变革,以风电、太阳能发电为主体的新能源发电技术是实现“双碳”目标的重要抓手。2021 年底,新型储能累计装机容量超过 400 万 kW,“新能源+储能”、常规火电配置储能、海上风电^[1]等新型应用场景不断涌现。电压源换流器 VSC (voltage source converter)因其控制结构简单,被广泛应用于上述新能源并网和柔性直流输电环节^[2]。与同步发电机不同,VSC 通常通过锁相环 PLL (phase locked loop)实现与交流电网同步^[3],然而由于我国“源-荷”分布不均匀,在大容量、远距离输电过程中大电网呈现弱网特性^[4],并网 VSC 容易发生与 PLL 密切相关的失稳问题。

诸多学者对 VSC 的暂态失稳问题开展了大量预测性研究,以线性理论为基础的变换器小扰动稳定性研究方法主要侧重于 PLL 动态性能和内、外环控制交互的影响^[5]。文献[6]分析了传统同步参考系锁相环 SRF-PLL(synchronous reference frame PLL)在电网电压畸变时的性能,研究表明,增大 PLL 带宽虽提高了 PLL 的响应速度,但同时也增大 PLL 的锁相误差;文献[7]研究了 VSC-HVDC 变换器在弱网下的小信号模型和特征值模型,研究表明,小信号不稳定性与 PLL 和电网阻抗密切相关。

上述研究主要针对 VSC 小扰动稳定,随着可再生能源渗透率不断增加,大电网的支撑能力变弱^[8]。因此,国内外学者越来越关注大扰动对系统稳定性的影响^[9-14]。文献[9]参照同步发电机模型对 PLL 进行建模分析,利用等面积法则分析 VSC 的暂态稳定性;文献[10]建立电流限幅后的并网 VSC 降阶系统模型,分析大扰动下电流限幅导致的切换型振荡机理,研究表明,切换型振荡的必要条件是降阶系统发生负阻尼振荡;文献[11]建立 PLL 准静态模型,分析弱网状态下线路电抗对功率传输能力的影响,但并未涉及不对称故障、频率变化等复杂工况;文献[12]建立 VSC 降阶非线性模型,以电压暂降故障为例分析电网参数和 PLL 参数对系

统稳定性的影响,定性地给出了系统失稳的条件;文献[13]分析了低电压穿越时功率参考值对系统稳定性的影响,提出 1 种基于动态有功功率平衡的暂态稳定增强方法,但忽略了故障时电网电压畸变的影响;文献[14]通过相位图分析了不同参数锁相环的大信号非线性响应,研究表明,只要稳态工作点存在,一阶 PLL 同步下的 VSC 就不会失稳。

综上所述,现有针对并网 VSC 大扰动失稳的研究场景较为单一,且多集中于电网电压跌落故障,大都忽略了网侧频率波动、无功注入和锁相环延迟对系统暂态失稳的影响。为弥补现有研究的不足,本文以基于 PLL 的 VSC 为对象,通过失稳边界的定量计算,旨在揭示多场景下并网 VSC 暂态失稳的机理。

1 VSC 暂态失稳模型

1.1 VSC 控制框图

锁相环同步 VSC 并网示意如图 1 所示。其中: U_{dc} 为直流母线电压;滤波电感 L_f 和滤波电容 C_f 组成 LC 滤波器; L 和 R 分别为线路电感和电阻; P 为 VSC 注入电网的有功功率; V_g 为电网电压; V_{tabc} 和 I_{tabc} 分别为公共耦合点 PCC(point of common coupling)处的电压和电流; V_{tdq} 和 I_{tdq} 分别为 dq 轴下的 PCC 电压和电流; V_{dqref} 为 dq 轴下电压参考值; P_{ref} 和 U_{dcref} 分别为直接功率控制和动态电压控制 DVC(dynamic voltage control)的参考值; θ_{pll} 为锁相环的输出相角。

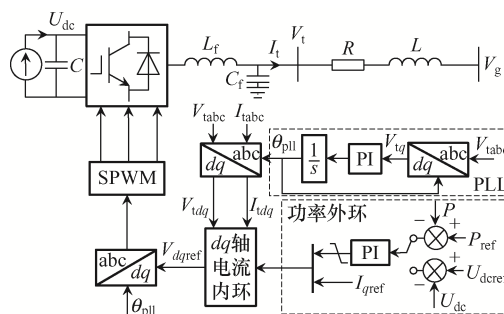


图 1 锁相环同步 VSC 并网示意

Fig. 1 Schematic of PLL-synchronous VSC grid-connection

为模拟光伏和风机出力, 直流侧输入等效为电流源^[15], 采用并联电容稳定直流侧电压, 经逆变器、滤波环节和线路阻抗接入电网。控制环节包括锁相环、功率外环和 dq 电流内环。典型有功功率外环可以分为直接功率控制和 DVC。

为简化分析, 本文考虑如下假设: ①鉴于电流环带宽远高于外环和 PLL 的带宽, 即电流环输出能够较好地跟踪外环的参考输出, 因此在分析外环的动态特性时, 忽略内部电流控制环的影响; ②忽略 VSC 的器件损耗, 换流器仅用作功率传递。

1.2 VSC 暂态失稳建模与分析

如图 1 所示, 直接功率控制的反馈信号为有功功率测量值 P , 通过将功率误差控制为 0 来实现功率跟踪。锁相环正常工作时, PCC 点电压与 d 轴同相, 有功功率 P 的计算式^[16]为

$$P = \frac{3}{2} V_{td} I_{td} \quad (1)$$

DVC 的反馈信号为直流侧母线电压, 通过维持直流侧母线电压的稳定间接控制变流器输出功率, 直流侧电容两侧的功率平衡方程^[15]为

$$P_{in} - P = sCU_{dc}^2 \quad (2)$$

式中, P_{in} 为电流源输出功率。

基于式(1)和式(2), 结合图 1 双环控制框图, 可分别得到如图2(a)、(b)所示直接功率控制和 DVC 下的功率闭环控制框图。可以看出, 虽然 2 种控制的直接控制信号不同, 但系统有功-电流(P - I_d)之间的关系均满足式(1)。并且文献[1]指出, DVC 下只

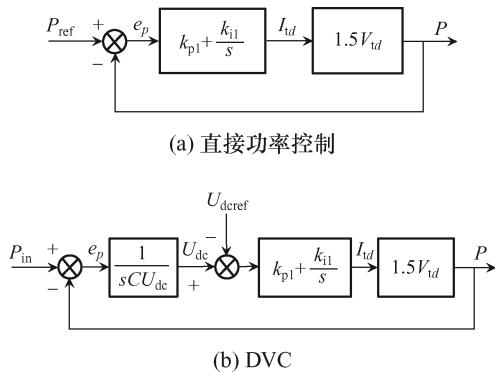


图 2 VSC 的功率闭环控制框图

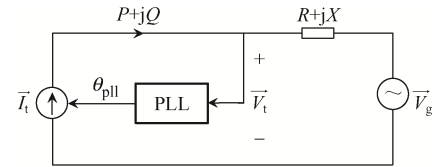
Fig. 2 Block diagram of closed-loop power control of VSC

要给定外环带宽, 变流器输出的极限功率是一个定值。因此, DVC 可以等效为直接功率控制。

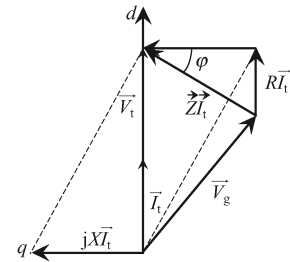
作为 1 种跟网控制型逆变器, 锁相环同步的 VSC 常被等效为 1 个电流源, 其并网等效电路如图 3(a)所示, 其中 \vec{V}_g 为电网电压矢量, \vec{V}_t 和 \vec{I}_t 分别为 PCC 处的电压和电流矢量; 其向量如图 3(b)所示, 其中 φ 为阻抗角, 定义为

$$\varphi = \arctan \frac{R}{X} \quad (3)$$

式中, X 为线路电抗。



(a) 等效电路



(b) 并网 VSC 向量

图 3 并网 VSC 等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of grid-connected VSC

根据图 3(b), 网侧电压和 PCC 点电压的向量关系可以表示为

$$\vec{V}_t = \vec{Z} \vec{I}_t + \vec{V}_g \quad (4)$$

式中, \vec{Z} 为阻抗向量。

将式(4)在 dq 坐标系下分解, 可得

$$\begin{cases} V_{td} = -XI_{tq} + RI_{td} + V_{gd} \\ V_{tq} = XI_{td} + RI_{tq} + V_{gq} \end{cases} \quad (5)$$

单位功率因数下, PCC 点的电压、电流与 d 轴同相, 即

$$\begin{cases} V_{td} = V_t, V_{tq} = 0 \\ I_{td} = I_t, I_{tq} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

因此, 网侧电压 V_g 可表示为

$$V_g = \sqrt{Z^2 I_t^2 + V_t^2 - 2ZI_t V_t \sin \varphi} \quad (7)$$

式中, Z 为 \bar{Z} 的模, 代表阻抗的绝对值。

联立式(1)、式(6)、式(7)可以得到系统稳定运行时网侧电压与功率的关系, 即

$$V_g = \sqrt{\frac{4P^2 Z^2}{9V_t^2} + V_t^2 - \frac{4PZ}{3} \sin \varphi} \quad (8)$$

式(8)表明, 网侧电压为关于有功功率和 PCC 点电压的函数, 网侧电压最小值(临界值) V_{gmin} 为

$$V_g \geq V_{gmin} = \sqrt{\frac{1 - \sin \varphi}{\cos \varphi}} \sqrt{\frac{4PX}{3}} \quad (9)$$

式(9)表明, 为了维持系统的稳定运行, 网侧电压 V_g 必须高于其临界值 V_{gmin} , 否则系统会失稳, 其 V_{gmin} 曲线如图 4 所示。可以看出: 弱网状态即较大的线路电抗 X 会显著增大 V_{gmin} , 降低系统的稳定性; 同时, 线路电阻的存在即阻抗角 φ 增大, 会降低 V_{gmin} , 维持系统稳定。弱网状态下, 阻抗角 φ 的取值范围一般为 0.1~0.2 rad。

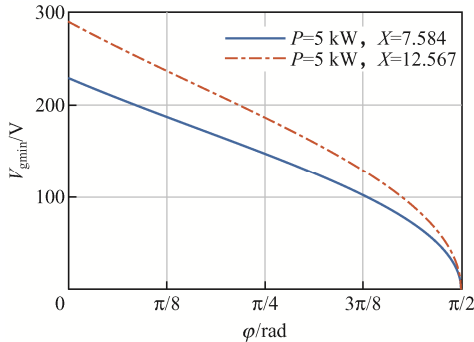


图 4 V_{gmin} 曲线 ($V_{gmin} - \varphi$)

Fig. 4 V_{gmin} curves ($V_{gmin} - \varphi$)

2 多场景下 VSC 暂态失稳边界

1.2 节以电网电压跌落故障为例, 阐述了单位功率因数控制下锁相环同步 VSC 的暂态建模、临界电压及稳定性分析过程。本节将进一步研究非单位因数控制(无功注入)下 VSC 在电网电压跌落等三相对称故障、三相不对称故障、电网频率波动等多故障场景下的暂态失稳边界。

2.1 非单位功率因数运行时的 VSC 失稳边界

注入无功功率后, 系统工作在非单位功率因数下, 其向量如图 5 所示。

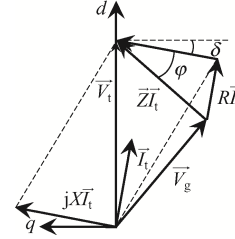


图 5 无功注入后并网 VSC 向量

Fig. 5 Vectors of grid-connected VSC considering reactive power injection

对向量进行分解可得

$$\begin{cases} V_{td} = V_t, V_{tq} = 0 \\ I_{td} = I_t \cos \delta, I_{tq} = I_t \sin \delta \end{cases} \quad (10)$$

式中, δ 为功率因数角。

此时, 网侧电压 V_g 可表示为

$$V_g = \sqrt{Z^2 I_t^2 + V_t^2 - 2 \sin(\varphi + \delta) Z I_t V_t} \quad (11)$$

联立式(1)、式(11)可以得到系统稳定运行时网侧电压与功率的关系, 即

$$V_g = \sqrt{\frac{4P^2 Z^2}{9V_t^2 \cos^2 \delta} + V_t^2 - \frac{4PZ \sin(\varphi + \delta)}{3 \cos \delta}} \quad (12)$$

可知, 式(11)网侧电压 V_g 最小值为

$$V_g \geq V_{gmin} = \sqrt{\frac{1 - \sin(\varphi + \delta)}{\cos \delta \cos \varphi}} \sqrt{\frac{4PX}{3}} \quad (13)$$

式(13)描述了系统临界电压 V_{gmin} 与功率因数角 δ 的关系, 其 V_{gmin} 特性曲线如图 6 所示。可以

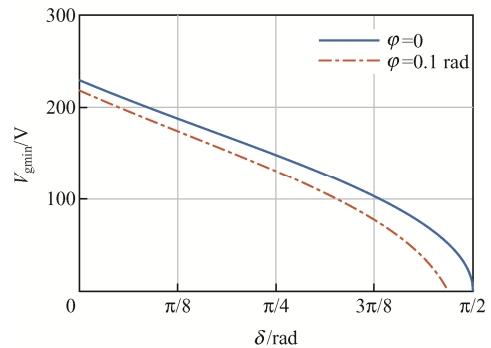


图 6 V_{gmin} 曲线 ($V_{gmin} - \delta$)

Fig. 6 V_{gmin} curves ($V_{gmin} - \delta$)

看出：当功率参考值 P 不变时，在发生三相对称故障后，注入无功功率可以有效提高系统的稳定性；此外，增大阻抗角 φ 也会降低 $V_{g\min}$ ，提高系统的稳定性。

2.2 引入正、负序分量分离后的 VSC 失稳边界

2.1 节的分析均基于三相电压对称的工况，考虑到电网可能会发生不对称故障，因此需要在 PLL 前级加入带通滤波器来提取正、负序分量，包括基于二阶广义积分器 SOGI(second-order generalized integrator)的锁相环结构、基于复数滤波器 CCF(complex coefficient filter)的锁相环结构^[17]等。以 SOGI 为例，网侧电压经过 Clark 变化和 SOGI 输出 2 组互补的信号，再经过正、负序分量计算器 PNSC(positive negative-sequence calculator)得到电压的正、负序分量，最后把正序分量 $v_{\alpha\beta}^+$ 送入 PLL 进行锁相。带前级滤波器的 PLL 控制框图如图 7 所示，其中：前级滤波器的中心频率 ω_i 一般设置为电网角频率 $2\pi f_g$ ； $G_{\text{pre}}(s)$ 为前级滤波器等效的传递函数。

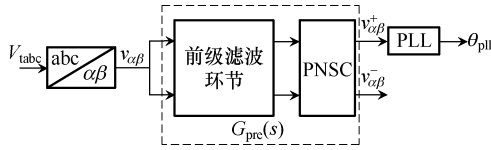
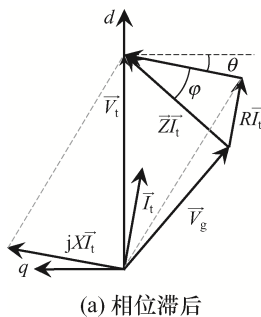


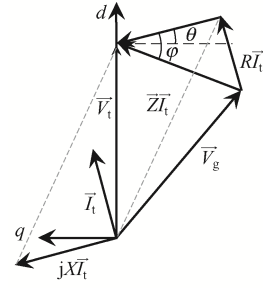
图 7 带前级滤波器的 PLL 控制框图

Fig. 7 Control block diagram of PLL with pre-filter

因此，在不对称故障下，式(9)、式(13)计算出的结果为网侧电压正序分量 V_g^+ 的临界值 $V_{g\min}^+$ ，即在发生三相不对称故障时，只要三相电压正序分量高于 $V_{g\min}^+$ ，系统就不会失稳。此外，如果 PLL 前级滤波器的中心频率 $\omega_i \neq 2\pi f_g$ ，会导致后级 PLL 产生相位延迟或超前。其矢量如图 8 所示。



(a) 相位滞后



(b) 相位超前

图 8 考虑锁相环锁相误差的并网 VSC 矢量

Fig. 8 Vector of grid-connected VSC considering PLL phase-locked error

观察相位超前和相位滞后的矢量图，网侧电压 V_g 均可以表示为

$$V_g = \sqrt{Z^2 I_t^2 + V_t^2 - 2 \sin(\varphi + \theta) Z I_t V_t} \quad (14)$$

式中， θ 为相位误差角，由前级滤波器决定，其计算式为

$$\theta = \angle G_{\text{pre}}(j2\pi f_g) \quad (15)$$

联立式(1)、式(14)可以得到系统稳定运行时网侧电压与功率的关系，即

$$V_g = \sqrt{\frac{4P^2 Z^2}{9V_t^2 \cos^2 \theta} + V_t^2 - \frac{4PZ \sin(\varphi + \theta)}{3 \cos \theta}} \quad (16)$$

可知，式(16)的网侧电压 V_g 最小值 $V_{g\min}$ 为

$$V_g \geq V_{g\min} = \sqrt{\frac{1 - \sin(\varphi + \theta)}{\cos \theta \cos \varphi}} \sqrt{\frac{4PX}{3}} \quad (17)$$

根据式(17)绘制 $V_{g\min}$ 的特性曲线，如图 9 所示。对比图 6 和图 9 可以发现：网侧频率变化引起的相

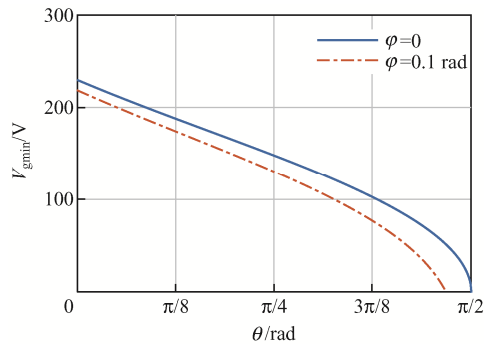


图 9 $V_{g\min}$ 曲线 ($V_{g\min} - \theta$)

Fig. 9 $V_{g\min}$ curve ($V_{g\min} - \theta$)

位超前和滞后分别对应无功控制策略中的无功吸收和注入,前者会降低系统的稳定性,后者会提高系统的稳定性。

2.3 电网频率波动时 VSC 暂态失稳边界

2.2 节分析了网侧发生不对称故障对临界电压的影响,以 SOGI 为例,其传递函数为

$$G_{\text{pre_sogi}}(s) = \frac{k\omega_1 s}{s^2 + k\omega_1 s + \omega_1^2} \quad (18)$$

式中, $\omega_1 = 2\pi f_g$ 。

该滤波器的频率特性曲线如图 10 所示,作为 1 种跟网型逆变器, VSC 的频率和相位通过 PLL 跟踪网侧频率。由图 10 可见,网侧频率为额定频率(50 Hz)时, SOGI 可以无延迟提取单位增益下的正序分量。网侧频率波动时,一方面线路电抗 X 会发生变化,另一方面频率降低或升高会分别导致 SOGI 提取正序分量时产生相位变化。考虑频率波动的并网 VSC 矢量与图 8 相同。

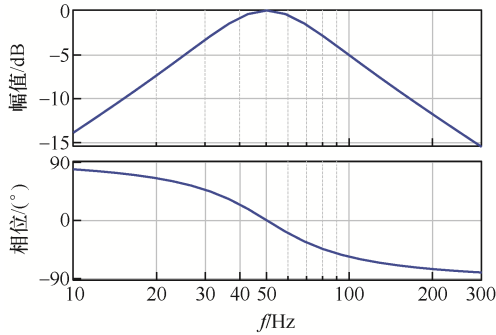


图 10 SOGI 的频率特性曲线

Fig. 10 Frequency characteristic curves of SOGI

此时网侧电压 V_g 可表示为

$$V_g = \sqrt{Z^2 I_t^2 + V_t^2 - 2 \sin(\varphi + \theta) Z I_t V_t} \quad (19)$$

式中: θ 、 φ 、 Z 均为关于网侧频率 f 的函数。

$$\begin{cases} \theta(f) = \angle G_{\text{pre_sogi}}(j2\pi f) \\ \varphi(f) = \arctan \frac{R}{2\pi f L} \\ Z(f) = \frac{2\pi f L}{\cos[\varphi(f)]} \end{cases} \quad (20)$$

联立式(1)、式(19)可以得到系统稳定运行时网侧电压与功率的关系,即

$$V_g = \sqrt{\frac{4P^2 Z^2}{9V_t^2 \cos^2 \theta} + V_t^2 - \frac{4PZ \sin(\varphi + \theta)}{3 \cos \theta}} \quad (21)$$

可知,式(21)的网侧电压临界值为

$$V_{\text{gmin}} = \sqrt{\frac{1 - \sin(\varphi + \theta)}{\cos \theta \cos \varphi} \frac{8\pi P f}{3}} \quad (22)$$

式(22)描述了系统临界电压 V_{gmin} 与频率 f 的关系,其定量的 V_{gmin} 特性曲线如图 11 所示。可见,网侧频率越高,系统越容易失稳,即网侧频率波动对系统的影响主要是由线路电抗 X 决定。

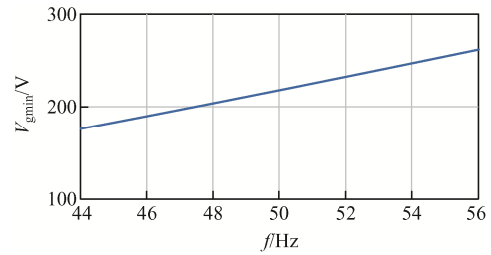


图 11 V_{gmin} 曲线 ($V_{\text{gmin}} - f$)

Fig. 11 V_{gmin} curve ($V_{\text{gmin}} - f$)

3 实验验证

为验证 2.3 节所述 VSC 的暂态失稳边界,基于 RT-BOX 硬件在环实验平台进行实验验证。实验平台如图 12 所示,包含笔记本、控制板、示波器和 RT-BOX 半实物仿真平台。额定状态下, VSC 并网系统参数见表 1,其中 PI 控制参数参考典型二阶系统设计。

图 13 和图 14 分别为 $L = 0.025 \text{ H}$ 和 $L = 0.050 \text{ H}$ 时的实验波形。由图 13 可见,当 $L = 0.025 \text{ H}$ 、临

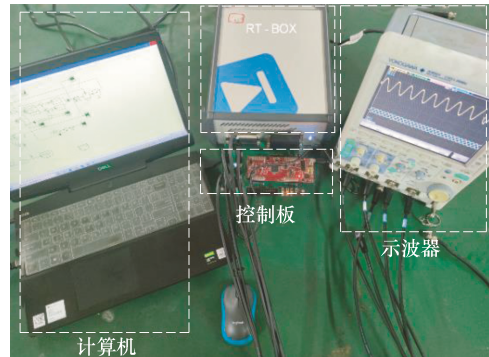


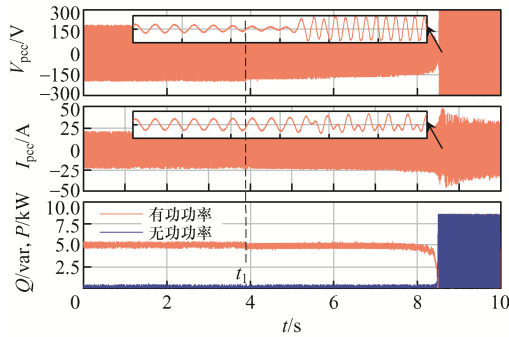
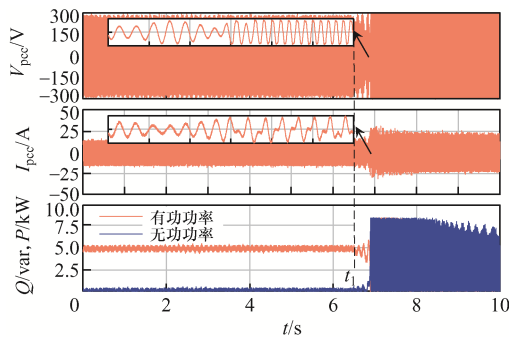
图 12 实验设备

Fig. 12 Experimental setup

表 1 VSC 并网系统参数

Tab. 1 Parameters of grid-connected VSC system

参数	数值
线路电感 L / H	0.025
线路阻抗角 φ / rad	0.1
电网基准频率 f_g / Hz	50
电网电压额定值(幅值) V / V	$220\sqrt{2}$
有功功率额定值 P / kW	5
无功电流额定值 I_{qref} / A	0
开关频率 f_s / kHz	2
采样频率 f_c / kHz	10
PLL 比例系数 k_{p_PLL}	1
PLL 积分系数 k_{i_PLL}	50
电流内环比例系数 k_{p_c}	0.000 1
电流内环积分系数 k_{i_c}	0.01
功率环比例系数 k_{p_p}	15
功率环电压系数 k_{i_p}	500
直流侧电压额定值 V_{dc} / V	700

图 13 $L = 0.025 \text{ H}$ 时的实验波形Fig. 13 Experimental waveforms with $L=0.025 \text{ H}$ 图 14 $L = 0.050 \text{ H}$ 时的实验波形Fig. 14 Experimental waveforms with $L=0.050 \text{ H}$

界电压为 215~220 V 时, 临界电压与理论计算值 217.6 V 基本一致; 由图 14 可见, 当 $L = 0.050 \text{ H}$ 、

临界电压为 305~310 V 时, 临界电压与理论计算值 307.8 V 基本一致。验证了线路等效电感越大, 并网 VSC 越容易失稳。

图 15 和图 16 分别为无功功率注入后和引入前级滤波器后的实验波形。由图 15 可见, 当系统的临界电压为 205~215 V 时, 临界电压与理论计算值 205.9 V 一致, 验证了无功注入可以有效降低系统的临界电压, 增强系统的稳定性; 由图 16 可见, t_1 时刻 A 相电压跌落至 200 V, t_2 时刻 A 相电压跌落到 184 V, 验证了网侧电压正序分量幅值低于临界电压(217.6 V)后系统才失稳。

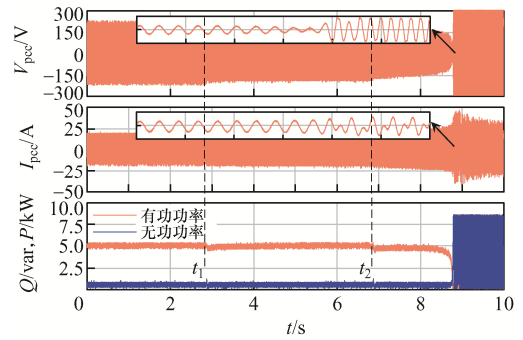


图 15 无功功率注入后的实验波形

Fig. 15 Experimental waveforms with reactive power injection

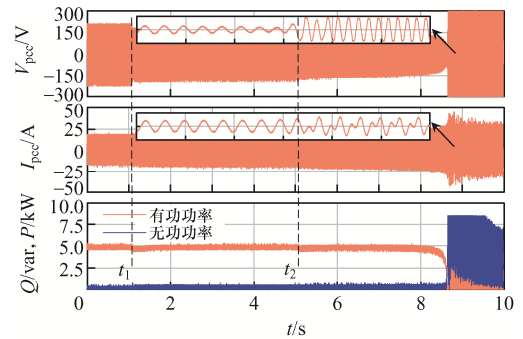


图 16 引入前级滤波器后的实验波形

Fig. 16 Experimental waveforms with pre-filter

图 17 和图 18 分别为相位延迟和网侧频率波动实验波形。由图 17 可见, 虽然电路参数与图 13 相同, 但是相位延迟导致实际的 q 轴电流不等于 0, 且 PCC 点的无功功率测量值为 2.2 var, 验证了前级滤波器带宽如果小于额定值 $2\pi f_g$, 系统可以更好地维持稳定; 图 18 验证了频率升高会导致系统临界电压升高, 容易失稳。

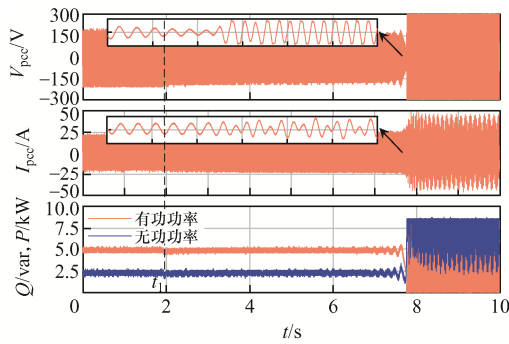


图 17 相位延迟实验波形

Fig. 17 Experimental waveforms with phase delay

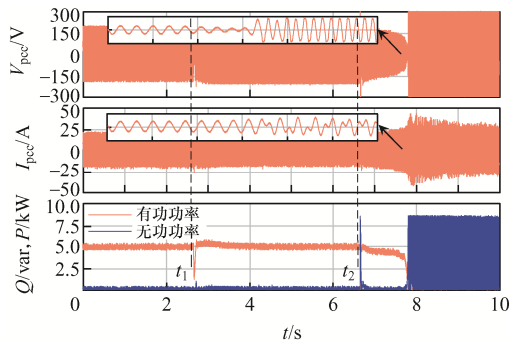


图 18 网侧频率波动的实验波形

Fig. 18 Experimental waveforms with grid-side frequency fluctuations

4 结语

本文针对电网电压跌落、频率波动、三相不对称故障等多种故障场景, 综合考虑电网线路阻抗、无功注入、PLL 前级滤波器影响, 全面研究了多场景下基于 PLL 的 VSC 并网系统的暂态失稳边界。研究表明: 线路电阻、网侧频率降低、无功注入和锁相环相位延迟可以改善系统的失稳边界; 网侧频率增大和锁相环相位超前会恶化系统的失稳边界。此外, 在不对称故障时, 影响系统失稳边界的主要因素为网侧电压的正序分量。据此, 为了维持系统稳定运行, 在应对电网暂态故障时, 一方面可以在故障点注入无功功率以改善运行环境, 另一方面可以在网侧发生故障时添加相位延迟或虚拟电阻。

参考文献:

[1] 迟永宁, 梁伟, 张占奎, 等. 大规模海上风电输电与并

网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3758-3770.

Chi Yongning, Liang Wei, Zhang Zhankui, et al. An overview on key technologies regarding power transmission and grid integration of large scale offshore wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3758-3770. (in Chinese)

[2] 盛逸标, 林涛, 陈宝平, 等. 面向新能源外送系统次/超同步振荡的控制器参数协调优化[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 983-993.

Sheng Yibiao, Lin Tao, Chen Baoping, et al. Coordination and optimization of controller parameters for subsynchronous/super-synchronous oscillation in new energy delivery systems [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 983-993. (in Chinese)

[3] Blaabjerg F, Teodorescu R, Liserre M, et al. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1398-1409.

[4] 辛焕海, 董炜, 袁小明, 等. 电力电子多馈入电力系统的广义短路比[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6013-6027.

Xin Huanhai, Dong Wei, Yuan Xiaoming, et al. Generalized short circuit ratio for multi power electronic based devices infeed to power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6013-6027. (in Chinese)

[5] 胡祺, 付立军, 马凡, 等. 弱电网下基于锁相控制并网变换器小扰动同步稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 98-108.

Hu Qi, Fu Lijun, Ma Fan, et al. Small signal synchronizing stability analysis of PLL-based VSC connected to weak AC grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 98-108. (in Chinese)

[6] Chung S K. A phase tracking system for three phase utility interface inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(3): 431-438.

[7] Zhou J Z, Ding Hui, Fan Shengtao, 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.

[8] Taul M G, Wang Xiongfei, Davari P, et al. An overview

- of assessment methods for synchronization stability of grid-connected converters under severe symmetrical grid faults [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(10): 9655-9670.
- [9] Hu Qi, Hu Jiabing, Yuan Hao, et al. Synchronizing stability of DFIG-based wind turbines attached to weak AC grid [C]// 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Hangzhou, China, 2014. DOI: 10.1109/ICEMS.2014.7013943.
- [10] 薛安成, 汪云涛, 乔登科, 等. 并网 VSC 系统正阻尼时的一类切换型振荡分析[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(6): 84-89.
- Xue Ancheng, Wang Yuntao, Qiao Dengke, et al. Analysis on category of switched oscillation for grid-connected VSC system with positive damping [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(6) 84-89. (in Chinese)
- [11] 于彦雪, 胡鹏飞, 陈玉树, 等. 极弱电网下并网逆变器功率传输能力分析及其提升方法[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(14): 101-108.
- Yu Yanxue, Hu Pengfei, Chen Yushu, et al. Analysis and improvement method of power transfer capability for grid-connected inverter in ultra-weak grid [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(14): 101-108. (in Chinese)
- [12] He Xiuqiang, Geng Hua, Ma Shaokang. Transient stability analysis of grid-tied converters considering PLL's nonlinearity [J]. *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, 2019, 4(1): 40-49.
- [13] 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.
- [14] Wu Heng, Wang Xiongfei. Design-oriented transient stability analysis of PLL-synchronized voltage-source converters [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(4): 3573-3589.
- [15] Pal D, Panigrahi B K. Impact of DC-bus voltage control on synchronization stability of grid-tied inverters [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2022, 69(6): 2782-2786.
- [16] 宋国兵, 常仲学, 王晨清, 等. 直驱风机三相短路电流特性分析[J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(10): 1-7.
- Song Guobing, Chang Zhongxue, Wang Chenqing, et al. Three-phase fault current characteristics of permanent magnet synchronous generator [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(10): 1-7. (in Chinese)
- [17] Terriche Y, Golestan S, Guerrero J M, et al. Multiple-complex coefficient-filter-based PLL for improving the performance of shunt active power filter under adverse grid conditions [C]// 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Portland, OR, USA, 2018. DOI: 10.1109/PESGM.2018.8586172.



陈征

作者简介:

陈征(1999—), 男, 中国电源学会学生会员, 硕士。研究方向: 新能源并网与主动配网。E-mail: 22010038@zju.edu.cn。

胡鹏飞(1988—), 男, 通信作者, 博士。研究方向: 柔性交直流输电技术、新能源并网与主动配电网、电力电子化电力系统分析与控制。E-mail: zjuhpf@163.com。

杨再欣(1993—), 男, 硕士。研究方向: 电力系统控制保护。E-mail: zaixin.yang@foxmail.com。

于彦雪(1991—), 女, 博士。研究方向: 弱电网下并网逆变器建模及稳定性。E-mail: yuyanxueppkz@163.com。

江崇熙(1992—), 男, 博士。研究方向: 电力系统稳定分析与控制。E-mail: jiangchongxi@zju.edu.cn。