

极弱电网、严重故障下构网型变流器 故障穿越能力提升技术研究

裴建楠, 赵冬梅*, 白俊辉, 刘崇茹

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206)

Research on Improving Fault Ride Through Capability of Grid-forming Converter Under Extremely Weak Grid and Severe Fault Condition

PEI Jiannan, ZHAO Dongmei*, BAI Junhui, LIU Chongru

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: This paper studies the influence of conventional fault ride through strategy on the stability of VSG large disturbance under extremely weak grid and severe grid voltage dip condition. First, the grid-forming characteristic characterization model of VSG under conventional fault ride through strategy is derived theoretically. On this basis, the concept of fault ride through feasible region is further proposed in considering the conditions required for successful fault ride through. The feasible region defines the application range of the conventional VSG fault ride through strategy in the case of different severity level faults. In addition, to solve the problem that conventional strategy cannot ride through different severity level faults successfully, this paper proposes an enhanced VSG fault ride through strategy based on dynamic current-limiting voltage control unit. With the flexibility of near-area reactive power and far-area voltage control, VSG can effectively improve its support ability to grid voltage while limiting short-circuit current effectively under extremely weak grid condition. Finally, simulation is constructed in PSCAD/EMTDC, and the effectiveness of the proposed control strategy is verified.

KEY WORDS: grid-forming technology; virtual synchronous generator (VSG); fault ride through; extremely weak grid; large disturbance stability

摘要: 该文针对极弱电网、严重故障场景研究传统故障穿越策略对虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)型构网变流器大干扰稳定性的影响。首先,通过理论推导并建立传统故障穿越策略下VSG构网特性表征模型,用以表

征电网故障阶段VSG构网同步特性与电压支撑特性;在此基础上,结合故障成功穿越所需具备的条件,进一步提出故障穿越可行域的概念以及故障严重程度的界定原则,明确传统VSG故障穿越策略对于不同程度故障、不同限流幅值的适用范围;并且,针对传统故障穿越无法覆盖全故障场景的问题,提出一种名为动态限幅电压控制的新型控制方式(dynamic limiting voltage control, DLVC),并在其基础上进一步提出一种增强型VSG故障穿越策略(dynamic limiting voltage control fault ride through, DLVC-FRT),其具有近区无功、远区电压控制的灵活控制特性,在限制短路电流的同时可有效提升VSG在极弱电网场景下对电网电压的支撑能力;最后,在PSCAD/EMTDC中构建仿真,并验证所提策略的有效性。

关键词: 构网技术; 虚拟同步机; 故障穿越; 极弱电网; 大扰动稳定性

0 引言

新能源经直流外送是目前电能的典型送出模式,然而,部分偏远区域由于基地距离主网距离相对较远、外送通道过长等原因,在新能源渗透率持续提高的背景下,易导致电网出现弱网甚至极弱电网特征^[1-2],对于传统呈现电流源特性的跟网型控制,容易引起一系列与电压、频率有关的安全稳定控制方面问题。电压源外特性、良好弱电网稳定性^[3-4]的虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)型构网技术凭借能够为电网提供惯量及电压支撑的优势,将会在“双高”电力系统安全稳定运行方面发挥重要作用。

各国学者对于如何提升VSG的故障穿越能力进行了广泛研究,相关成果主要聚焦在以下4方面:

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB2402700); 国家电网有限公司科技项目(52272222001J)。

National Key R&D Program of China (2022YFB2402700); Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (52272222001J).

1) 故障期间构网(grid-forming, GFM)控制切换成跟网(grid-following, GFL)控制策略^[5-6]。该策略旨在使故障期间 GFM 恢复成 GFL, 通过对电流的控制以达到限流和支撑电压的效果。但模式切换需要一个备用锁相环来保持并网逆变器在 VSG 故障穿越期间与电网的同步性, 因此会面临锁相环在弱电网下不稳定问题以及模式切换过程中暂态冲击的问题。

2) 传统故障穿越策略^[7-9], 此种策略在 VSG 故障期间通过改进 VSG 的无功-电压下垂控制环节、增强有功和无功功率的协同控制等方式来实现规避 VSG 过流与提升 VSG 对电网电压支撑的效果。由于其没有实质性改变 VSG 的有功、无功控制环节, 只是通过调整有功、无功参考值实现 VSG 故障穿越的效果, 故可以认为是 PQ 型 VSG 穿越技术。文献[8]基于传统故障穿越策略并结合相关规程设计一种直驱风机高、低电压连续故障穿越策略; 文献[9]对传统故障穿越策略下电网电压对称故障后 VSG 的动静特性进行分析, 在此基础上提出一种传统故障穿越改进策略, 并引入基于最大故障相电流检测的时变虚拟阻抗技术以达到抑制 VSG 瞬态故障电流的效果。

3) 电压源型故障穿越策略^[10-12]。此种策略通过获取故障下电网跌落幅值、系统等值阻抗等参数来计算 VSG 有功功率、电压参考值及虚拟阻抗的数值, 实现 VSG 故障前后功角不变与故障限流的穿越效果。文献[11]利用 VSG 灵活可控的优势, 提出一种基于暂态功角与电流灵活调控的 VSG 故障穿越方法。所提方法可以有效改善 VSG 在故障期间输出电压同电网电压之间的相位偏移, 以保证其暂态功角稳定性以及对短路电流的有效控制, 进而杜绝 VSG 过流情况的发生; 文献[12]提出一种两阶段 VSG 故障穿越策略, 首先通过行波故障测距算法获取故障位置信息, 进而计算出故障期间系统等值阻抗及电压跌落数值。在此基础上, 通过数学方法推导出 VSG 故障期间有功参考、无功下垂系数等参数所需调整的具体计算表达式, 但相关公式过于复杂。

4) 故障期间电流维持饱和策略^[13-15], 此种策略旨在使 VSG 电流在故障期间维持在恒定的饱和值, 从而规避 VSG 在故障瞬间因参考值改变、模式切换等造成的暂态过流问题, 具有故障期间无需修改功率与电压参考值以及无需故障检测等优势。

但由于 VSG 电压外环控制在故障期间始终处于饱和状态, 有功控制环需要引入额外虚拟功率以达到与电网同步的效果, 并且还会面临故障后控制环节反饱和和失败、VSG 从恒值电流源状态无法恢复到构网状态的情况, 除此之外, 在拓展成高电压穿越及连续故障穿越方面上面临一定的局限。文献[13]提出一种稳定性增强的有功-频率下垂控制策略(stability enhanced P-f droop control, SEPFC), 利用故障期间处于饱和状态的 VSG q 轴电压幅值非零且与功角正相关特性, 将其倍数引入到有功控制环以实现故障期间 VSG 与电网同步的目的。文献[14]针对 SEPFC 故障后正常构网模式恢复失败的情况, 结合故障电网辨识技术, 设计了故障后反饱和和策略。文献[15]提出一种针对故障后 VSG 饱和状态最优恢复策略, 但该策略需要提前获取故障前后电网电压幅值及等值阻抗。

目前针对极弱电网场景的 VSG 故障穿越研究相对较少。文献[16]在电压源型故障穿越策略基础上基于 VSG 暂态功角特性, 提出适用于弱电网的单位圆混合相量分析法, 并在此基础上提出一种虚拟阻抗动态调节控制策略, 能够确保 VSG 在电网故障时可以有效地抑制自身短路电流的稳态值和暂态冲击峰值, 保证 VSG 系统的暂态稳定性, 但是该策略以获知故障下等值电网相关信息为前提; 文献[17]在传统故障穿越策略基础上, 针对 VSG 故障后恢复阶段功率振荡的问题, 提出一种自适应虚拟电阻策略, 结果表明, 该策略在极弱、弱网下均具有很好的鲁棒性; 文献[18]针对三相四线制 VSG, 提出一种基于瞬时饱和器、自适应虚拟负序电阻和零序电阻的自适应故障穿越策略, 实现不同故障场景下 VSG 系统对自身过压、过流的抑制, 但是需要利用电网故障下信息计算相关的参数; 文献[19]针对弱网下风电机组故障穿越策略与弱电网功率-电压特性耦合作用所产生的故障穿越策略反复投退的问题, 通过提高风电机组退出低电压穿越阈值及维持有功参考值不变等方式, 解决了这一场景下电压反复波动的问题。

综合来看, 传统故障穿越策略由于在原有 VSG 控制层面改动较少、无需获取故障期间等值电网电压及阻抗、只需修改有功和无功功率参考值即可达到 VSG 限流及无功支撑的效果、方便拓展成连续低、高穿越策略等优势, 在极弱电网场景具有很好应用的前景, 但仍面临着很大的挑战。一是故障期

间场站的公共耦合点(point of common coupling, PCC)电压的跌落程度很难反应出功率传输的极限,因此,如何实现电流限幅的同时,保证VSG在故障期间与电网的同步特性以及故障期间有功参考值的选取是一个难题;二是远端故障下,由于系统的等值阻抗很大,有可能造成PCC点电压超过穿越阈值从而退出故障穿越的情况。鉴于此,本文首先推导并建立传统故障穿越策略下VSG构网特性表征模型,并在此基础上提出故障穿越可行域的概念及电网故障的界定原则。针对上述两个挑战,提出一种极弱电网、严重故障场景下构网型变流器故障穿越能力提升技术。

1 VSG 型构网变流器模型及传统故障穿越策略

如图1所示,VSG的控制结构主要由两个部分

组成,即有功、无功控制环节。有功控制环节旨在模拟同步发电机的摇摆特性,其在惯性时间常数 T_J 、阻尼系数 D_p 作用下输出VSG的虚拟角频率 ω 、虚拟相角 θ 。无功控制环节用于模拟同步发电机的无功-电压下垂特性,其在无功/电压下垂系数 D_q/D_u 、机端电压设定值 V_n 等参数作用下输出机端电压幅值参考指令 V_{ref} ,并与虚拟相角 θ 组合形成电压参考矢量,以此实现驱动变流器的目的。相较于传统同步发电机,变流器的过流能力一般较弱。因此,为了保证机组的安全,往往在电流内环前端嵌入过流限制环节,以实现电网故障期间VSG过流抑制的效果。图1(a)中: P_{ref} 、 P_E 分别为VSG输出的有功功率参考与实际值; Q_{ref} 、 Q_E 分别为VSG输出的无功功率参考与实际值; V 、 V_{pcc} 、 E 分别为VSG的机端、PCC点、电网的电压; I_{dq} 和 V_{dq} 分别为VSG电流和电压的 d 、 q 轴分量; I_{odq} 为网侧电流 dq 轴

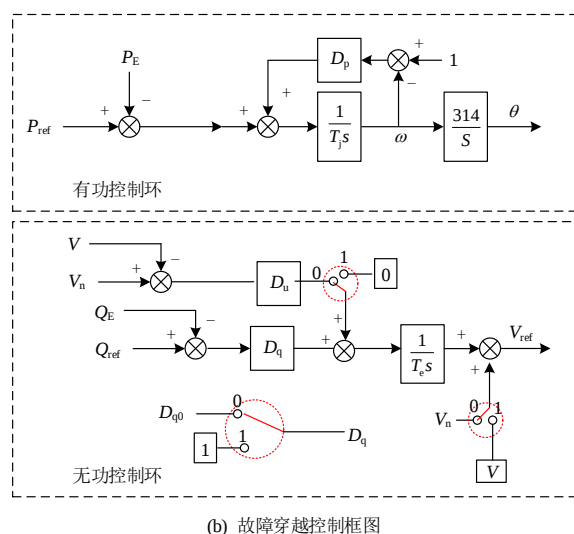
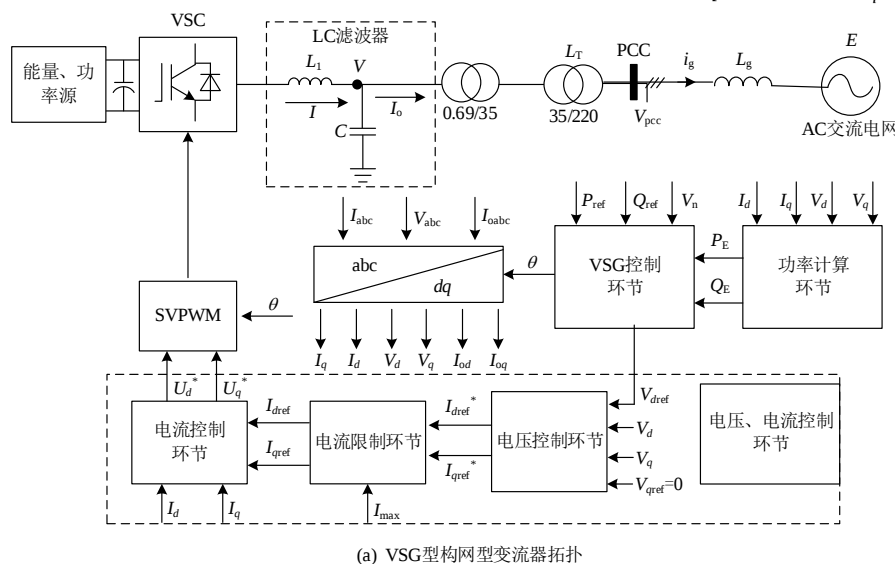


图1 VSG 型构网变流器及故障穿越策略控制框图

Fig. 1 Typical topology and FRT control diagram of VSG type GFM converters

分量; V_n 为机端电压设定值; V_{ref} 、 θ 分别为 VSG 控制环节生成的机端电压幅值参考以及虚拟相角; L_1 和 C 分别为 LC 滤波器的电感与电容; L_T 、 L_g 分别为主变、PCC 点至电网的等值电感。

传统故障穿越策略如图 1(b)所示, 为了消除无功控制环中的无功-电压下垂环节对故障下 VSG 无功支撑能力的影响, 故障期间需要将无功下垂系数 D_q 设置为 1, 并切除电压下垂支路。此外为了规避 V_n 在 VSG 故障穿越过程中, 对无功控制环的不利影响, 故障期间, 将 V_n 切换成故障时 VSG 机端电压 V 。图 1(b)中: D_q 、 D_u 分别为无功控制环节中无功、电压下垂系数; T_j 为 VSG 的惯性时间常数; D_p 为 VSG 的阻尼系数; T_e 为积分环节的时间常数。故障时, 输出的有功功率 P_E 、无功功率 Q_E 仅与故障时参考值 P_{ref_flt} 、 Q_{ref_flt} 有关, P_{ref_flt} 、 Q_{ref_flt} 一般满足如下形式故障穿越特性曲线:

$$Q_{ref_flt} = \begin{cases} \max(V_t \cdot K_q \times (0.85 - V_{pcc}) I_{max}, \sqrt{V_t^2 I_{max}^2 - P_{ref0}^2}) \\ (V_{pcc_low} \leq V_{pcc} \leq 0.85) \\ I_{max} V_t \\ (V_{pcc} < V_{pcc_low}) \end{cases} \quad (1)$$

$$P_{ref_flt} = \begin{cases} \min(P_{ref0}, V_t \sqrt{I_{max}^2 - i_q^2}) \\ (V_{pcc_low} \leq V_{pcc} \leq 0.85) \\ 0 \\ (V_{pcc} < V_{pcc_low}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: V_{pcc_low} 为故障穿越特性曲线中无功满发临界电压; K_q 为无功增益系数; V_{pcc} 、 V_t 分别为故障期间 PCC 点、机端电压。由式(1)、(2)可知:

$$V_{pcc_low} = (0.85 - \frac{1}{K_q}) \quad (3)$$

当 $I_{max}=1.04$ 、 $K_q=1.54$ 时, $V_{pcc_low}=0.2$ 、 $K_q I_{max}=1.6$, 式(1)、(2)即为《GBT 34120-2017 电化学储能系统储能变流器技术规范》中所规定的故障阶段功率参考值要求。

2 传统故障穿越策略下 VSG 型构网变流器构网特性表征模型及其应用

本节提出极弱电网、传统故障穿越策略下 VSG 型构网变流器构网特性表征模型, 用以研究 VSG 在传统穿越策略下能否成功穿越的问题。为了定量

的刻画与表征电网故障的严重程度以及 VSG 型构网变流器故障穿越能力的强弱, 在所提模型基础上, 进一步提出 VSG 故障穿越可行域概念以及电网故障严重程度的界定原则。

2.1 极弱电网、传统故障穿越策略下 VSG 型构网变流器构网特性表征模型

短路比指标(short circuit ratio, S_{CR})是衡量交流系统强弱的关键指标。通常认为: $S_{CR}<2$ 极弱电网; $2<S_{CR}<3$ 为弱电网; $S_{CR}>3$ ^[20] 为强电网。本文 S_{CR} 被用来衡量机端出口处与交流等值电网之间的强弱关系, 其计算表达式如下:

$$S_{CR} = S_{ac} / P_N = U_N^2 / (P_N \cdot X_{N\Sigma}) \approx 1 / X_{\Sigma} \quad (4)$$

式中 S_{ac} 、 P_N 、 $X_{N\Sigma}$ 、 X_{Σ} 分别为机端出口处的短路容量、VSG 额定功率及机端与交流系统之间的等值阻抗的有名值、标么值。

故障下 VSG 满足如下关系:

$$\vec{V}_t = \vec{E}_t + jX_{t\Sigma} \vec{I}_t \quad (5)$$

式中 $\vec{V}_t$ 、 $\vec{E}_t$ 、 $\vec{I}_t$ 、 $X_{t\Sigma}$ 分别为系统故障阶段 VSG 端电压、交流等值电网等值电压、VSG 电流向量及机端与交流等值电网之间的等值电抗。

由于 VSG 构网特性在准静态下将端电压矢量定向在虚拟 d 轴上, 式(5)进一步转换为 VSG 的 dq 坐标系, 可得:

$$\begin{cases} V_t = E_{td} + X_{t\Sigma} I_d \\ 0 = E_{tq} - X_{t\Sigma} I_q \end{cases} \quad (6)$$

故障期间 VSG 传输功率为

$$P_E = \frac{E_t V_t}{X_{t\Sigma}} \sin(\delta_t) = V_t I_d \quad (7)$$

受故障下功角 $\delta_t < 90^\circ$ 的约束, I_d 满足如下关系:

$$I_d \leq \frac{E_t}{X_{t\Sigma}} \quad (8)$$

基于式(6), 故障阶段网络特性方程式(5)可以进一步整理为

$$V_t = \sqrt{E_t^2 - X_{t\Sigma}^2 I_d^2} + X_{t\Sigma} \sqrt{I_{max}^2 - I_d^2} \quad (9)$$

PCC 处电压幅值 V_{pcc} 与功角 δ_{pcc} 满足如下关系:

$$\begin{cases} \frac{V_t E_t}{X_{t\Sigma}} \sin(\delta) = P_E \\ \frac{V_{pcc} E_t}{X_{t\Sigma} - X_{pcc}} \sin(\delta_{pcc}) = P_E \end{cases} \quad (10)$$

$$\frac{V_t^2 + E_t^2 - 2V_t E_t \cos(\delta)}{V_{pcc}^2 + E_t^2 - 2V_{pcc} E_t \cos(\delta_{pcc})} = \frac{X_{t\Sigma}^2}{(X_{t\Sigma} - X_{pcc})^2} \quad (11)$$

式中 X_{pcc} 为机端与 PCC 点之间的等值电抗。由式(10)可得:

$$V_{\text{pcc}} = \frac{V_t \sin(\delta)}{\sin(\delta_{\text{pcc}})K} \quad (12)$$

其中:

$$K = \frac{X_{t\Sigma}}{X_{t\Sigma} - X_{\text{pcc}}} \quad (13)$$

将式(12)代入到(11)中, 可得:

$$\begin{aligned} & \underbrace{[V_t^2 + E_t^2 - 2V_t E_t \cos(\delta)] \sin^2(\delta_{\text{pcc}})}_{B_1} = \\ & \underbrace{[V_t^2 \sin^2(\delta) + K^2 E_t^2 \sin^2(\delta_{\text{pcc}}) - 2KV_t E_t \sin(\delta) \cos(\delta_{\text{pcc}}) \sin(\delta_{\text{pcc}})]}_{B_2} \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)可整理如下:

$$a_1 \sin^2(\delta_{\text{pcc}}) + a_2 \cos(\delta_{\text{pcc}}) \sin(\delta_{\text{pcc}}) + a_3 = 0 \quad (15)$$

其中, a_1 、 a_2 、 a_3 表达式如下:

$$\begin{cases} a_1 = V_t^2 + E_t^2 - K^2 E_t^2 - 2V_t E_t \cos(\delta) = \\ V_t^2 + E_t^2 - K^2 E_t^2 - 2V_t \sqrt{E_t^2 - X_{t\Sigma}^2 I_d^2} \\ a_2 = 2KV_t E_t \sin(\delta) = 2KV_t X_{t\Sigma} I_d \\ a_3 = -V_t^2 \sin^2(\delta) = -V_t^2 \left(\frac{X_{t\Sigma} I_d}{E_t}\right)^2 \end{cases} \quad (16)$$

对式(15)进行求解可得:

$$M = \sin(\delta_{\text{pcc}}) = \begin{cases} \left(\sqrt{\frac{-(2a_1 a_3 - a_2^2) - \sqrt{(2a_1 a_3 - a_2^2)^2 - 4(a_1^2 + a_2^2)a_3^2}}{2(a_1^2 + a_2^2)}} \right) \\ (I_d < \frac{E_t I_{\text{max}}}{\sqrt{E_t^2 + I_{\text{max}}^2 X_{t\Sigma}^2}}) \\ \left(\sqrt{\frac{-(2a_1 a_3 - a_2^2) + \sqrt{(2a_1 a_3 - a_2^2)^2 - 4(a_1^2 + a_2^2)a_3^2}}{2(a_1^2 + a_2^2)}} \right) \\ (I_d > \frac{E_t I_{\text{max}}}{\sqrt{E_t^2 + I_{\text{max}}^2 X_{t\Sigma}^2}}) \end{cases} \quad (17)$$

式(12)可进一步整理得:

$$V_{\text{pcc_net}}(I_d) = \begin{cases} \frac{V_t I_d (X_{t\Sigma} - X_{\text{pcc}})}{E_t M} \\ (I_d \neq 0 \cap I_d < I_{d\text{max}}) \\ E_t + (X_{t\Sigma} - X_{\text{pcc}}) I_{\text{max}} \\ (I_d = 0) \end{cases} \quad (18)$$

式中: $V_{\text{pcc_net}}$ 为 VSG 故障穿越阶段由固有网络特性

决定的公共耦合点电压; $I_{d\text{max}}$ 为 VSG d 轴所允许的最大电流。

$$I_{d\text{max}} = \min\left(\frac{E_t}{X_{t\Sigma}}, I_{\text{max}}\right) \quad (19)$$

VSG 在故障穿越过程中, 其功率满足:

$$P_{\text{net_ftr}} = V_t I_d (I_d < I_{d\text{max}}) \quad (20)$$

将式(8)代入到式(19)中, 可得:

$$P_{\text{net_ftr}} = (\sqrt{E_t^2 - X_{t\Sigma}^2 I_d^2} + X_{t\Sigma} \sqrt{I_{\text{max}}^2 - I_d^2}) I_d \quad (21)$$

式中 $P_{\text{net_ftr}}$ 为由网络特性确定的 VSG 有功功率, 本文称之为 VSG 固有网络故障特性曲线, 式(21)存在最大值点, 其所对应的 VSG d 轴电流值为

$$I_{d_p\text{max}} = \frac{E_t I_{\text{max}}}{\sqrt{E_t^2 + I_{\text{max}}^2 X_{t\Sigma}^2}} \quad (22)$$

将式(22)代入到式(21), 可得:

$$\begin{aligned} P_{\text{max_ftr}} = & (E_t \sqrt{\frac{E_t^2}{E_t^2 + I_{\text{max}}^2 X_{t\Sigma}^2}} + \\ & X_{t\Sigma} I_{\text{max}} \sqrt{\frac{I_{\text{max}}^2 X_{t\Sigma}^2}{E_t^2 + I_{\text{max}}^2 X_{t\Sigma}^2}}) \frac{E_t I_{\text{max}}}{\sqrt{E_t^2 + I_{\text{max}}^2 X_{t\Sigma}^2}} \end{aligned} \quad (23)$$

式中 $P_{\text{max_ftr}}$ 、 $I_{d_p\text{max}}$ 分别为 VSG 故障穿越过程中由网络特性决定的 VSG 最大有功功率以及其对应的 d 轴电流。于是, 根据式(1)、(2)、(18)、(21)可以得到不同程度故障下的 VSG 故障阶段构网特性表征模型, 如图 2、3 所示。

2.2 电网故障阶段 VSG 构网特性分析

1) 故障阶段构网型变流器同步特性分析。

2) 以图 2 中场景 1 为例, 若故障阶段 VSG 初始运行点在 A_1 , 由于 A_1 点处对应有功参考值 $P_{\text{ref_ftr}A1}$ 大于固有网络特性上有功实际值 $P_{\text{net_ftr}A1}$, 致使运行点由 A_1 向 A 方向移动(功角增大方向); 当运行点处于 A_2 点时, 由于 A_2 处有功参考值 $P_{\text{ref_ftr}A2} < P_{\text{net_ftr}A2}$, 致使运行点由 A_2 向 A 方向移动(功角减小方向), 最终稳定至 A 点; 同理, 对于图 2 中场景 2、3 以及图 3 中场景 8 均有平衡点 B 、 C 、 D , VSG 构网同步成功。而对于其余场景, VSG 均丧失构网同步特性。

3) 故障阶段构网型变流器电压支撑特性分析。

以图 2 中场景 1、2、3 为例, 其平衡点所对应的横坐标 $V_{\text{pcc}A}$ 、 $V_{\text{pcc}B}$ 、 $V_{\text{pcc}C}$ 分别表征 VSG 在电网故障阶段电压支撑能力。受限于电力电子元件过流

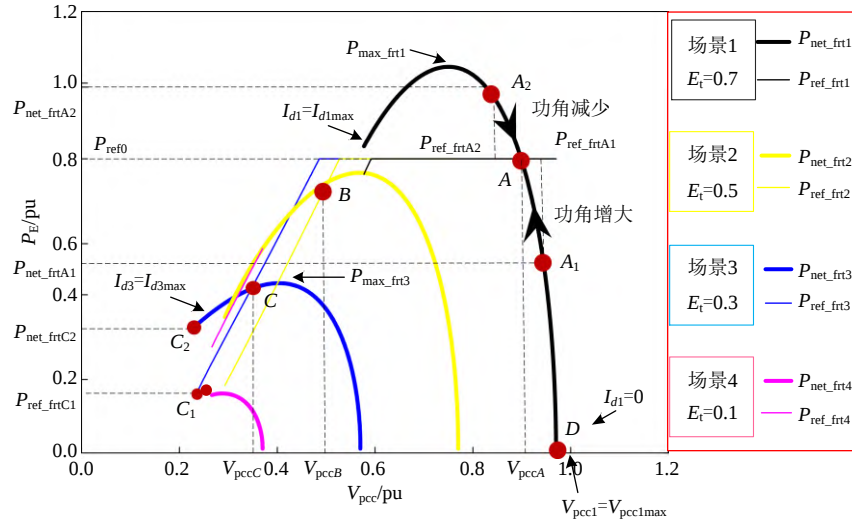


图 2 不同电网电压跌落下 VSG 构网特性表征模型($I_{\max}=1.5$ 、 $K_q=1.54$ 、 $P_{\text{ref}0}=0.8$ 、 $X_{L2}=0.3$)

Fig. 2 Grid-forming characteristic characterization model of VSG under different grid voltage drops

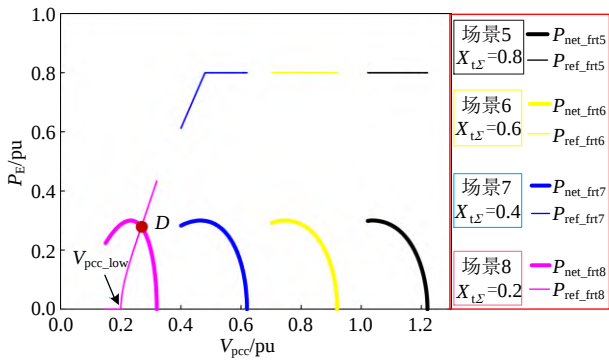


图 3 不同电网等值电抗下的 VSG 构网特性表征模型
($I_{\max}=1.5$ 、 $K_q=1.54$ 、 $P_{\text{ref}0}=0.8$ 、 $E_t=0.2$)

Fig. 3 Grid-forming characteristic characterization model of VSG under different equivalent reactances

能力, 场景 2、3 下 VSG 对电网电压支撑表现为在其电流幅值内无功的最大支撑。而对于场景 1, 当运行点最终稳定于 A 点时, 此时 $V_{\text{pcc}A}$ 超过了穿越阈值 0.85, 从而造成 VSG 反复退出/进入故障穿越的现象, 弱化了 VSG 电压支撑特性。

2.3 故障穿越可行域及故障严重程度的界定

由图 2、3 可知, 传统策略下 VSG 故障穿越成功需满足两种情况: 1) 故障前有功参考值 $P_{\text{ref}0}$ 小于固有网络故障特性曲线的有功最大值 $P_{\text{max_frt}}$, 以满足 VSG 构网同步特性, 此种情况如图 2 中场景 1 平衡点 A 点所示; 2) 固有网络故障特性曲线上的电压最大值(以图 2 中场景 1 为例, 网络故障特性曲线上的电压最大值 V_{pccmax} , 即为 D 处电压 V_{pcc1max})应小于 0.85, 以达到规避穿越过程中 VSG 退出故障穿越的现象发生及提升构网电压支撑特性的效果。此种情况成功穿越约束条件如下:

$$\begin{cases} P_{\text{ref}0} < P_{\text{max_frt}} \\ V_{\text{pcc_low}} < E_t + (X_{L\Sigma} - X_{\text{pcc}})I_{\max} < 0.85 \end{cases} \quad (24)$$

故障前有功参考值 $P_{\text{ref}0}$ 大于固有网络故障特性曲线的有功最大值 $P_{\text{max_frt}}$, VSG 故障期间有功参考曲线 $P_{\text{ref_frt}}$ 与固有网络故障特性曲线 $P_{\text{net_frt}}$ 相交, 且固有网络故障特性曲线上的电压最大值小于 0.85。此种情况如图 2 中场景 3 所示, 有功参考曲线上 C_1 点处有功参考值 $P_{\text{ref_frt}C1}$ 需小于固有网络故障特性曲线上 C_2 点对应的有功功率 $P_{\text{net_frt}C2}$, 以确保两条曲线相交而得到平衡点。结合式(2)、(18)、(21)、(23)可得此种情况下故障成功穿越约束条件。

$$\begin{cases} P_{\text{ref}0} > P_{\text{max_frt}} \\ P_{\text{ref_frt}}(V_{\text{pcc_net}}(I_{\text{dmax}})) < P_{\text{net_frt}}(I_{\text{dmax}}) \\ V_{\text{pcc_low}} < E_t + (X_{L\Sigma} - X_{\text{pcc}})I_{\max} < 0.85 \end{cases} \quad (25)$$

利用式(24)、(25)对故障工况进行全参数扫描, 可得全故障场景下 VSG 构网特性表征示意图如 4 所示。

由此, 本文提出故障穿越可行域的概念及电网故障严重程度的界定原则。故障穿越可行域用来表征传统故障穿越策略下 VSG 可以成功穿越何种程度的故障, 其是由满足式(24)、(25)的特定故障场景组成的区域, 如图 4 中区域 S_1 所示(图 4 中, 每一种故障场景是故障阶段电网电压 E_t 与等值电抗 X_{L2} 所确定的一个点, 如点 E、F、G、H)。 S_1 区域表征 VSG 故障期间有功参考曲线 $P_{\text{ref_frt}}$ 与网络故障有功特性曲线 $P_{\text{net_frt}}$ 相交, 且固有网络故障特性曲线上的电压最大值 V_{pccmax} 低于 0.85 pu。此种故障场景本文定义为一般故障, 一般故障场景下 VSG 构网同

步特性及电压支撑特性均不会受到影响。

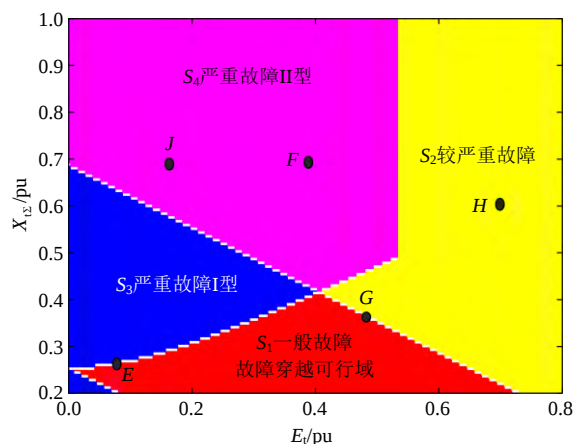


图4 全故障场景下 VSG 构网特性表征示意图
($I_{\max}=1.5$ 、 $K_q=1.54$ 、 $P_{\text{ref}0}=0.8$)

Fig. 4 Diagram of Grid-forming characteristic characterization of VSG under different faults

较严重故障 S_2 区域表征 VSG 故障期间有功参考曲线 $P_{\text{ref_ftr}}$ 与网络故障有功特性曲线 $P_{\text{net_ftr}}$ 能够相交, 具有构网同步特性, 但 V_{pccmax} 高于 0.85 pu , 有退出穿越的风险, 构网电压支撑能力不足。此种类型故障下 VSG 穿越过程从形式上表现为在退出/进入故障穿越中频繁切换, 导致有功/无功振荡、功率传输质量恶化以及电压支撑能力的不足。

严重故障 I 型 S_3 区域表征 VSG 故障期间有功参考曲线 $P_{\text{ref_ftr}}$ 与网络故障特性曲线 $P_{\text{net_ftr}}$ 不相交, 无法进行有功同步, 构网同步特性丧失, 但 V_{pccmax} 低于 0.85 pu 。严重故障 II 型 S_4 区域表征 VSG 故障期间有功参考曲线 $P_{\text{ref_ftr}}$ 与固有网络故障特性曲线不能相交, 同时 V_{pccmax} 高于 0.85 pu 。严重故障下, VSG 面临构网同步失败、功角失稳、切机等风险。值得注意的是, 对于机端电压非零时的零穿越区域(图4左下角区域)在文中不做合理的可行域来考量。此外, 故障的类型并不是一成不变的, 当故障前有功出力参考降低, VSG 故障阶段构网同步特性恢复之后, 严重故障 II 型会向较严重故障演变, 而严重故障 I 型会向一般故障演变。

图5为不同电流限幅下 VSG 故障穿越可行域的对比图, 可知, 随着对构网型变流器限流幅值的提升, 传统 VSG 故障穿越策略的弊端逐渐显现。对于 1.05 倍限流幅值, 尽管故障穿越可行域最大, 但仍存在很大的死区。对于极弱电网远区故障场景, 1.05 限流幅值同样面临故障穿越失败的风险。

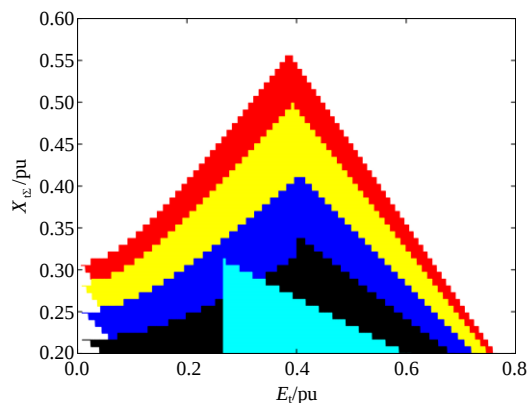


图5 不同电流限幅下 VSG 故障穿越可行域对比图
Fig. 5 Comparison diagram of VSG fault ride through feasible region under different current limiting

图6为不同故障前有功参考值 $P_{\text{ref_ref}0}$ 及无功增益系数 K_q 下故障穿越可行域的对比图。可知, 故障前有功越小, 可行域越大, 故障穿越的成功性越高。无功增益系数越大, 可行域变窄, 对于某种程度的电压跌落, VSG 成功穿越所要求的电网故障时等值电抗范围越来越小。尽管传统 VSG 穿越策略在可行域内故障场景下, 可以通过对 VSG 有功、无功的合理分配, 实现在限流的同时, 对电压也进行一定程度的支撑, 但是在极弱电网场景下弊端显现。为了实现全故障场景下成功穿越、无死区的效率

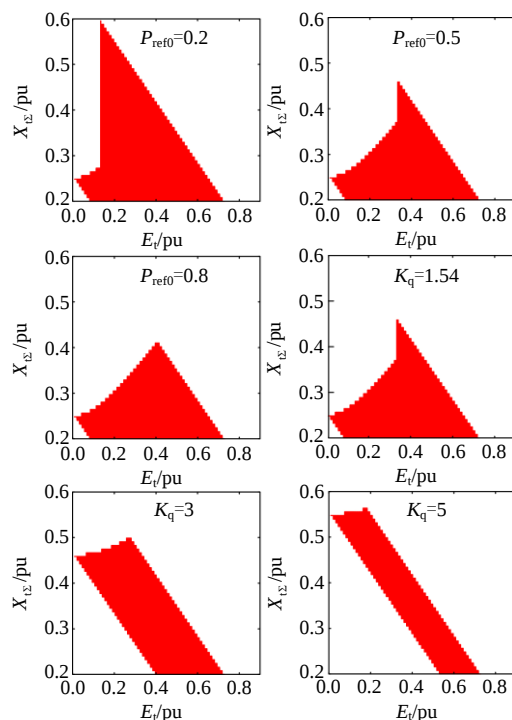


图6 不同工况、故障穿越参数下 VSG 故障穿越可行域对比图($I_{\max}=1.5$)

Fig. 6 Comparison diagram of VSG fault ride through feasible region under different working conditions and fault crossing parameters

果, 特此提出一种名为动态限幅电压控制的新型控制方式及基于此种控制环节的增强型 VSG 故障穿越策略。

3 增强型的 VSG 故障穿越控制策略

本文提出的增强型 VSG 故障穿越策略如图 7 所示。由故障判别环节、故障期间记忆环节、故障清除判别环节、增强型功率控制环节组成、暂态电流抑制环节。

故障判别环节主要用于故障的识别, 输入端为 PCC 点处三相电压有效值的最小值, 当其小于 0.9 pu 时, 输出故障信号 F 并进入保持状态, 此时系统为状态 1。

故障期间记忆环节主要用于记忆故障瞬间 VSG 有功功率 P_0 和无功功率 Q_0 。由于故障瞬间 VSG 功角近似不变, 选取这时的有功功率 P_0 作为 VSG 故障期间的有功参考值, 尽量地维持 VSG 功角与故障前的功角相同, 这样不仅可以实现故障期间 VSG 有功的同步, 还有助于故障后 VSG 恢复阶段对电网产生的冲击最小。 Q_0 被用于故障清除的判别。具体逻辑为, VSG 的有功功率 P_E 经过快速傅里叶分析计算得到 $2\sim 10$ 次谐波含量, 当其最大值小于阈值 K_1 且 VSG 此时处于故障状态时, 判别元件输出故障记忆信号 FM 并保持, 此时系统为状态 2。其中, 快速傅里叶计算及阈值 K_1 用于躲故障瞬间的功率振荡, 延迟环节及阈值 T_1 用于躲功率振荡起始时刻的振荡判别环节的死区。

故障清除判别环节主要用于故障清除的识别。为了规避远端故障时因 PCC 点处电压 >0.9 时造成的低穿退出现象, 在电压恢复判别的同时, 加入了无功判别元件, 当 VSG 无功功率 $Q_E < Q_0$ 且 PCC 点处三相电压有效值的最大值 $>1\text{ pu}$ 时, 元件发出故障清除信号 FC , 此时系统为状态 0, 在发出 FC 的同时, F 与 FM 信号复归为 0, 系统恢复为正常状态。当故障发生时, FC 保持信号复归为 0。

在增强型无功控制环节中, 本文提出一种名为动态限幅电压控制 (dynamic limiting voltage control, DLVC) 的新型控制方式。当近端故障时, 控制器表现出在电流限幅内的无功最大支撑控制。当远端故障时, 控制器表现出电压控制。其中动态限幅上限为 $Q_{\max_limit} = \sqrt{I_{\max}^2 - I_d^2} V_d$ 。故障期间的电压设定为 0.9 pu , 其目的是用于故障后的判别及故障后过电压的抑制。 K_{qv} 被用于多机并联时无功的合理分配, 达到正调差控制效果。暂态电流抑制环

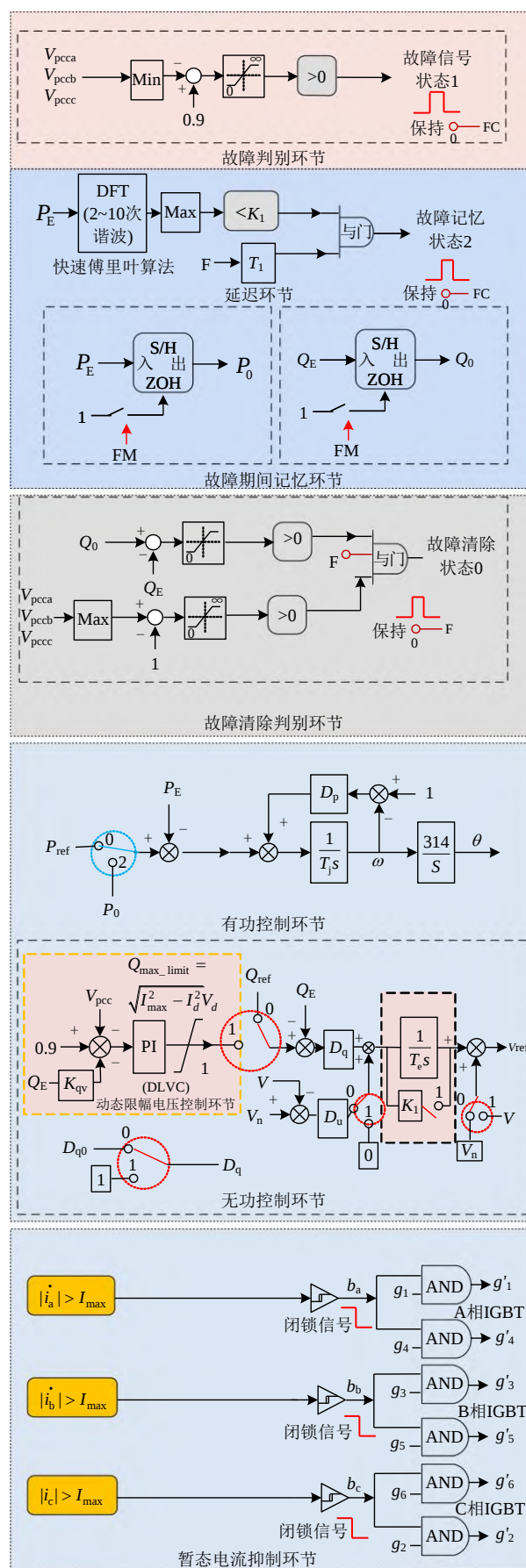


图 7 增强型 VSG 故障穿越策略控制框图

Fig. 7 Control diagram of enhanced FRT strategy

节用于限制电网故障瞬间 VSG 暂态冲击电流，以保证机组的安全。

4 仿真验证

为了进一步验证所提出的增强型策略的有效性，在 PSCAD/EMTDC 中构建仿真，系统拓扑如图 8 所示，仿真参数见表 1。分别进行增强型故障穿越策略(DLVC-FRT 策略)及传统故障穿越策略在 1.5 倍电流限幅下的故障穿越可行域边界关系、穿越死区填补有效性的仿真验证。同时，对于多机并联的场景，也进行了增强策略有效性的验证。

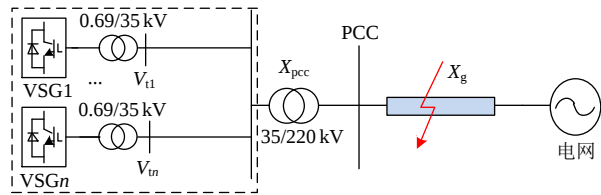


图 8 VSG 型构网变流器仿真系统示意图

Fig. 8 Diagram of VSG type GFM converters system

表 1 VSG 型构网变流器仿真系统主要参数

Table 1 Parameters of VSG type GFM converters system

参数名称	数值
单机额定容量(基值)/MW	2
额定无功/pu	0.4
交流侧额定线电压/kV	0.69
滤波电容/pu	0.05
交流侧滤波器参数/pu	0.1
台数	100
主变短路阻抗/pu	0.15
惯性/s	4
阻尼系数/pu	50
直流侧额定电压/kV	1.2
无功下垂系数/pu	0.03
电压下垂系数/pu	1
无功环比例、惯性环节时间常数	0.1、1
动态限幅电压控制环节比例、积分时间常数	10、0.01
电压外环比例、积分常数	5、0.3
电流内环比例、积分常数	2、0.01
故障期间记忆环节阈值 K_1 、 T_1	0.1、0.001
动态限幅电压控制环节无功分配系数 K_{qv}	0.06
电网等值阻抗/pu	0.83

案例 1: $E_f=0.1\text{ pu}$ 、 $X_\Sigma=0.25\text{ pu}$ 、 $I_{\max}=1.5$ 。(图 4 严重故障 I 型 S_3 与一般故障 S_1 区域边界 E 点)

传统穿越策略与增强型策略仿真对比如图 9、10 所示。由于处于可行域严重故障 I 型 S_3 与一般故障 S_1 区域边界，VSG 应在功角 90° 处完成构网同步。故障阶段 VSG 输出的有功功率约为 0.12 pu ，有功

功率参考最小值约为 0.18 pu ，故障恢复时功角约为 72° ，已接近故障穿越可行域边界 E 点的临界构网特性。尽管在故障阶段没有功角失稳，但相比于正常运行时的 34° ，功角增加相对较大，故障恢复阶段对电网冲击较大，最大暂态电流约为 1.7 pu ，最大暂态电压约为 1.28 pu ；而增强型穿越策略在 1.0038 s 识别出故障， 1.042 s 进行故障期间记忆 $P_0=0.1\text{ pu}$ ， $Q_0=0.4\text{ pu}$ ，故障期间 VSG 功角由正常运行时的 34° 恢复至 38° ，故障期间最大暂态电流约为 1.5 pu ，稳态电流 1.5 pu ，动态限幅电压控制器表现为无功控制特性，动态限幅将 VSG 无功限制在 0.76 pu 。2.02 s 时系统识别出故障清除，恢复阶段，VSG 电压最大值为 1.18 pu ，恢复相对平稳。仿真

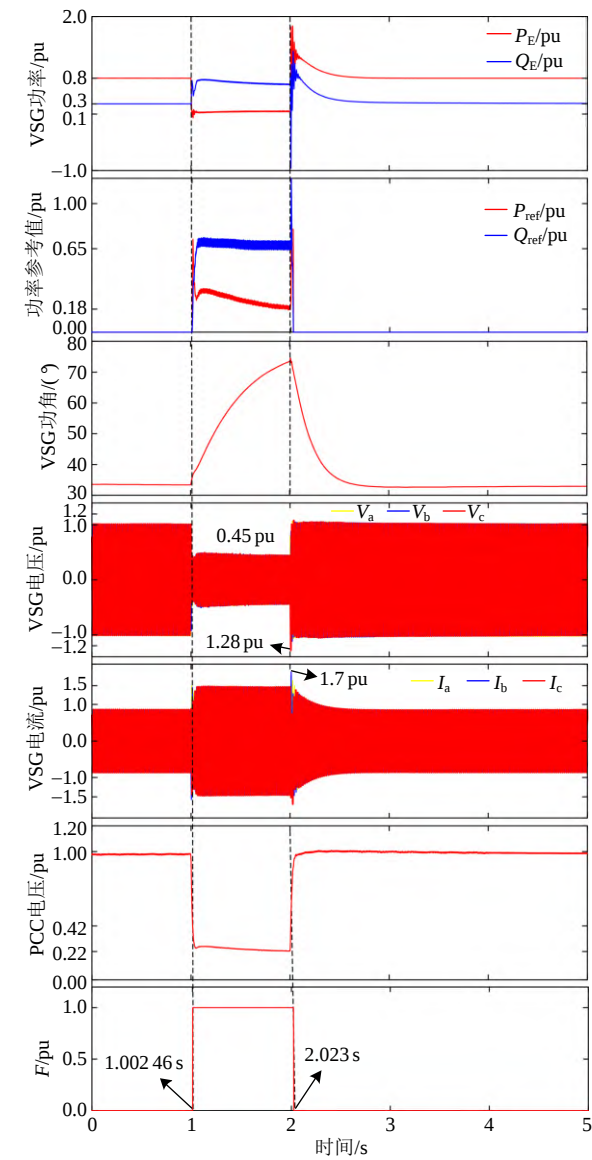


图 9 传统故障穿越策略仿真图形(案例 1)

Fig. 9 Simulation curve of traditional fault ride through strategy of VSG during fault period

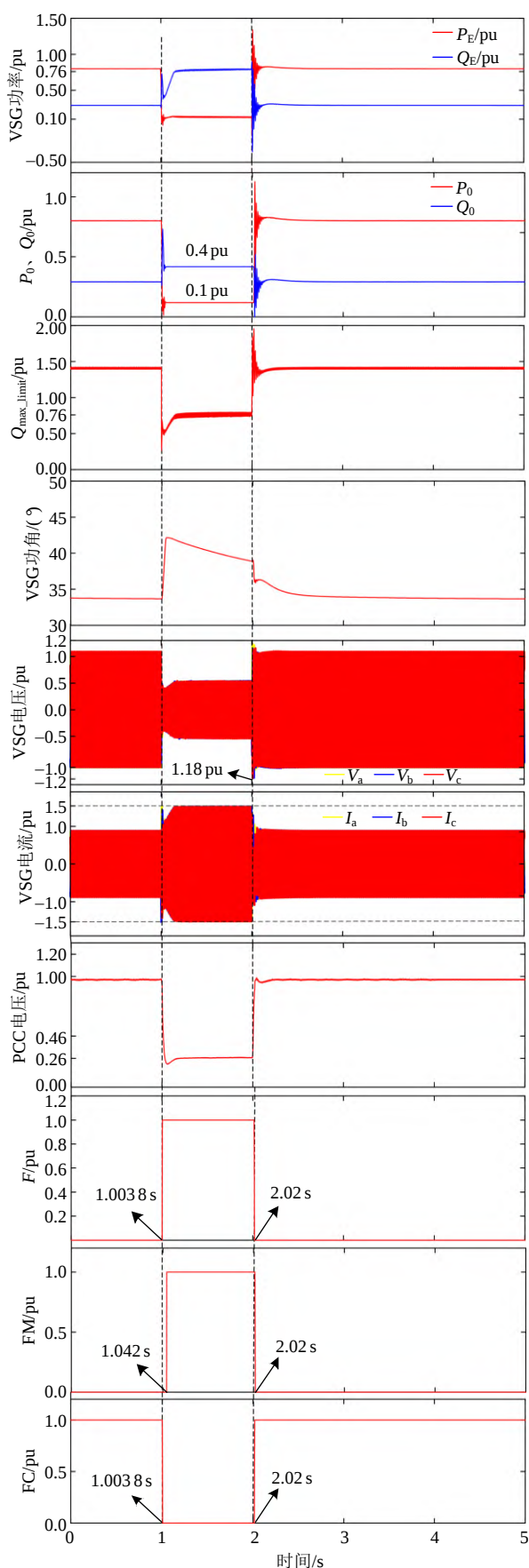


图 10 DLVC-FRT 增强型穿越策略仿真图形(案例 1)

Fig. 10 Simulation curve of enhanced fault ride through strategy of VSG during fault period

验证了故障穿越可行域边界上临界构网特性，同时，也表明增强型 VSG DLVC-FRT 增强型穿越策略在故障穿越可行域边界上的优越、有效性。

案例 2: $E_t=0.2$ pu、 $X_{ts}=0.7$ pu、 $I_{\max}=1.5$ 。(图 4 严重故障 II 型 S_4 区域内 J 点)

图 11、12 为案例 2 故障场景下传统故障穿越策略与增强型策略仿真对比图。由于处于可行域 J 点，传统穿越策略下 VSG 故障阶段面临构网同步特性丧失及电压支撑能力不足的问题。故障初始阶段，VSG 反复进入故障穿越，PCC 电压在 0.85 pu 处反复波动，功率持续振荡。而后，由于有功参考始终大于输出功率，功角持续增大并导致故障期间 VSG 构网同步失败。而增强型故障穿越策略在故障期间记忆 $P_0=0.22$ pu，故障期间 VSG 功角由正常运行时的 34 恢复至 52°，构网同步成功。DLVC 表现出在 1.5 倍电流限幅内的最大无功支撑。故障期间最大暂态电流约为 1.5 pu，稳态电流 1.48 pu，PCC

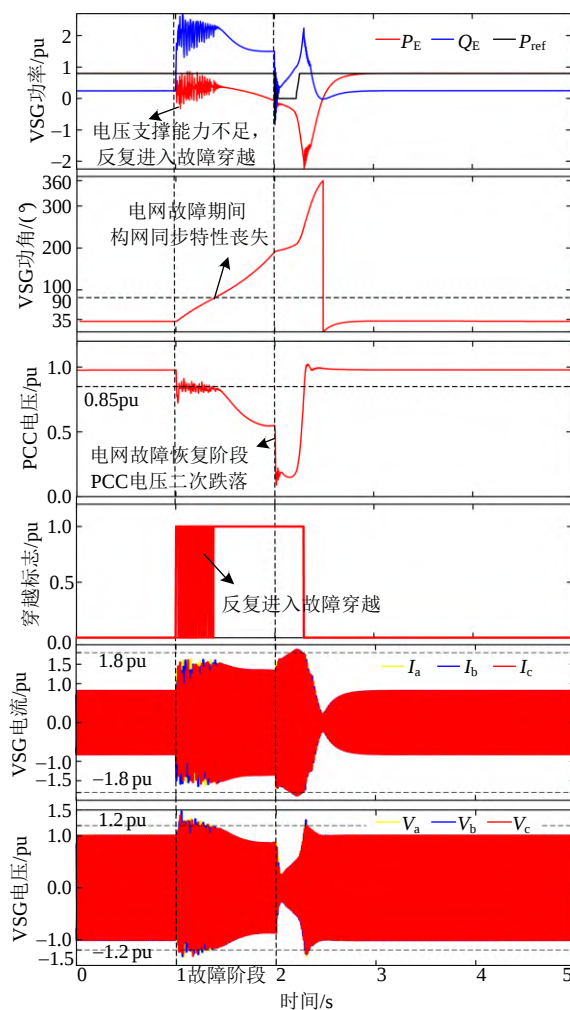


图 11 传统故障穿越策略仿真图形(案例 2)

Fig. 11 Simulation curve of traditional fault ride through strategy of VSG during fault period

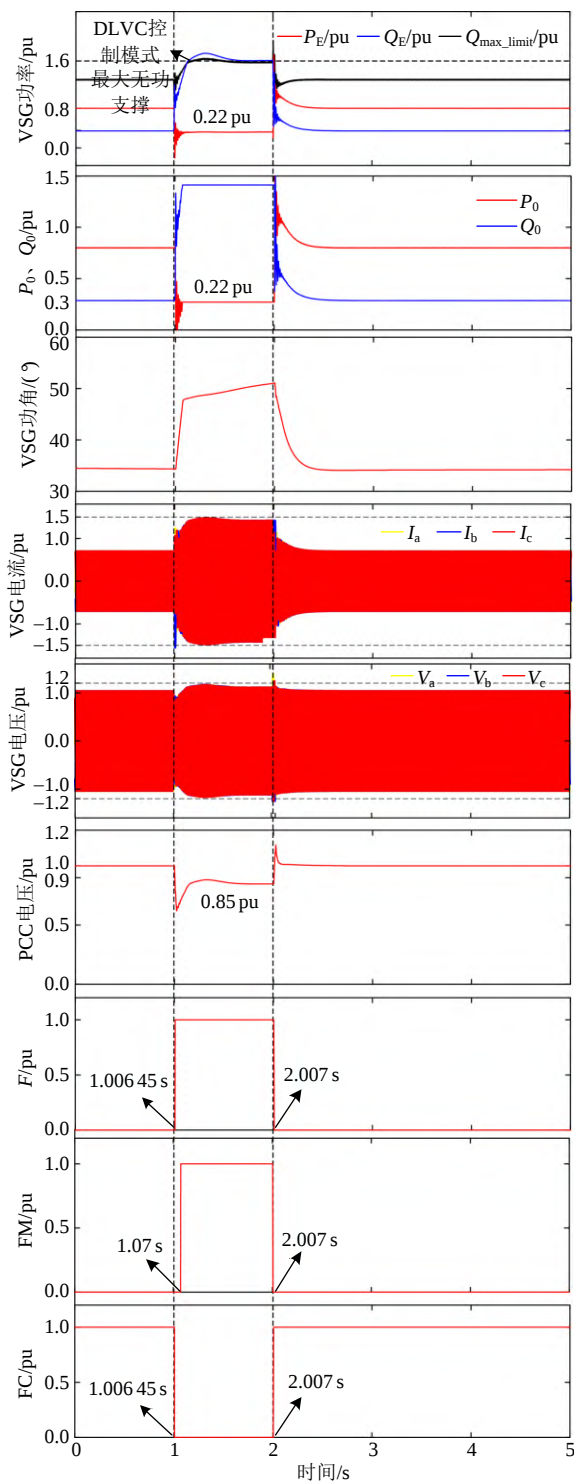


图 12 DLVC-FRT 增强型穿越策略仿真图形(案例 2)

Fig. 12 Simulation curve of enhanced fault ride through strategy of VSG during fault period

处电压为 0.85 pu, 机端电压为 1.08 pu。VSG 没有出现反复进入故障穿越的现象, 体现出良好的构网电压支撑特性。故障恢复阶段, VSG 暂态电压最大值为 1.22 pu, 恢复相对平稳。仿真表明, 采用增强型 VSG 故障穿越策略可以有效填补电网严重故障下传统穿越策略的穿越死区。

案例 3: $E_c=0.4$ pu、 $X_{\Sigma}=0.7$ pu、 $I_{\max}=1.5$ 。(图 4 严重故障 II 型 S_4 区域内 F 点, VSG 并联运行)

为了进一步验证本文所提出的新型穿越策略在并联 VSG 机组故障场景下仍具有可行性, 进行了该场景下的仿真验证, 仿真结果如图 13 所示。其中, 并联 VSG 机组采用自适应虚拟阻抗抑制环流技术^[21], 故障时投入动态限幅电压控制环节中的无功分配系数, 从图 13 可知: 电网故障时, 动态限幅电压控制环节表现出电压控制特性, PCC 电压维持在 0.85 pu 附近, 增强型穿越策略没有影响到并联 VSG 的稳定性, 说明本文所提策略在极弱电网、多机并联故障场景下有效性、可行性。

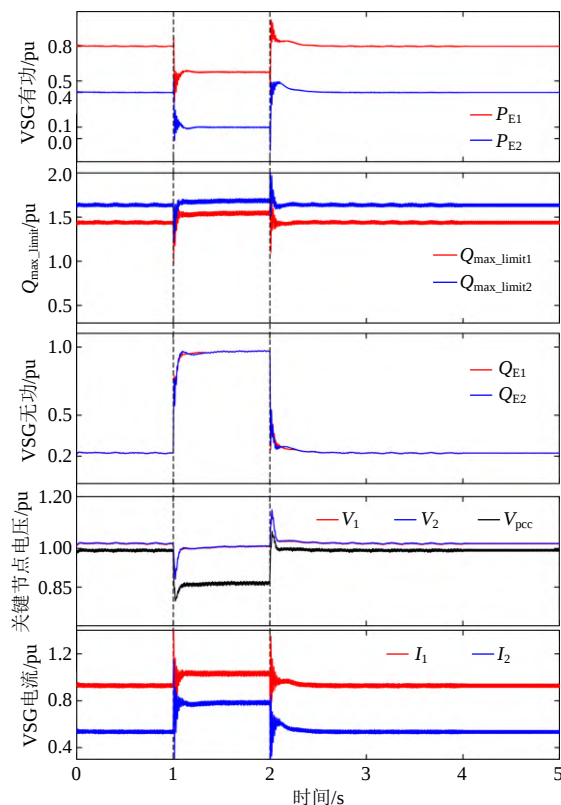


图 13 VSG 并联时 DLVC-FRT 增强型穿越策略仿真示意图

Fig. 13 Simulation curve of enhanced fault ride through strategy of VSG in parallel during fault period

5 结论

1) 本文通过理论推导并建立传统故障穿越策略下 VSG 构网特性表征模型, 并在其基础上, 进一步提出故障穿越可行域的概念以及故障严重程度的界定原则, 明确了传统 VSG 故障穿越策略的适用范围。

2) 针对传统故障穿越无法覆盖全故障场景的问题, 提出一种名为动态限幅电压控制的新型控制

方式, 并在其基础上进一步提出一种增强型 VSG 故障穿越策略。

3) 在 PSCAD/EMTDC 中构建仿真, 分别进行故障穿越可行域边界关系、穿越死区填补有效性的仿真验证, 同时也对 VSG 并联运行场景进行了仿真验证。仿真结果表明, 相比于传统 VSG 故障穿越策略, 本文所提控制策略具有优越性、有效性。

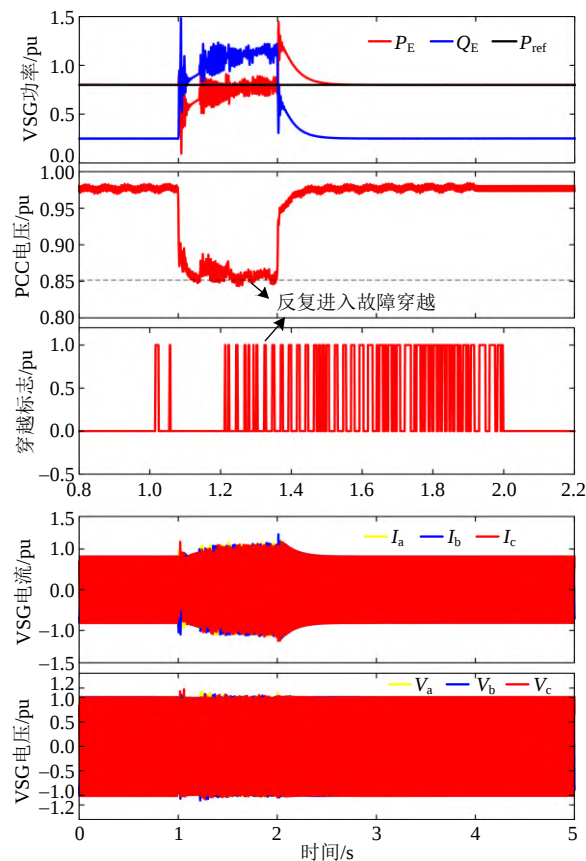
参考文献

- [1] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904(in Chinese).
- [2] 葛路明, 汤涌, 朱凌志, 等. 弱电网下逆变器的虚拟节点电压反馈控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(21): 8392-8405.
GE Luming, TANG Yong, ZHU Lingzhi, et al. Virtual node voltage feedback control scheme for inverter in weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(21): 8392-8405(in Chinese).
- [3] 方正, 黄云辉, 严文博, 等. 构网型变流器功率同步控制稳定性机理分析[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(19): 101-108.
FANG Zheng, HUANG Yunhui, YAN Wenbo, et al. Stability mechanism analysis of power synchronization control for grid-forming converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(19): 101-108(in Chinese).
- [4] 刘辉, 于思奇, 孙大卫, 等. 构网型变流器控制技术及原理综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 277-296.
LIU Hui, YU Siqi, SUN Dawei, et al. An overview of control technologies and principles for grid-forming converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 277-296(in Chinese).
- [5] 李华, 高怀正, 郝悦, 等. 基于虚拟同步发电机低电压穿越的无缝切换控制策略[J]. 太阳能学报, 2021, 42(3): 114-120.
LI Hua, GAO Huaizheng, HAO Yue, et al. Seamless switching control strategy for low voltage ride-through based on virtual synchronous generator[J]. Acta Energetica Sinica, 2021, 42(3): 114-120(in Chinese).
- [6] TAUL M G, WANG Xiongfei, DAVARI P, et al. Current limiting control with enhanced dynamics of grid-forming converters during fault conditions[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1062-1073.
- [7] LUO Rui, GAO Houlei, PENG Fang, et al. An adaptive low-voltage ride-through method for virtual synchronous generators during asymmetrical grid faults[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2024, 15(3): 1589-1600.
- [8] 王德胜, 颜湘武, 贾焦心, 等. 永磁直驱风机基于虚拟同步技术的高、低电压连续故障穿越策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2164-2174.
WANG Desheng, YAN Xiangwu, JIA Jiaoxin, et al. High/low voltage continuous fault ride through strategy of PMSGs based on virtual synchronization technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2164-2174(in Chinese).
- [9] 邢鹏翔, 贾璇悦, 许长清, 等. VSG 低电压穿越的特性分析及控制方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(8): 130-137, 143.
XING Pengxiang, JIA Xuanyue, XU Changqing, et al. A study on characteristic analysis and control methods of low voltage ride through for the VSG[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(8): 130-137, 143(in Chinese).
- [10] 梁帅, 姚良忠, 徐箭, 等. 基于电力电子变换器虚拟同步构网控制的电力系统暂态稳定极限提升方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(8): 2911-2924.
LIANG Shuai, YAO Liangzhong, XU Jian, et al. Power system transient stability limit enhancement method based on virtual synchronous grid-forming control of power electronic converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(8): 2911-2924(in Chinese).
- [11] 李清辉, 葛平娟, 肖凡, 等. 基于功角与电流灵活调控的 VSG 故障穿越方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2071-2080.
LI Qinghui, GE Pingjuan, XIAO Fan, et al. Study on fault ride-through method of VSG based on power angle and current flexible regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2071-2080(in Chinese).
- [12] KUN Sun, WEI Yao, WEN Jinyu, et al. A two-stage simultaneous control scheme for the transient angle stability of VSG considering current limitation and voltage support[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(3): 2137-2150.
- [13] HUANG Linbin, XIN Huanhai, WANG Zhen, et al. Transient stability analysis and control design of droop-controlled voltage source converters considering current limitation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 578-591.
- [14] ZHUANG Kehao, XIN Huanhai, HU Pengfei, et al. Current saturation analysis and anti-windup control design of grid-forming voltage source converter[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(4): 2790-2802.

- [15] ROKROK E, QORIA T, BRUYERE A, et al. Transient stability assessment and enhancement of grid-forming converters embedding current reference saturation as current limiting strategy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(2): 1519-1531.
- [16] 王晓寰, 闵帆, 张旭东, 等. 弱电网下基于虚拟同步机的并网逆变器短路电流抑制研究[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(3): 13-22.
- WANG Xiaohuan, MIN Fan, ZHANG Xudong, et al. Research on short circuit current suppression of grid connected inverter based on VSG generators in weak grid[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(3): 13-22(in Chinese).
- [17] ME S P, ZABIHI S, BLAABJERG F, et al. Adaptive virtual resistance for postfault oscillation damping in grid-forming inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(4): 3813-3824.
- [18] LI Zilin, CHAN K W, HU Jiefeng, et al. An adaptive fault ride-through scheme for grid-forming inverters under asymmetrical grid faults[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(12): 12912-12923.
- [19] 吴林林, 赵伟, 徐曼, 等. 考虑风电机组故障穿越特性的电压反复波动机理分析与抑制[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(3): 290-297.
- WU Linlin, ZHAO Wei, XU Man, et al. Mechanism analysis and suppression of repeated voltage fluctuation considering fault ride through characteristics of the wind turbine[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(3): 290-297(in Chinese).
- [20] 管霖, 陈兴望, 雷晟, 等. 多馈入短路比指标的适用范围及其与直流最大传输功率的关系探讨[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 691-697.
- GUAN Lin, CHEN Xingwang, LEI Sheng, et al. Study on applicability of multi-infeed short circuit ratio and its relationship with maximum HVDC available power [J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 691-697(in Chinese).
- [21] 温春雪, 黄耀智, 胡长斌, 等. 虚拟同步发电机接口变换器并联运行虚拟阻抗自适应控制[J]. 电工技术学报, 2020, 35(S2): 494-502.
- WEN Chunxue, HUANG Yaozhi, HU Changbin, et al. Adaptive control of virtual impedance in parallel operation of virtual synchronous generator interface converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S2): 494-502(in Chinese).

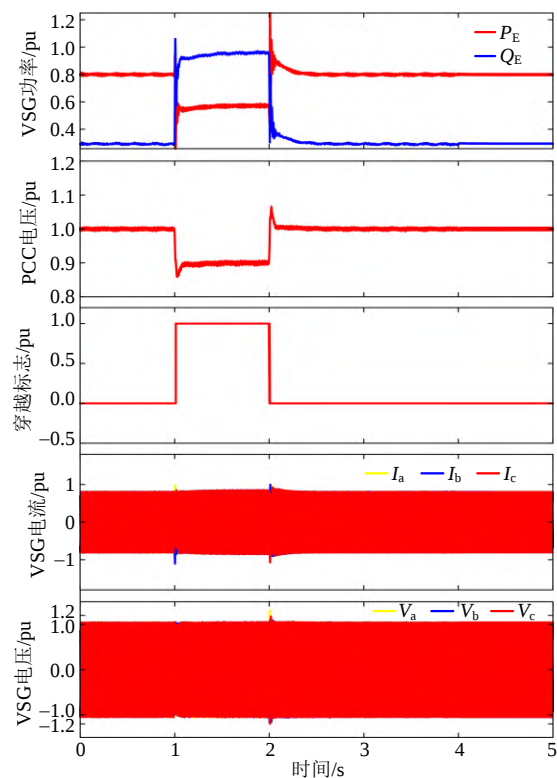
附录A 较严重故障场景下VSG传统穿越策略与增强型穿越策略仿真对比示意图

案例4: $E_t=0.7\text{pu}$ 、 $X_{\Sigma}=0.6\text{pu}$ 、 $I_{\max}=1.5$ 。(图4较严重故障 S_2 区域内 H 点)



图A1 传统故障穿越策略仿真图形(案例4)

Fig. A1 Simulation curve of traditional fault ride through strategy of VSG during fault period



图A2 DLVC-FRT 增强型穿越策略仿真图形(案例4)

Fig. A2 Simulation curve of enhanced fault ride through strategy of VSG during fault period

附录 B 案例 5：不同电流限幅下增强型策略仿真示意图

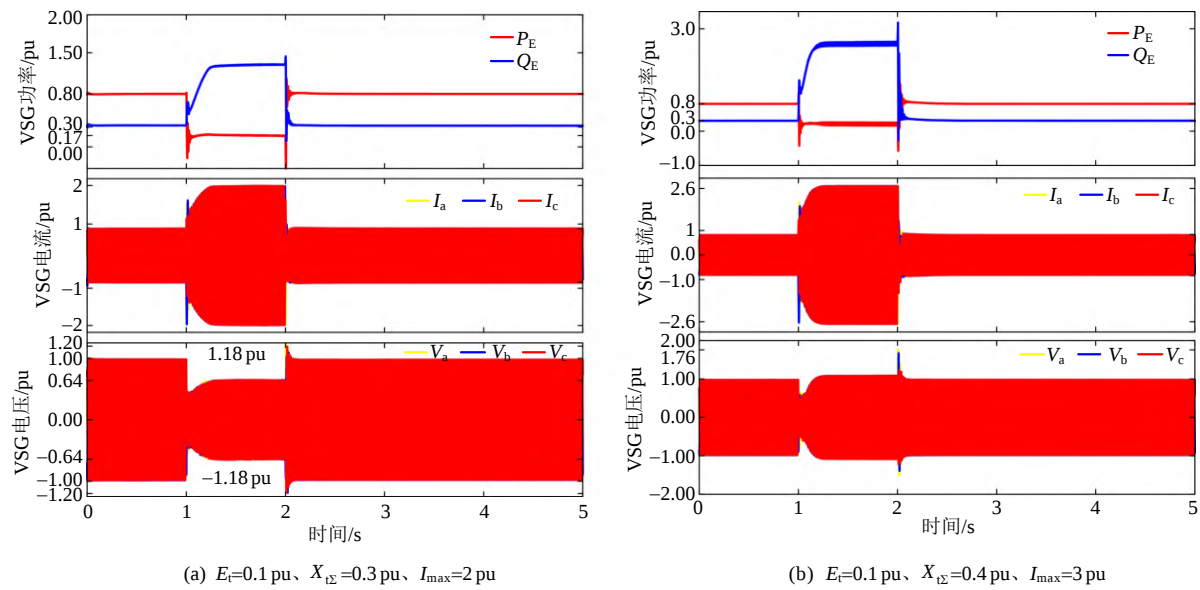


图 B1 不同限流倍数下增强型故障穿越策略仿真图形

Fig. B1 Simulation curve of enhanced fault ride through strategy of VSG under different current limiting

由图 A1、A2 可知：增强型 DLVC-FRT 策略下 VSG 可以有效填补较严重故障场景下故障穿越可行域的死区，进而提升其对电网电压的支撑能力，规避传统穿越策略下 VSG 反复进入^退出穿越的现象出现。

由图 B1 可知：不同电流限幅倍数下增强型 DLVC-FRT 策略下均能表现出很好穿越效果。但电流限幅 3 倍(故障期间机端电压参考上限 1.05 pu)时，VSG 在穿越结束时有机端过电压的情况出现。出于机组安全考虑，极弱电网下建议限流幅值设置不超过额定电流的 2 pu。



裴建楠

在线出版日期：2024-11-01。
收稿日期：2024-06-17。
作者简介：
裴建楠(1988)，男，博士研究生，主要研究方向为储能机理建模及构网能力提升技术，513158450@qq.com；
*通信作者：赵冬梅(1965)，女，教授，博士生导师，主要从事电力系统分析与控制、新能源发电与智能电网等方面的研究工作，zhao-dm@ncepu.edu.cn。

(责任编辑 邱丽萍)

Research on Improving Fault Ride Through Capability of Grid-forming Converter Under Extremely Weak Grid and Severe Fault condition

PEI Jiannan, ZHAO Dongmei*, BAI Junhui, LIU Chongru

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University)

KEY WORDS: grid-forming technology; virtual synchronous generator (VSG); fault ride through; extremely weak grid; large disturbance stability

The virtual synchronous generator (VSG) type Grid-forming technology with external characteristics of voltage source and good weak grid stability has received extensive attention in the industry in recent years because of its advantages of providing inertia and voltage support, and will be an important guarantee for the safe and stable operation of “double high” power system.

This paper first derives and establishes a kind of large disturbance model for Grid-forming converters based on virtual synchronous generator under conventional fault ride-through strategies. This model characterizes the synchronization characteristic with grid, and voltage support properties of grid-forming converters during symmetric grid faults period in very weak grid. Based on this model, the constraints for successful fault ride-through are established from two dimensions, grid synchronization, voltage support.

Subsequently, the concept of the feasible region of grid-forming converters during fault conditions is proposed to quantitatively assess the capability of grid-forming converters to successfully ride through various degrees of grid faults under different strategies and fault ride-through parameters, as shown in Fig. 1.

Furthermore, to address the issue that conventional fault ride-through strategies cannot successfully ride through all fault scenarios, this paper proposes a novel integrated voltage control method. On this basis, an enhanced VSG fault ride-through capability improvement strategy is further proposed. This strategy offers advantages such as the flexibility of near-area

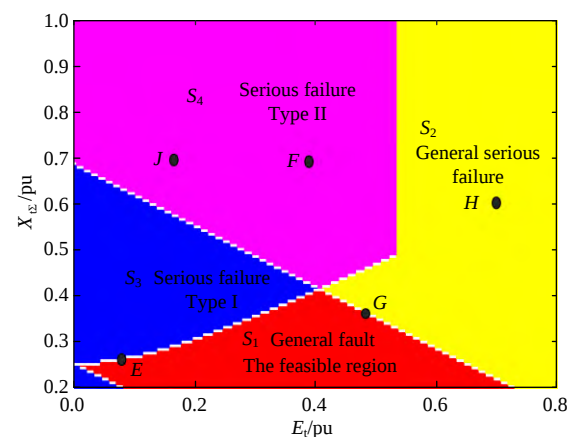


Fig. 1 Diagram of Grid-forming characteristic characterization of VSG under different faults

reactive power and far-area voltage control, autonomous grid synchronization, making it widely applicable. While limiting short-circuit current, this strategy effectively enhances the support capability of grid-forming converters in very weak grid.

Finally, some simulation scenarios are constructed in PSCAD/EMTDC to verify the feasibility of the proposed the VSG feasible region and the effectiveness of the DLVC-based fault ride-through strategy in filling the dead zone of traditional fault ride-through strategy under very weak power grid strength and limiting current amplitude of 1.5 pu condition. The simulation results demonstrate the correctness of the proposed VSG constrained operating area and the effectiveness of the DLVC-based fault ride-through strategy in filling the dead zone of traditional fault ride-through strategy. The simulation results show that compared with the traditional fault ride through strategy, the enhanced fault through strategy proposed in this paper is more suitable for very weak grid scenarios.