

构网型 VSC 暂态稳定机理及改进限幅策略

杜毅¹, 郑超², 孙华东^{2*}

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410082;
2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192)

Transient Stability Mechanism Analysis of the Grid Forming Voltage Source Converter and the Improved Limiting Method

DU Yi¹, ZHENG Chao², SUN Huadong^{2*}

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China;
2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: For the transient stability of the grid-forming voltage source converter (GFM-VSC) system under large disturbances, most existing studies fail to fully consider the fast transient response and control plasticity of power electronic sources. Therefore, this paper takes the GFM-VSC as the object, reveals the difference in transient response mechanism between the GFM-VSC and the SM from an energetic standpoint. With the help of the principle of equal area and phase diagrams methods, the transient stability mechanism of the control-molded GFM-VSC is analyzed. Then, considering the limiter that is easy to trigger under large disturbances, the instability mechanism caused by the failure of the system to exit the current limiting mode is illustrated in detail, and an improved limiting strategy with current distribution coefficient is proposed, which effectively enhances the transient stability of the system. Finally, the correctness of the theoretical analysis and the improved method are verified by simulation.

KEY WORDS: grid forming (GFM) technology; voltage source converter (VSC); transient stability; current limitation; control scheme

摘要: 针对构网型变流器(grid-forming voltage source converter, GFM-VSC)系统在大扰动下暂态稳定问题, 现有研究未能充分考虑电力电子电源暂态快速响应与控制可塑的特点。为此, 以 GFM-VSC 为对象, 借助等面积法原理与相平面图法, 从能量角度揭示了其暂态响应机制与传统同步

基金项目: 中国电力科学研究院有限公司自有资金项目“提升电网安全稳定性和运行效率的新型电力电子设备样机研制”(XT83-22-005)。

Project Supported by the China Electric Power Research Institute (CEPRI) “Development of a Prototype for New Power Electronic Devices to Enhance Grid Safety, Stability and Operational Efficiency” (XT83-22-005).

机系统的差异, 分析了控制塑造下 GFM-VSC 系统的暂态稳定机理; 然后, 针对大扰动下易于触发的限幅环节, 分析了系统无法自主退出限幅而失稳的机制, 并提出了附带电流分配系数的改进限幅策略, 有效增强了系统暂态稳定性。最后, 通过仿真验证了理论分析与改进方法的正确性。

关键词: 构网型技术; 电压源型变流器; 暂态稳定性; 电流限幅环节; 控制策略

0 引言

随着新能源电源的不断发展, 我国电力系统的电源结构发生了显著变化, 传统同步发电设备占比逐渐减小, 而以电压源型变流器(voltage source converter, VSC)接口的电力电子电源渗透率不断升高^[1-2], 进一步挖掘基于 VSC 的电力电子电源的潜能, 是未来电网发展的迫切需要。

目前, 大部分基于 VSC 的新能源发电设备均采用了电网跟踪型(grid following, GFL)控制, 即依赖外部电网提供电压支撑, 基于锁相环采集相位信息, 以此来实现有功和无功功率的调节与控制。虽然 GFL-VSC 可以采用前馈频率偏差或电压幅值偏差信号来改进, 实现一定的频率或电压的支撑, 但其本质上仍属于电流源控制模式(current control mode, CCM), 不具备提供电压支撑、孤岛运行或黑启动等能力^[3-4]。

近年来, 构网型(grid forming, GFM)技术作为应对系统转型的一种可行方案, 得到了广泛关注^[5-7]。区别于 GFL 控制, GFM 控制本质为电压源控制模式(voltage control mode, VCM), 通过功率同步的方法^[8], 自主形成端口电压幅值与相位, 输

出系统所需功率，实现并网同步运行。这种塑造同步机并网特性的思路，提升了以 VSC 接口的电力电子电源的主动支撑能力，保证了系统稳定研究体系的延续，但因此无法回避传统同步机系统的暂态稳定问题。

目前，针对大扰动下 GFM-VSC 的暂态稳定问题，已有研究团队进行了深入探索^[9-18]。文献[10]利用等面积法，以采用虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)控制的 VSC 为对象，提出一种模式自适应的同步控制策略来增强系统暂态稳定性；文献[11]分析了采用下垂控制的 VSC 在大扰动下的暂态稳定机理，通过调整下垂系数来缩小故障清除角，以此避免系统越过不稳定平衡点后失稳；文献[12]研究了强阻尼 VSG 系统在大扰动下的暂态稳定性，指出了阻尼系数的重要影响；文献[13-14]利用相平面图法，分析了采用各类 GFM 策略的变流器系统在大扰动下的暂态稳定特性；文献[15]利用构建 Lyapunov 函数的方法，探讨 VSG-VSC 系统的暂态稳定域，分析了无功-电压幅值控制对系统暂态稳定性的不利影响；文献[16-18]分析了 VSG 控制中各参数对暂态稳定性的影响，并给出了具体设计方法。上述文献中大多通过是否越过不稳定平衡点来判别稳定性，并以临界切除角为衡量稳定裕度的指标。

此外，考虑电力电子设备的硬件过流能力，实际 GFM-VSC 系统在大扰动下的运行还会受到限幅环节的影响。针对下垂控制的变流器系统，文献[19-21]初步分析了限幅环节导致系统暂态失稳的响应过程，指出了故障清除时间对于暂态稳定性的影响；而文献[22]利用 sigmod 函数模拟限幅环节，构建了系统能量函数，分析其暂态稳定特性。在此基础上，文献[23]进一步研究了限幅环节导致 GFM-VSC 暂态失稳的过程，提出了附加锁相环的改进方案。虽然附加锁相环保证了故障期间的同步运行，但对故障清除时间有了更严格的要求，并且模式切换时仍有过流风险。文献[24]提出了利用电压限幅的思路，使 GFM-VSC 在大扰动下不会退化至 CCM 运行，避免了模式切换，提高了系统的暂态稳定性。

综上，针对 GFM-VSC 系统在大扰动下的暂态稳定问题，考虑现有研究未能突出电力电子电源暂态快速响应与控制可塑的特点；对于大扰动下易于触发的限幅环节，也未阐明其恶化系统暂态稳定的

机理。为此，本文基于 GFM-VSC 的暂态响应机制，利用等面积法原理与相平面图法，揭示其与传统同步机在暂态稳定性上的差异；在此基础上，分析限幅导致系统暂态失稳的原因，通过对扰动下 dq 轴电流分配的影响机制分析，提出一种附带电流分配系数的改进限幅方案，有效地增强了系统暂态稳定性。最后，通过仿真验证了本文理论分析与改进方法的正确性。

1 构网型 VSC 系统模型

1.1 构网型 VSC 系统的拓扑结构

图 1 给出了 GFM-VSC 并网系统的简化示意图，其具体包含了交流电网及传输线路、构网型变流器以及直流设备 3 个部分。

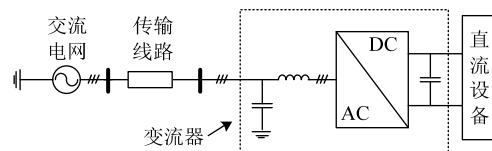


图 1 GFM-VSC 并网系统的简化示意图

Fig. 1 Simplified diagram of the grid-tied GFM-VSC system

GFM-VSC 系统的具体拓扑结构及控制环节如图 2 所示。其中， $u_{g,abc}$, $i_{g,abc}$ 分别为网侧电压、电流； $u_{VSC,abc}$, $i_{VSC,abc}$ 分别为 VSC 输出电压、电流； e_{abc} 为 VSC 内电势； $i_{L,abc}$ 为电感电流； u_{dc} , i_{dc} 分别为直流电压、电流； Z_{Line} 为线路传输阻抗； L_1 , R_1 及 C_1 为 VSC 输出滤波器参数； C_{dc} 为直流母线电容； L_2 , C_2 及 C_3 为 DC/DC 变换器参数。控制系统中， P_{N1} , Q_{N1} 分别为 GFM-VSC 额定有功与无功功率； u_{ref} , U_{ref} 分别为 GFM-VSC 输出参考电压及对应幅值； i_{Lref} 为 GFM-VSC 内环电流参考值； P_{N2} 为储能额定功率； u_{dcN} 为直流母线额定电压； u_{dcref} , i_{dcref} 分别为直流电压、电流参考值。

为简化分析，假设输电线路阻抗中 $X \gg R$ ，以网侧电压为参考，由图 2 可知，GFM-VSC 通过线路向电网注入有功功率 P_T 与无功功率 Q_T ：

$$\begin{cases} P_T = \frac{3}{2} \frac{U_{VSC} U_g}{X_L} \sin(\delta_{VSC}) \\ Q_T = \frac{3}{2} \frac{U_{VSC}}{X_L} (U_{VSC} - U_g \cos(\delta_{VSC})) \end{cases} \quad (1)$$

式中： U_{VSC} 与 U_g 分别为 GFM-VSC 端口电压与网侧电压幅值； X_L 为输电线路电抗； δ_{VSC} 为 GFM-VSC 端口电压相位。

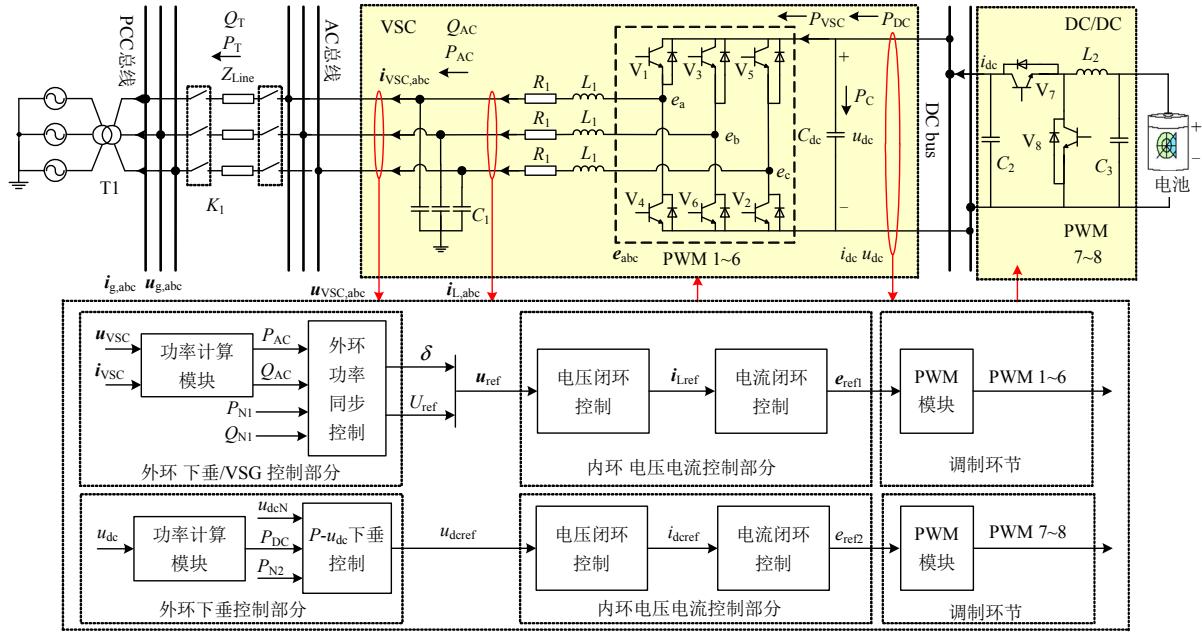


图 2 GFM-VSC 系统拓扑结构及控制策略

Fig. 2 Topology and control scheme of the GFM-VSC system

1.2 构网型 VSC 控制部分

目前, 适用于并网变流器的 GFM 策略主要有下垂控制、VSG 控制, 以及相关衍生改进控制, 如变更下垂量、附加虚拟阻抗等^[25]。考虑下垂控制为 VSG 控制的特例, 同时附加滤波器的下垂控制与 VSG 控制数学上完全等价^[14], 故本文主要以 VSG 控制为例展开分析, 其控制策略如图 3 所示。

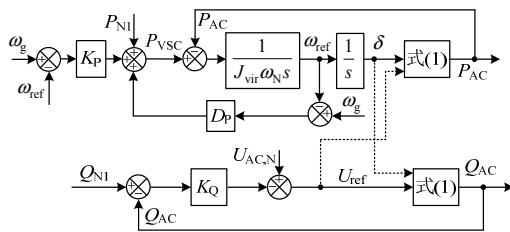


图 3 虚拟同步机控制策略框图

Fig. 3 Control block diagram of the VSG scheme

图 3 中, ω_{ref} 与 ω_g 分别为 GFM-VSC 虚拟角频率与电网侧角频率; D_p 与 J_{vir} 分别为虚拟阻尼与惯量系数; K_p 与 K_Q 分别为有功频率与无功电压下垂系数; $U_{\text{AC},N}$ 与 ω_N 额定交流电压幅值与频率; U_{ref} 与 δ 为 GFM-VSC 端口幅值参考值与虚拟功角。

由图 3 可知, GFM-VSC 系统的输出有功功率 P_{AC} 与无功功率 Q_{AC} 为

$$\begin{cases} P_{\text{AC}} = P_{\text{N1}} - J_{\text{vir}} \omega_N \frac{d\omega_{\text{ref}}}{dt} - K_{\text{AC}} (\omega_{\text{ref}} - \omega_g) \\ Q_{\text{AC}} = Q_{\text{N1}} - K_Q (U_{\text{ref}} - U_{\text{AC},N}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: 定义交流调节系数为 K_{AC} , $K_{\text{AC}} = K_p + D_p$; 定

义不含虚拟惯量部分的 GFM-VSC 的输入功率为 P_{VSC} , $P_{\text{VSC}} = P_{\text{N1}} - K_{\text{AC}} (\omega_{\text{ref}} - \omega_g)$ 。

1.3 储能 DC/DC 控制部分

图 4 给出了直流侧储能 DC/DC 变流器的控制策略。其中, K_{DC} 为 $P-u_{\text{dc}}$ 调节系数; G_{VCL} 为内环电压控制的闭环传递函数。

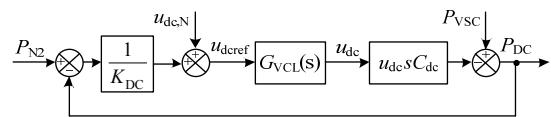


图 4 储能 DC/DC 变流器控制策略框图

Fig. 4 Control block diagram of the DC/DC converter of the energy storage

考虑内环响应速度远大于下垂控制外环, 故假设 $u_{\text{dcref}} = u_{\text{dc}}$, 下垂控制方程如下:

$$\begin{cases} P_{\text{DC}} = P_{\text{N2}} - K_{\text{DC}} (u_{\text{dc}} - u_{\text{dcN}}) \\ P_{\text{DC}} - P_{\text{VSC}} = C_{\text{dc}} u_{\text{dc}} \frac{du_{\text{dc}}}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

由式(2)、(3)可得:

$$0 = (P_{\text{N1}} - P_{\text{N2}}) + C_{\text{dc}} u_{\text{dc}} \frac{du_{\text{dc}}}{dt} - [K_{\text{AC}} (\omega_{\text{ref}} - \omega_g) - K_{\text{DC}} (u_{\text{dc}} - u_{\text{dcN}})] \quad (4)$$

根据式(4)可知, P_{N1} 、 K_{AC} 等虚拟参数的设计与直流侧储能与电容的实际容量、峰值电流等相关; 直流侧储能与电容的容量越大, 则 K_{DC} 与 K_{AC} 可取越大, 其承担扰动的能力越强; 同时, 直流电容越大, 可提供的惯量就越大。

2 构网型 VSC 系统的暂态稳定机理分析

2.1 基于等面积原理分析

考虑 GFM-VSC 的内环控制带宽远大于功率外环控制带宽, 故可近似认为端口电压实际值与参考值等价。由图 2 可知, 在 GFM-VSC 不带本地负载的情况下, 其交流侧输出功率与线路传输功率相同, 可将式(1)代入式(2), 可得:

$$J_{\text{vir}} \omega_N \frac{d\omega_{\text{ref}}}{dt} = P_{N1} - K_{AC} (\omega_{\text{ref}} - \omega_g) - \frac{3}{2} \frac{U_{\text{VSC}} U_g}{X_L} \sin \delta \quad (5)$$

注意, GFM-VSC 系统中虚拟角频率与直流母线电压具有类似响应特性, 控制系统虚拟角频率的失稳也将表现在实际设备直流母线电压的失稳。借助等面积法原理, 定性分析基于储能设备的 GFM-VSC 系统的暂态稳定问题, 具体如下。

图 5 展示了直流设备调节能力较强时, GFM-VSC 在大扰动下的 $P-\delta$ 曲线。其中: 红色实线 $P_{T,N}$ 与黄色虚线 $P_{T,F}$ 分别表示额定与扰动状态下 GFM-VSC 对电网的传输功率曲线; 蓝色实线 P_{VSC} 前述已定义。分阶段对 GFM-VSC 的暂态响应过程分析。

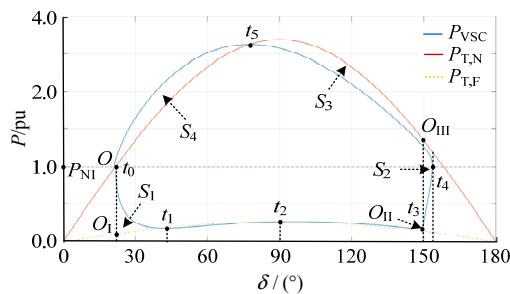


图 5 GFM-VSC 系统的 $P-\delta$ 曲线

Fig. 5 $P-\delta$ curves of the GFM-VSC system

1) t_0 时刻: 电网电压暂降, 所需传输功率由 O 点跌落至 O_I 点, 此时输入功率 P_{VSC} 与传输功率 P_T 不相等, 进入暂态过程。

2) t_0-t_1 阶段: 按照控制设计, P_{VSC} 大于 P_T , 导致 ω_{ref} 上升; 同时, ω_{ref} 的增大使 δ 增大, 进而 P_T 按 $P_{T,F}$ 曲线变化; 在 t_1 时刻, P_{VSC} 与 P_T 相等, 故 P_{VSC} 与 $P_{T,F}$ 形成加速面积 S_1 。

3) t_1-t_3 阶段: 由于 t_1 时刻, ω_{ref} 仍大于电网频率, 故 δ 会进一步增大, 同时 P_{VSC} 会随之响应完成跟踪; 若故障一直不清除, 则 P_{VSC} 会随 $P_{T,F}$ 曲线一直振荡下去。

4) t_3-t_4 阶段: 在 t_3 时刻故障清除, P_T 由 O_{II}

点突变至 O_{III} 点; 此时, P_{VSC} 小于 P_T , 导致 ω_{ref} 开始下降, 调整 P_{VSC} 跟踪 P_T , 并在 t_4 时刻, ω_{ref} 恢复至电网频率, P_{VSC} 与 $P_{T,N}$ 形成减速面积 S_2 。

5) t_4-t_5 阶段: 在 t_4 时刻, P_{VSC} 仍小于 P_T , 导致 ω_{ref} 会继续下降, 并在 t_5 时刻, 使 P_{VSC} 与 P_T 相等, P_{VSC} 与 $P_{T,N}$ 继续形成减速面积 S_3 。

6) t_5-t_0 阶段: 在 t^5 时刻, 由于 ω_{ref} 小于电网频率, δ 会进一步减小; 这使得 P_{VSC} 大于 P_T , 导致 ω_{ref} 开始增大, P_{VSC} 与 $P_{T,N}$ 形成加速面积 S_4 , 最终 δ 回到稳态运行点。

上述分析考虑了直流侧调节能力充足时, GFM-VSC 在大扰动下的暂态响应过程, 进一步降低直流侧设备调节能力, 可得图 6。

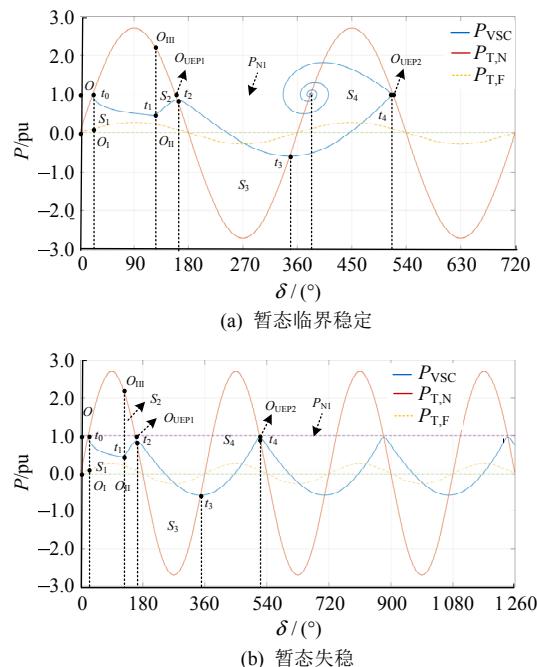


图 6 临界状态下的 GFM-VSC 系统的 $P-\delta$ 曲线对比

Fig. 6 Comparison of $P-\delta$ curves of the GFM-VSC system at critical state

图 6 对比了 GFM-VSC 暂态临界稳定与失稳的 $P-\delta$ 曲线。结合前述分析, 由图 6(a)可知, 在 t_0-t_1 阶段, P_{VSC} 与 $P_{T,F}$ 形成加速面积 S_1 ; 在 t_1-t_2 阶段, P_{VSC} 与 $P_{T,N}$ 形成减速面积 S_2 , 注意在 t_2 时刻已越过不稳定平衡点 O_{UEP1} ; 在 t_2-t_3 阶段, P_{VSC} 与 $P_{T,N}$ 形成加速面积 S_3 , VSC 反向输出功率; 在 t_3-t_4 阶段, P_{VSC} 与 $P_{T,N}$ 形成减速面积 S_4 ; 在 t_4 时刻, ω_{ref} 已减速至电网频率, 由于 P_T 大于 P_{VSC} , 将使 ω_{ref} 减小, 进而 δ 开始减小, 进入前述图 5 的过程, 最终在周期平衡点稳定。

对比图 6(b)可知, 在 t_0-t_4 阶段, 由于系统形

成的加速面积大于减速面积, 导致 ω_{ref} 未能在 O_{UEP2} 前, 减速至电网频率以下, 故越过 O_{UEP2} 后, 会继续形成加速面积, 进而造成虚拟角频率与功角振荡失稳, 其体现在直流侧也会使直流侧电压不断振荡, 无法回到额定状态。

利用等面积法原理判别系统稳定, 主要取决于加减速面积形成的能力平衡; 若能根据系统输入功率、传输功率与功角的关系, 得到 $P-\delta$ 曲线, 即可利用等面积法原理来定性分析系统暂态稳定性; 若计及直流侧能量不足或其他快速控制带来的非线性影响, 而无法得到输入与传输功率的解析表达时, 借助仿真方式获取 $P-\delta$ 曲线后, 也能利用等面积法原理来进行分析。

2.2 基于相平面图分析

前述分析基于等面积法原理, 直观揭示了 GFM-VSC 的暂态响应机理; 本节进一步借助相平面图法, 量化关键参数对于 GFM-VSC 暂态稳定特性的影响。结合前述控制方程与拓扑结构可得 GFM-VSC 的状态方程模型, 其推导过程见附录 B (式(B1)–(B4))。

图 7(a)为不同故障清除时间(t_c)下的 ω - δ 相平面图。由图 7(a)可知, 系统初始运行于稳定平衡点 O_{SEP1} 。随着 t_c 的增大, 若故障清除后, ω_{ref} 可以在 O_{UEP1} 前减速至 ω_g 以下, 则会返回到 O_{SEP1} ; 反之, δ 会越过 O_{UEP1} , 在下一个周期平衡点 O_{SEP2} 恢复稳定。

图 7(b)为不同虚拟惯量系数(J_{vir})下的 ω - δ 相平面图。由图 7(b)可知, 随着 J_{vir} 的增大, 在故障发生与清除的瞬间, ω_{ref} 的初始变化速度逐渐减缓; 而在系统恢复阶段, 虽然 GFM-VSC 仍可恢复至 O_{SEP1} 运行, 但是 ω_{ref} 与 δ 均需要经过长期振荡才能恢复稳态, 恶化了其暂态调节性能。

图 7(c)为不同交流调节系数(K_{AC})下的 ω - δ 相平面图。由图 7(c)可知, 随着 K_{AC} 的减小, GFM-VSC 跟踪系统所需传输功率的能力变弱, 造成加速面积变大, 进而 ω_{ref} 与 δ 均变大; 当 K_{AC} 降低至 400 时, δ 已会越过 O_{UEP1} , 但经过振荡后, 仍能恢复至周期平衡点 O_{SEP2} ; 进一步下调 K_{AC} 至 200 后, 可以看出 δ 越过 O_{UEP1} 后会不断加速, 系统振荡失稳。

除此之外, 利用系统状态方程还可以分析系统其他参数对暂态稳定性的影响, 本文不再赘述。综上可知, 与传统同步机相比, GFM-VSC 具备以下特点。

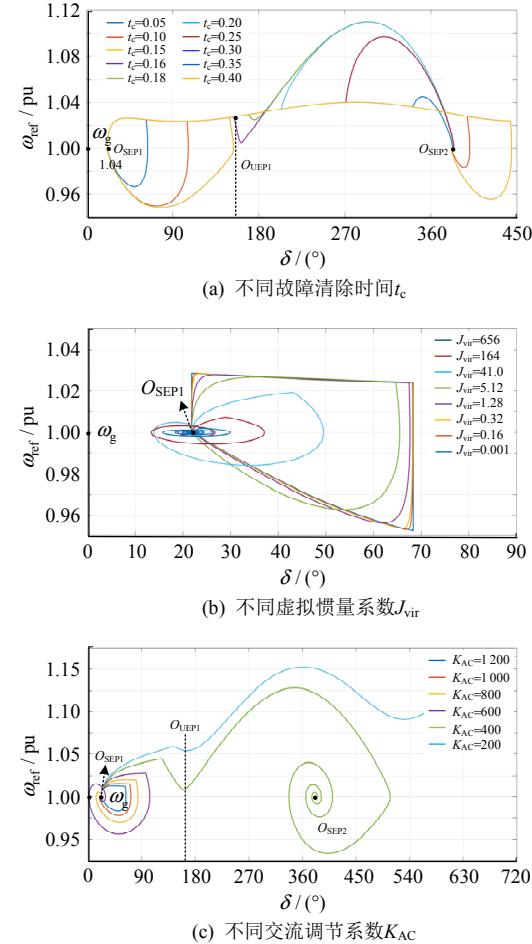


图 7 GFM-VSC 系统的 ω - δ 相平面图
Fig. 7 ω - δ phase portraits of the GFM-VSC system

1) GFM-VSC 具有控制可塑性和响应快速性的特点。按照控制设计, GFM-VSC 系统能在暂态下自主响应扰动, 引起加减速面积的差异, 进而影响系统的暂态稳定机理。

2) GFM-VSC 具备周期稳定特性, 故障清除时间并不是决定性影响因素, 越过不稳定平衡点后, 仍可能在下一个周期平衡点恢复稳定。需要指出的是, 该特性需要关注 GFM-VSC 的直流侧系统承受不平衡能量的能力, 保证直流侧电压不越限; 同时, 要求设备自身的短时过流能力足够, 避免扰动过程中触发限幅环节。

3) GFM-VSC 调节系数的增大对系统暂态稳定有显著改善, 但受限于实际直流侧储能设备的峰值电流、容量大小。

3 限幅对暂态稳定性的影响及改进方案

3.1 限幅环节对系统暂态稳定性的影响分析

图 8 给出了 GFM-VSC 的内环控制框图, 红色部分即为内环电流限幅环节, 当扰动导致内环电流

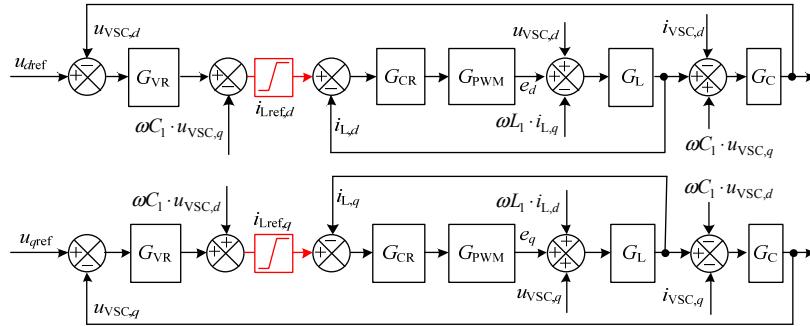


图 8 GFM-VSC 的电压电流内环控制框图

Fig. 8 Voltage and current inner loop control block diagram of the GFM-VSC

幅值 I_L 超过设备所允许的最大值 I_{max} 时, 按照既定上下限进行输出。

图 8 中, 典型的限幅环节^[17-21]如下所示:

$$\begin{cases} i_{L,ref,d}^* = \min(I_{max}, i_{L,ref,d}) \\ i_{L,ref,q}^* = \min(\sqrt{I_{max}^2 - (i_{L,ref,d}^*)^2}, i_{L,ref,q}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $i_{L,ref,d}^*$, $i_{L,ref,q}^*$ 分别为通过限幅环节后的电流内环参考值; I_{max} 为设备允许最大电流幅值。

由图 8 与前述分析可知, dq 轴电流分别为

$$\begin{cases} i_{L,d} = i_{VSC,d} = \frac{U_g}{X_L} \sin \delta \\ i_{L,q} = i_{VSC,q} + \omega C_1 U_{ref} = \\ \frac{1}{X_L} (U_{ref} - U_g \cos \delta) + \omega C_1 U_{ref} \end{cases} \quad (7)$$

式中 VSC 的滤波电容 C_1 较小, 可忽略。

图 9 展示了大扰动下 GFM-VSC 内环电流的响应过程。

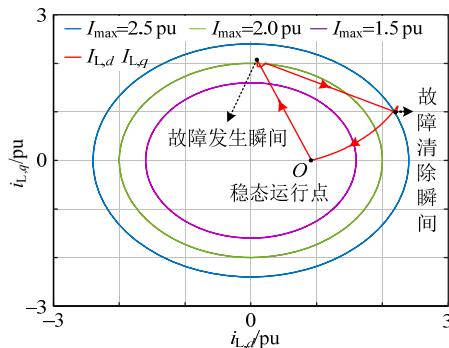


图 9 大扰动下 GFM-VSC 电流内环响应过程

Fig. 9 Response process of current inner loop of the GFM-VSC under large disturbances

图 9 中, 初始状态($i_{L,d}$, $i_{L,q}$)位于稳态点 O , 扰动后($i_{L,d}$, $i_{L,q}$)按红色曲线变化。限幅环节为边界圆, 可以看出随着 I_{max} 的缩小, GFM-VSC 可能在扰动瞬间或持续过程中触发限幅环节, 导致其无法按照

VCM 约束的指令电流输出, 而是转换为 CCM 约束下的限幅电流值运行。

利用式(6)可得限幅约束下的传输功率 $P_{T,CCM}$:

$$\begin{cases} P_{T,CCM} = \frac{3}{2} \frac{U_{VSC,CCM} \rho U_g}{X_L} \sin(\delta_{CCM}) \\ U_{VSC,CCM} = \sqrt{(\rho U_g)^2 - 2\rho U_g X_L I_{max} \sin \delta + (X_L I_{max})^2} \\ \delta_{CCM} = \arctan \frac{X_L (I_{max} \cos \delta)}{\rho U_g - X_L I_{max} \sin \delta} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $U_{VSC,CCM}$, $\delta_{VSC,CCM}$ 分别为 CCM 下的端口电压幅值与相位; ρ 为电网电压故障程度系数。

由式(8)可以得到计及限幅环节影响的 GFM-VSC 系统的 $P-\delta$ 曲线, 如图 10 所示。

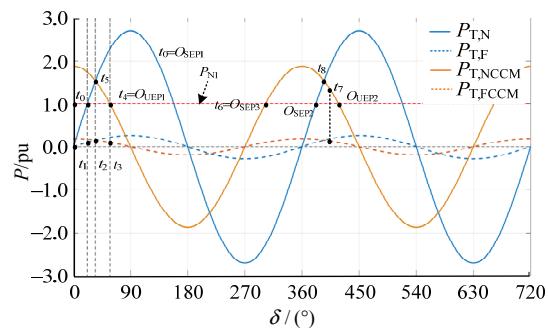
图 10 计及限幅环节影响的 GFM-VSC 系统 $P-\delta$ 曲线Fig. 10 $P-\delta$ curves of the GFM-VSC with the current limiter

图 10 中蓝色实线 $P_{T,N}$ 与虚线 $P_{T,F}$ 分别表示额定与扰动状态下 VCM 的传输功率曲线; 黄色实线 $P_{T,NCCM}$ 与虚线 $P_{T,FCCM}$ 分别表示额定与扰动状态下 CCM 的传输功率曲线。

1) 故障瞬间: 系统由初始运行点 t_0 跌落至 VCM 下 $P_{T,F}$ 曲线上的 t_1 。

2) 故障持续: 由于传输功率突降, 不平衡功率使 ω_{ref} 增大, 进而 δ 上升, 故由 $P_{T,F}$ 曲线上的 t_1

运行至 t_2 ; 此时, 由于触发限幅环节, 线路传输功率由 $P_{T,F}$ 曲线转为 CCM 下 $P_{T,FCCM}$ 曲线; 若故障不清除, 则 GFM-VSC 输出功率会按照 $P_{T,FCCM}$ 曲线持续振荡。

3) 故障清除及恢复。

①若故障在 O_{UEP} 前清除且 GFM-VSC 输入功率在 O_{UEP1} 前恢复至额定功率, 则 δ 会返回 t_5 后, 沿 P_{TN} 曲线回到 O_{SEP1} ; 若 GFM-VSC 输入功率未在 O_{UEP1} 前恢复至额定功率, 则 δ 会越过 O_{UEP1} , 沿 CCM 下 $P_{TN,CCM}$ 曲线运行, 最后被 CCM 下的 O_{SEP3} 吸引无法退出限幅而失稳。

②若故障在 O_{UEP1} 后清除故障, 此时 $P_{T,NCCM}$ 曲线已处于额定功率下方, 故 ω_{ref} 会进一步加速, 同样会被 O_{SEP3} 吸引; 但当故障清除时间延长至 O_{SEP2} 与 O_{UEP2} 之间(如 t_7), 同上述分析, δ 会返回 t_8 后, 沿 P_{TN} 曲线回到周期平衡点 O_{SEP2} 。

综上分析, 受限幅环节影响, GFM-VSC 的暂态稳定性被大幅削弱, 仅在 $O_{SEP1}-O_{UEP1}$ 及后续周期区间可能保证稳定; 一旦越过上述区间, 则会被 CCM 下的异常状态点 O_{SEP3} 吸引无法退出限幅, 导致暂态失稳。

3.2 附加电流分配系数的改进方案

考虑现有限幅环节的设计仅重视了对电流幅值的限制, 而忽视了另一项控制自由度, 即限幅环节中对 d 轴与 q 轴电流的分配。于是, 设计了附加 dq 轴电流分配系数的改进限幅方案, 即在原有限幅环节的基础上, 加入电流分配系数 k_d , 构成新的限幅环节如下:

$$\begin{cases} i_{Lref,d}^* = \min(I_{max} - k_d I_{max}, i_{Lref,d}) \\ i_{Lref,q}^* = \min(\sqrt{I_{max}^2 - (i_{Lref,d}^*)^2}, i_{Lref,q}) \end{cases} \quad (9)$$

图 11 给出了电流分配系数 k_d 对大扰动下 GFM-VSC 系统暂态响应的影响。

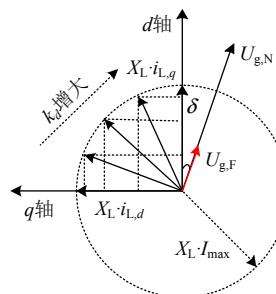


图 11 电流分配系数对暂态过程的影响
Fig. 11 Influence of current distribution coefficient on transient process

由图 11 可以看出, 限幅环节中 I_{max} 决定了边界圆的半径, 即电流有效值的大小; 而 k_d 可以影响 CCM 下输出电流与电压间的相位。

利用式(9)可改写式(8)为附录 B 式(B5)。由式(B5)可以分析 k_d 对 CCM 下系统传输功率曲线的影响, 如图 12 所示。

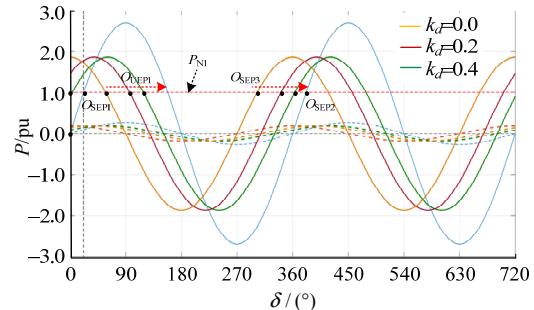


图 12 不同电流分配系数下的 GFM-VSC 系统 $P-\delta$ 曲线
Fig. 12 $P-\delta$ curves of the GFM-VSC system with different values of the k_d

由图 12 可以看出, 附加 k_d 仅影响 CCM 下传输功率的相位, 并不影响有效值; 随着 k_d 的增大, O_{UEP1} 会向右移动, 增大了系统稳定区间; CCM 下的 O_{SEP3} 也向周期平衡点 O_{SEP2} 靠近; 此时, 由于额外分配的 q 轴电流, 使得 GFM-VSC 退出了限幅环节, 恢复至 O_{SEP2} , 保证了系统的稳定运行。

此外, 需要注意 k_d 的取值范围: 当 k_d 取 0 时, 即为典型 d 轴优先电流限幅策略; 考虑不影响 GFM-VSC 的额定运行, k_d 的最大值为

$$k_{dmax} = (I_{max} - i_{LdN}) / I_{max} \quad (10)$$

式中 i_{LdN} 为额定运行下的 d 轴输出电流。

在此区间内, 可考虑 GFM-VSC 承担系统稳态功率波动的能力来选取。即在稳态条件 $\rho=1$ 下, 由系统允许的最大传输功率和虚拟功角位置确定 P_{max} 与 δ_{max} , 将其代入式(B5)可获得 k_d 的相应取值。由此在提升系统暂态稳定性的基础上, 又考虑系统承受功率波动的能力。此外, 也可设计 q 轴电流优先、功角优先等其他限幅策略。

4 仿真验证

4.1 不计限幅环节的 GFM-VSC 系统

为了验证本文机理分析与改进策略的正确性, 按照图 2 所示的 GFM-VSC 系统建立了相应仿真模型, 仿真参数如附表 A1 所示。

图 13 展示了不计限幅环节的 GFM-VSC 系统在大扰动下的暂态响应特性, 分别给出了交流电

网、GFM-VSC 以及储能变流器的相关仿真波形。在初始阶段, GFM-VSC 系统稳态并网运行, 向电网输送的有功功率与无功功率分别为 20 kW 与 0 kVar; 同时, 其输入功率由直流储能系统提供, DC/DC 变流器通过调节直流侧电压为 0.78 kV, 持续输出系统所需有功功率 20 kW。

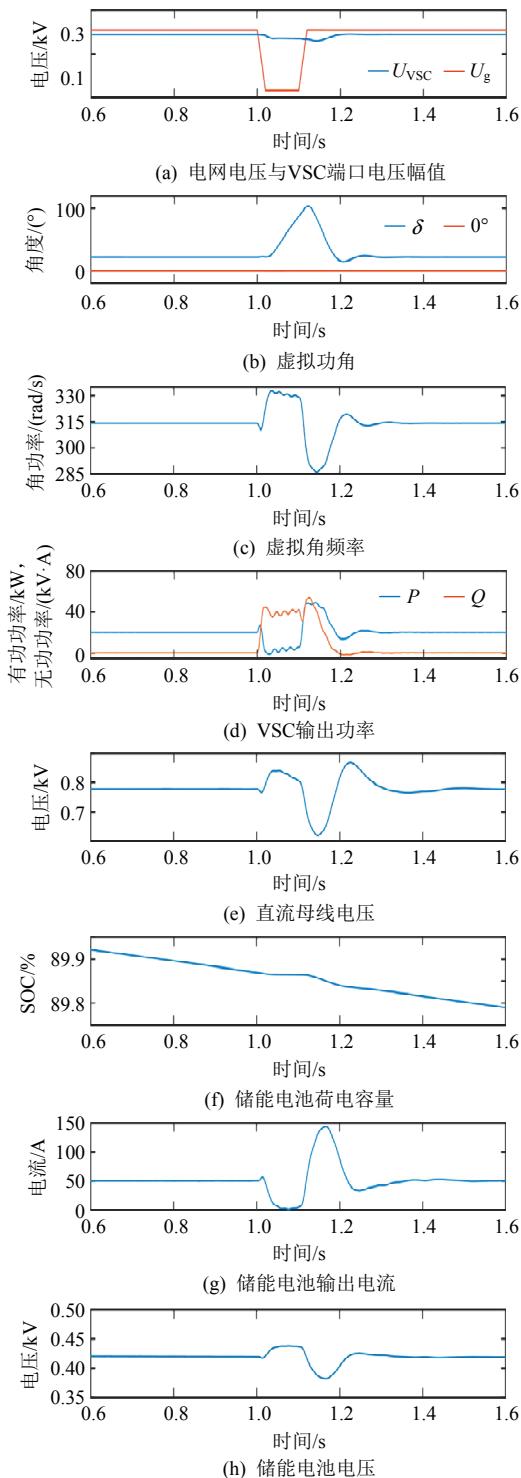


图 13 大扰动下 GFM-VSC 系统的暂态响应仿真波形
Fig. 13 Simulation waveforms of transient response of the GFM-VSC system under large disturbances

由图 13(a)可知, 电网在 1.0 s 发生三相电压跌落, 幅值由 1.0 pu 变为 0.1 pu, 故障持续 0.1 s 后, 电压恢复; 由图 13(b)与(c)可知, GFM-VSC 会基于功率同步调节机制, 在故障期间调节 ω_{ref} 与 δ , 使系统在故障清除后, 保持稳定运行; 由图 13(d)可知, 故障期间 GFM-VSC 的输出有功功率大幅降低, 约为 0 kW, 无功功率按照设定的无功-电压幅值控制输出; 对比图 13(c)与(e)可知, 在暂态期间, GFM-VSC 系统的 ω_{ref} 与 u_{dc} 具有相同的响应特性, 储能 DC/DC 变流器会通过 u_{dc} 的改变, 调节其输出功率, 进而改变输出电流; 具体的能量消耗见储能电池的荷电容量, 如图 13(f)所示。

按照 2 节分析, 降低 K_{AC} 来分析系统在大扰动下的暂态响应变化, 具体波形如图 14 与 15 所示。当 K_{AC} 为 400 时, 由图 14(b)可知, 在故障清除时刻, δ 已越过 UEP, 随后经过控制系统的调节, 穿越负半周后, 振荡恢复至周期平衡点; 图 14(c)与(d)分别给出了 GFM-VSC 系统的输出功率与 ω_{ref}

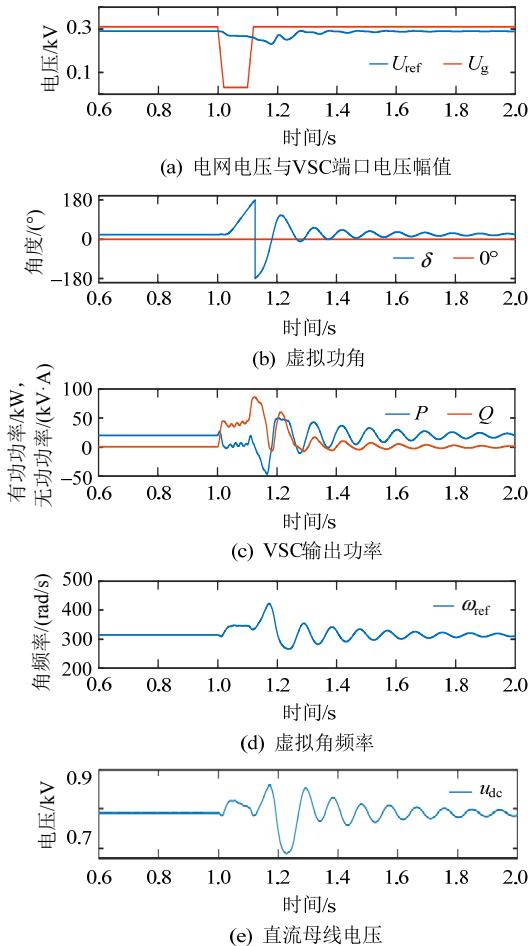


图 14 GFM-VSC 系统暂态响应仿真波形($K_{\text{AC}}=400$)
Fig. 14 Simulation waveforms of transient response process of the GFM-VSC system under $K_{\text{AC}}=400$

的响应过程。再降低 K_{AC} 至 200 后, 由图 15(b)与(d)可以看出在故障清除后, ω_{ref} 持续增大后振荡, δ 也不断加速, 系统暂态失稳。

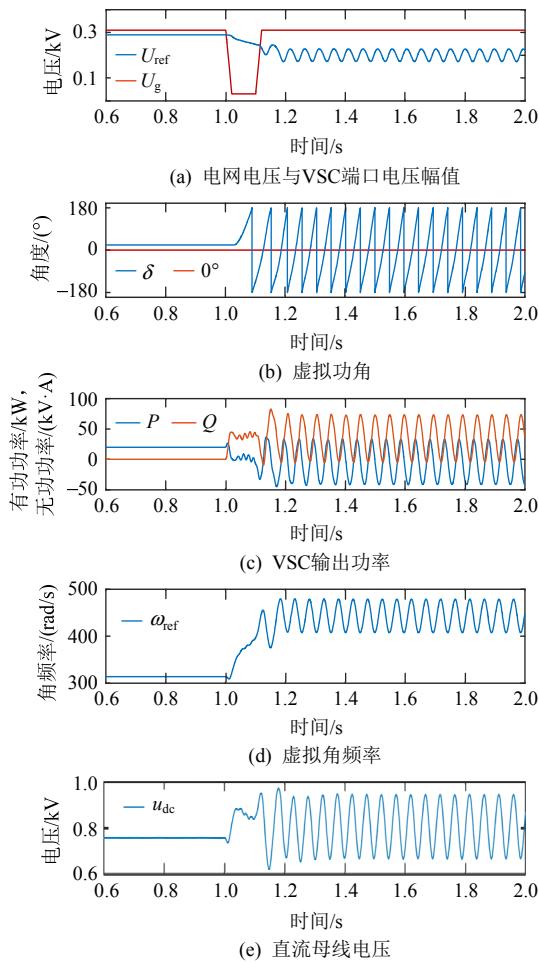


图 15 GFM-VSC 系统暂态响应仿真波形($K_{AC}=200$)
Fig. 15 Simulation waveforms of transient response process of the GFM-VSC system under $K_{AC}=200$

图 13—15 给出了不计限幅影响的 GFM-VSC 在大扰动下的暂态响应仿真波形, 其符合前述定性与定量理论分析的结果, 验证了本文所述 GFM-VSC 系统暂态稳定机理分析的正确性。

4.2 计及限幅环节的 GFM-VSC 系统

设定开关器件所能承受的最大电流值 $I_{max}=1.5I_N=70A$, 附加电流分配系数 $k_d=0.2$ 。

图 16 给出了在故障期间, 计及限幅环节影响的 GFM-VSC 暂态响应仿真波形。由图 16 可知, 在电网电压跌落后, 不平衡功率导致 ω_{ref} 上升, 同时 δ 开始加速, 由于扰动下系统不存在平衡点, 故振荡失稳; 此外, 图 16(d)分别给出了内环电流幅值 I_L , d 轴电流 $i_{L,d}$ 与 q 轴电流 $i_{L,q}$, 可以看出在故障期间, 限幅环节已被触发, 系统虽然可以保持 CCM 安全运行, 但已不具备维持端口电压的能力。

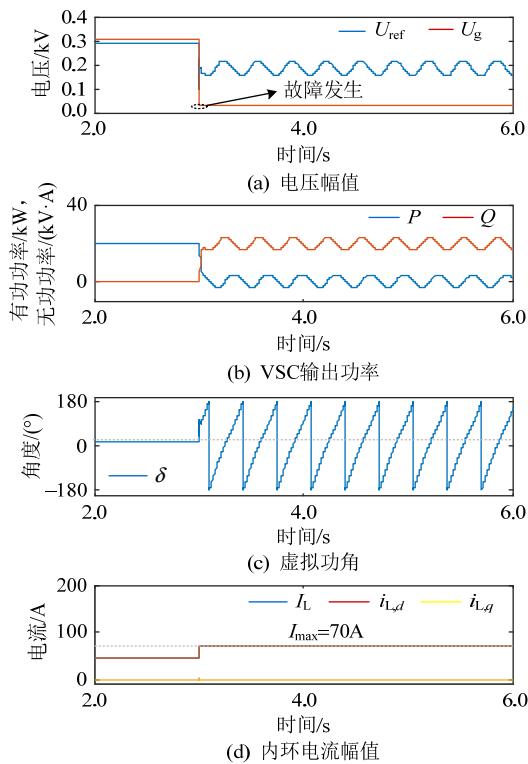


图 16 限幅影响下的 GFM-VSC 暂态响应仿真波形
Fig. 16 Simulation waveforms of transient response of the GFM-VSC with the current limitation

图 17、18 对比了传统限幅策略与改进限幅策略下 GFM-VSC 系统的暂态稳定特性。

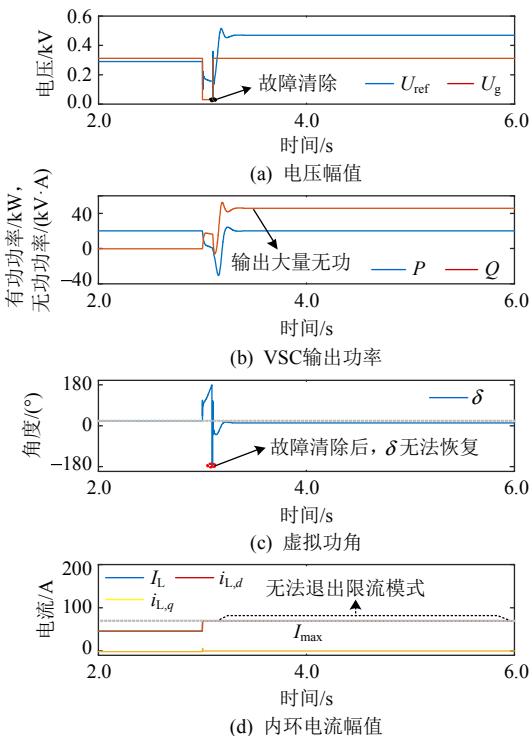


图 17 传统限幅策略下 GFM-VSC 暂态响应仿真波形
Fig. 17 Simulation waveforms of transient response of the GFM-VSC under the traditional limiting scheme

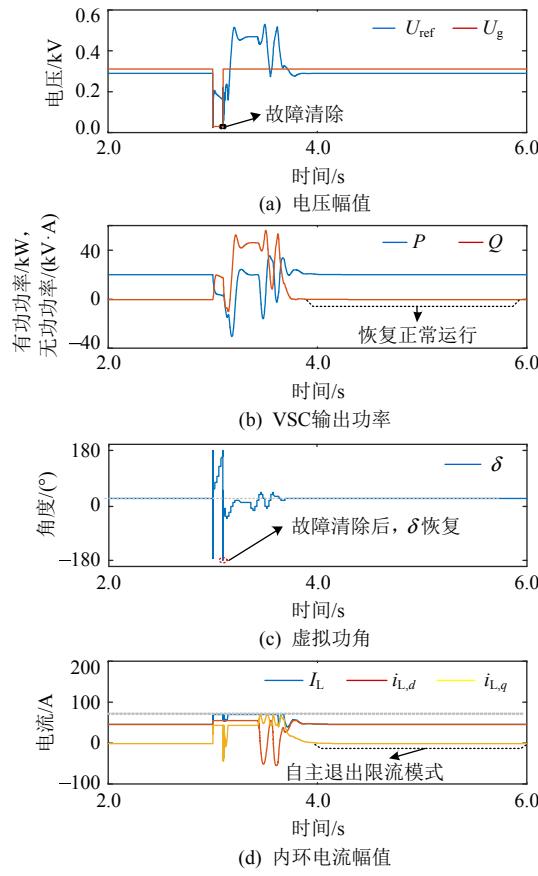


图 18 改进限幅策略下 GFM-VSC 暂态响应仿真波形

Fig. 18 Simulation waveforms of transient response of the GFM-VSC under the improved limiting scheme

由图 17(c)可知, 在故障清除后, GFM-VSC 被 CCM 下 O_{SE_3} 所吸引, 虽然已调整输出有功功率为额定值, 但同时会输出大量无功, 端口电压幅值上升至 1.6 pu, 且无法自主退出限幅环节, 系统暂态失稳。

对比图 18(c)可以看出, 在故障清除后, 改进限幅策略下 GFM-VSC 可由 CCM 自主转换至 VCM 运行, 回到周期稳定平衡点; 由图 18(a)与(b)可知, GFM-VSC 的端口电压与输出功率均已恢复至额定状态。

图 19、20 对比了传统与改进限幅策略, 在电网正常而输出功率波动的工况下, 系统的暂态响应过程。图 19(a)给出了系统工况: 在 1.0~2.0 s 阶段, 设置额定功率 20 kW; 在 2.0~3.0 s 阶段, 额定功率阶跃为 28 kW; 在 3.0~4.0 s 阶段, 系统恢复。由图 19(b)可以看出, 采用传统有功电流优先策略时, 系统进入限幅模式后会被 O_{SE_3} 吸引导致失稳, 无法正常运行; 对比图 20(b), 采用改进策略分配一定无功电流后, 系统能够承受所设置的功率波动, 继续维持 VCM 运行。

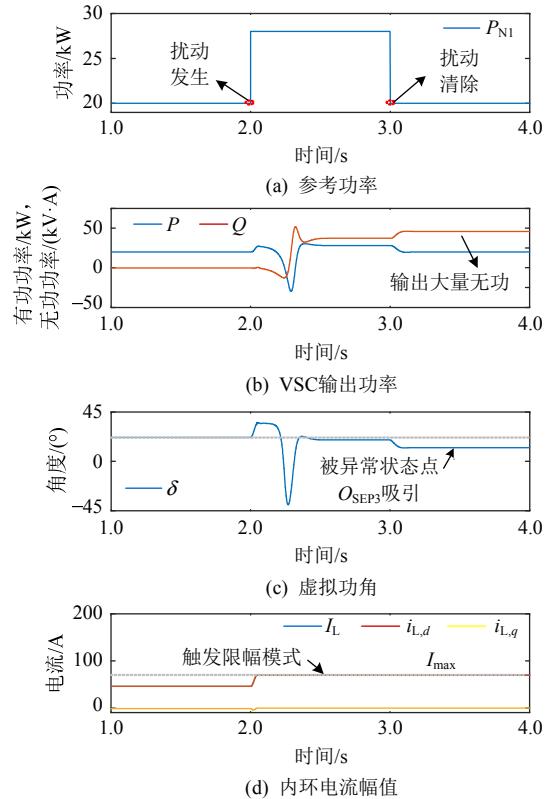


图 19 传统限幅策略下 GFM-VSC 功率波动响应特性

Fig. 19 Power fluctuation characteristics of the GFM-VSC under the traditional limiting scheme

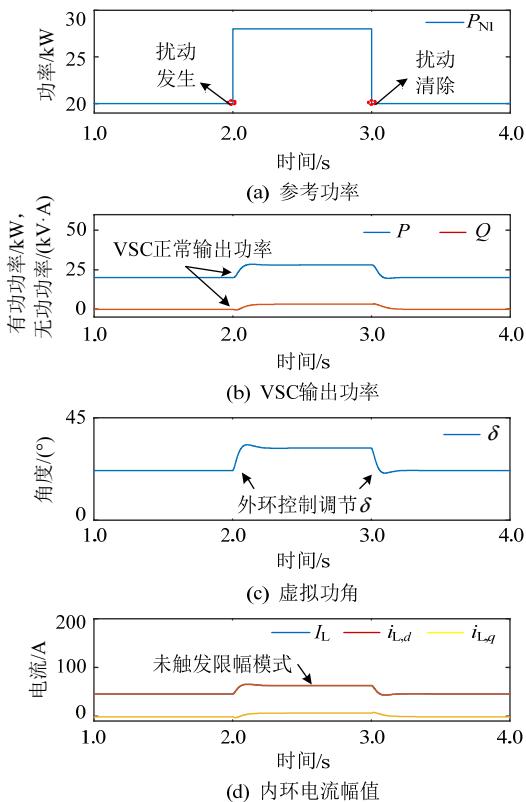


图 20 传统限幅策略下 GFM-VSC 功率波动响应特性

Fig. 20 Power fluctuation characteristics of the GFM-VSC under the improved limiting scheme

图 21 给出了 $k_d=0.1$ 时, 前述工况下 GFM-VSC 的暂态运行效果。由图 21(b)可以看出, 在相同功率波动下, k_d 的降低使系统在扰动期间受到限幅影响, 但仍能恢复稳定; 进一步, 由图 21(d)可以看出, 当波动功率最大值降至 26 kW 时, 系统已经能够在扰动期间维持 VCM 运行。

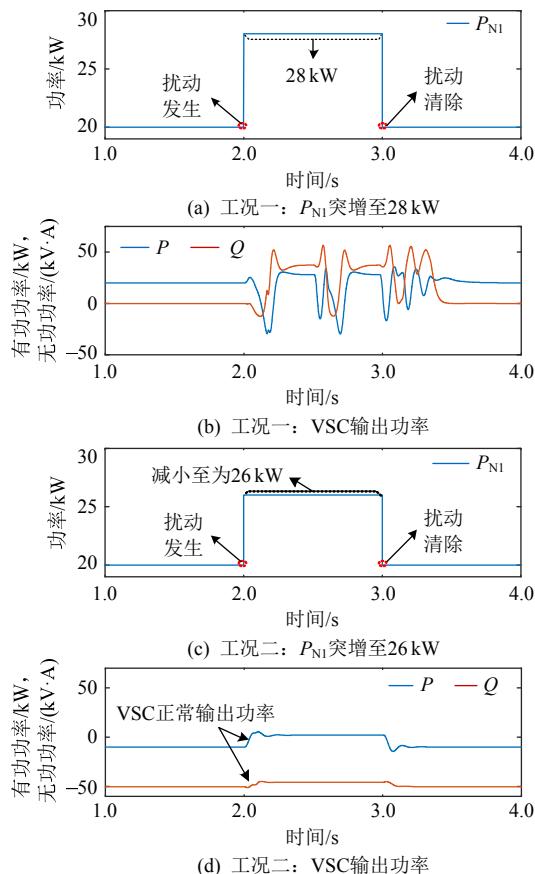


图 21 降低电流分配系数对 GFM-VSC 功率波动响应特性的影响

Fig. 21 Effect of reducing the k_d on the power fluctuation response characteristics of the GFM-VSC

综上, 图 16—21 的仿真结果验证了本文对计及限幅环节影响的 GFM-VSC 的暂态稳定机理分析的正确性以及所提改进限幅策略的有效性。

5 结论

1) 区别于传统同步机, GFM-VSC 系统能够基于直流侧输入能源的特点, 通过控制手段塑造其输出功率外特性, 具备更大参数自由度去改进系统的暂态稳定问题;

2) 限幅环节影响了 GFM-VSC 系统的输出外特性。故障期间, 触发限幅后会导致系统由 VCM 特性被动切换至 CCM 特性, 进而无法维持外环参考电压; 故障清除后, 系统又无法自主退出限幅,

失去了 VCM 的特性, 进而导致暂态失稳;

3) 针对限幅环节导致 GFM-VSC 系统的异常失稳, 通过对故障下 dq 轴电流分配影响机理的分析, 提出了一种附带电流分配系数的改进限幅方法, 有效地增强了系统的暂态稳定性。

参考文献

- [1] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 20-26. CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-26(in Chinese).
- [2] 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(in Chinese).
- [3] 王淑超, 孙光辉, 俞诚生, 等. 光伏发电系统级快速功率调控技术及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(21): 6254-6263. WANG Shuchao, SUN Guanghui, YU Chengsheng, et al. Photovoltaic power generation system level rapid power control technology and its application [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(21): 6254-6263(in Chinese).
- [4] MATEVOSYAN J, MACDOWELL J, MILLER N, et al. A future with inverter-based resources: Finding strength from traditional weakness[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2021, 19(6): 18-28.
- [5] MATEVOSYAN J, BADRZADEH B, PREVOST T, et al. Grid-forming inverters: Are they the key for high renewable penetration?[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2019, 17(6): 89-98.
- [6] ROSSO R, WANG Xiongfei, 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.
- [7] 许洁翊, 刘威, 刘树, 等. 电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3586-3594. XU Jieyi, LIU Wei, LIU Shu, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3586-3594(in Chinese).
- [8] ZHANG Lidong, HARNEFORS L, NEE H P. Power-synchronization control of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Systems,

- 2010, 25(2): 809-820.
- [9] 张宇, 蔡旭, 张琛, 等. 并网变换器的暂态同步稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1687-1701.
- ZHANG Yu, CAI Xu, ZHANG Chen, et al. Transient synchronization stability analysis of voltage source converters: A review[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1687-1701(in Chinese).
- [10] WU Heng, WANG Xiongfei. A mode-adaptive power-angle control method for transient stability enhancement of virtual synchronous generators[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1034-1049.
- [11] QORIA T, GRUSON F, COLAS F, et al. Critical clearing time determination and enhancement of grid-forming converters embedding virtual impedance as current limitation algorithm[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1050-1061.
- [12] 孟志伟, 侯玉强, 方勇杰, 等. 强阻尼电压源型虚拟同步发电机大扰动功角稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 44-50.
- MENG Zhiwei, HOU Yuqiang, FANG Yongjie, et al. Analysis on large disturbance power-angle stability of strong-damping voltage-source virtual synchronous generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 44-50(in Chinese).
- [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] 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.
- [15] SHUAI Zhikang, SHEN Chao, LIU Xuan, et al. Transient angle stability of virtual synchronous generators using Lyapunov's direct method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4648-4661.
- [16] 葛平娟, 涂春鸣, 肖凡, 等. 面向暂态稳定性能提升的VSG参数灵活控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2109-2123.
- GE Pingjuan, TU Chunming, XIAO Fan, et al. Transient stability enhancement of a VSG based on flexible switching of control parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2109-2123(in Chinese).
- [17] 王亚维, 刘邦银, 段善旭, 等. 虚拟同步控制的暂态特性优化策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 5885-5893.
- WANG Yawei, LIU Bangyin, DUAN Shanxu, et al. Research on transient characteristic optimization of virtual synchronization generator control strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 5885-5893(in Chinese).
- [18] 盛万兴, 吕志鹏, 崔健, 等. 虚拟同步机运行区域计算与参数分析[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1557-1565.
- SHENG Wanxing, LÜ Zhipeng, CUI Jian, et al. Operation area calculation and parameter analysis of virtual synchronous generator[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1557-1565(in Chinese).
- [19] XIN Huanhai, HUANG Linbin, ZHANG Leiqi, et al. Synchronous instability mechanism of p-f droop-controlled voltage source converter caused by current saturation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 5206-5207.
- [20] 黄林彬, 章雷其, 辛焕海, 等. 下垂控制逆变器的虚拟功角稳定机理分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 117-123, 150.
- HUANG Linbing, ZHANG Leiqi, XIN Huanhai, et al. Mechanism analysis of virtual power angle stability in droop-controlled inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 117-123, 150(in Chinese).
- [21] 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.
- [22] 赵峰, 帅智康, 彭也伦, 等. 含电流限幅器的逆变器暂态稳定性评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2245-2254.
- ZHAO Feng, SHUAI Zhikang, PENG Yelun, et al. Evaluation method for transient stability of inverter containing current limiter[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2245-2254(in Chinese).
- [23] 姜卫同, 胡鹏飞, 尹瑞, 等. 基于虚拟同步机的变流器暂态稳定分析及混合同步控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 124-133.
- JIANG Weitong, HU Pengfei, YIN Rui, et al. Transient stability analysis and hybrid synchronization control strategy of converter based on virtual synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 124-133(in Chinese).
- [24] CHEN Junru, PRYSTUPCZUK F, O'DONNELL T. Use of voltage limits for current limitations in grid-forming converters[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(2): 259-269.
- [25] MENG Xin, LIU Jinjun, LIU Zeng. A generalized droop control for grid-supporting inverter based on comparison between traditional droop control and virtual synchronous

generator control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5416-5438.

附录 A 系统的具体参数

表 A1 系统具体参数

Table A1 Specific parameters of the system

类别	具体参数
电网侧电路参数	电网电压幅值 $U_g=0.311 \text{ kV}$
	电网电压频率 $f_g=50 \text{ Hz}$
	线路阻抗 $X_L=8 \text{ mH}$
VSC 电路参数	滤波电容 $C_l=20 \mu\text{F}$
储能系统	滤波电感 $L_l=2 \text{ mH}$
	直流电容 $C_{dc}=2000 \mu\text{F}$
	直流母线电压 $U_{dc}=0.8 \text{ kV}$
电路参数	变换器电容 $C_2=C_3=460 \mu\text{F}$
	变换器电感 $L_2=2 \text{ mH}$
	电池端电压 $u_{bat}=0.4 \text{ kV}$
DC/DC 控制	直流设定功率 $P_{N2}=20 \text{ kW}$
	直流调节系数 $K_{DC}=1000$
	直流设定电压 $u_{dcN}=0.8 \text{ kV}$
系统参数	直流电压环控制器 $K_{P,VR2}=0.2; K_{I,VR2}=10$
	直流电流环控制器 $K_{P,CR2}=2; K_{I,CR2}=50$
	DC/DC 开关频率 $f_{S2}=10 \text{ kHz}$
VSC 控制	额定端口电压幅值 $U_{AC,N}=0.29 \text{ kV}$
	额定端口电压频率 $f_N=50 \text{ Hz}$
	额定传输有功 $P_{N1}=20 \text{ kW}$
	额定传输无功 $Q_{N1}=0 \text{ kV}\cdot\text{A}$
	交流调节系数 $K_{AC}=1000$
	虚拟惯量系数 $J_{vir}=0.12$
	无功电压幅值系数 $K_Q=1000$
	交流电压环控制器 $K_{P,VRI}=0.1; K_{I,VRI}=1;$
	交流电流环控制器 $K_{P,CRI}=5; K_{I,CRI}=10;$
系统参数	VSC 开关频率 $f_{S1}=10 \text{ kHz}$

附录 B GFM-VSC 的状态方程推导过程

由图 3 可得:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_{ref} - \omega_g \quad (\text{B1})$$

考虑功率外环响应速度远小于内环响应速度, 由式(1)与(2)可得:

$$\begin{aligned} & U_{ref}^2 + \left(\frac{2}{3} X_L K_Q - U_g \cos \delta \right) U_{ref} - \\ & \frac{2}{3} X_L (Q_{AC,N} + K_Q U_{AC,N}) = 0 \end{aligned} \quad (\text{B2})$$

由式(B2)与初始平衡点可得:

$$U_{ref} = \frac{\frac{4}{9}(X_L K_Q)^2 + U_g \cos \delta - \frac{2}{3} X_L K_Q + \sqrt{(U_g \cos \delta)^2 + \frac{8}{3} X_L Q_N + \frac{4}{3} X_L K_Q (2U_{AC,N} - U_g \cos \delta)}}{2} \quad (\text{B3})$$

设状态变量 $x_1=\delta$, 将式(B1)与(B3)带入式(5)可得:

$$\ddot{x}_1 = A - B\dot{x}_1 - CU_{ref} \sin x_1 \quad (\text{B4})$$

式中: $A=P_{N1}/J_{vir}\omega_N$; $B=D_p/J_{vir}\omega_N$; $C=3U_g/(2J_{vir}\omega_N X_L)$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{T,CCM}^* = \frac{3}{2} \frac{(U_{VSC,CCM}^*)\rho U_g}{X_L} \sin \delta_{CCM}^* \\ U_{VSC,CCM}^* = \sqrt{\frac{(\rho U_g)^2 - 2\rho U_g X_L [(I_{max} - k_d I_{max}) \sin \delta + X_L [(I_{max} - k_d I_{max}) \cos \delta_0 - \sqrt{(2-k_d)k_d I_{max}^2 \sin \delta}]}{\sqrt{(2-k_d)k_d I_{max}^2 \cos \delta} + (X_L I_{max})^2}}} \\ \delta_{CCM}^* = \arctan \frac{\sqrt{(2-k_d)k_d I_{max}^2 \sin \delta}}{\rho U_g - X_L [(I_{max} - k_d I_{max}) \sin \delta + \sqrt{(2-k_d)k_d I_{max}^2 \cos \delta}]} \end{array} \right. \quad (\text{B5})$$



杜毅

在线出版日期: 2023-12-21。

收稿日期: 2022-10-31。

作者简介:

杜毅(1994), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用, a597800569@163.com;

郑超(1977), 男, 博士, 教授级高级工程师, 硕士研究生导师, 研究方向为电力系统稳定与控制、电力电子应用技术等, zhengch@epri.sgcc.com.cn;

*通信作者: 孙华东(1975), 男, 博士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定与控制, shd@epri.sgcc.com.cn。

(责任编辑 李泽荣)

Transient Stability Mechanism Analysis of the Grid Forming Voltage Source Converter and the Improved Limiting Method

DU Yi¹, ZHENG Chao², SUN Huadong^{2*}

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University; 2. China Electric Power Research Institute)

KEY WORDS: grid forming (GFM) technology; voltage source converter (VSC); transient stability; current limitation; control scheme

For the transient stability of the grid-forming voltage source converter (GFM-VSC) system under large disturbances, most existing studies fail to fully consider fast transient response and control plasticity of power electronic sources. Therefore, this paper takes the GFM-VSC as the object and reveals the difference in the transient response mechanism between the GFM-VSC and the synchronous machine from an energetic standpoint. With the help of the principle of equal area and phase diagrams methods, the transient stability mechanism of control-molded GFM-VSC is analyzed.

A simplified diagram of the grid-tied GFM-VSC system is shown in Fig. 1. Fig. 2 shows P - δ curves of the GFM VSC system at critical transient stability and

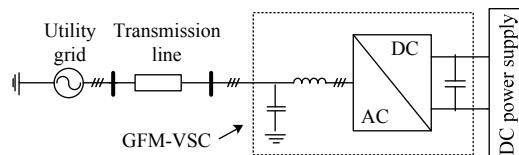


Fig. 1 Simplified diagram of the GFM-VSC system

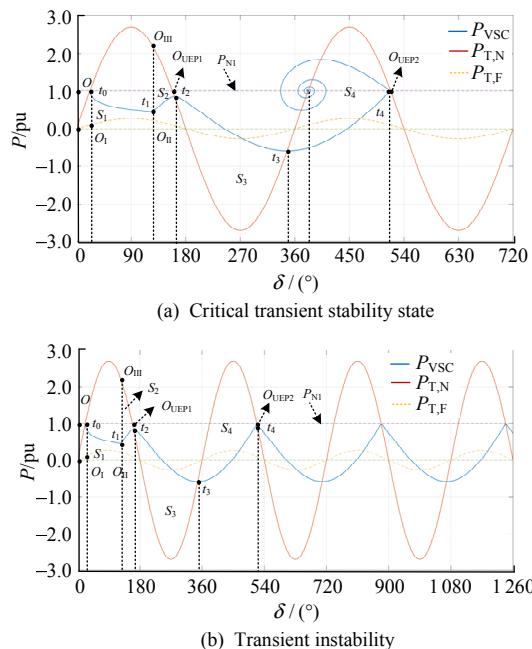


Fig. 2 Comparison of P - δ curves of the GFM VSC system at the critical state

instability states.

In Fig. 2, P_{TN} and P_{TF} represent the transmission power of the GFM VSC under the rated and fault conditions; P_{VSC} denotes the DC input power of the GFM VSC. It can be seen from Fig. 2 that GFM-VSC can independently respond to disturbances in the transient state according to the control design, resulting in the difference of acceleration and deceleration areas, thus affecting the transient stability mechanism of the system. After crossing the unstable equilibrium point (UEP), stability may still be restored at the next periodic balance point.

Then, considering the limiter that is easy to trigger under large disturbances, the instability mechanism caused by the failure of the system to exit the current limiting mode is illustrated in detail, and an improved limiting strategy with the current distribution coefficient is proposed, which effectively enhances the transient stability of the system.

Based on the d -axis current priority limiting method, the improved limiting strategy is formed after adding the current distribution coefficient k_d as follows:

$$\begin{cases} i_{\text{Lref},d}^* = \min(I_{\max} - k_d I_{\max}, i_{\text{Lref},d}) \\ i_{\text{Lref},q}^* = \min(\sqrt{I_{\max}^2 - (i_{\text{Lref},d}^*)^2}, i_{\text{Lref},q}) \end{cases} \quad (1)$$

where $i_{\text{Ref},d}^*$, $i_{\text{Ref},q}^*$ denote reference values of the current inner loop after the current limiting link; $i_{\text{Ref},d}$, $i_{\text{Ref},q}$ denote reference values of the current inner loop; I_{\max} is the maximum allowable current amplitude of the device.

Fig. 3 shows P - δ curves of the GFM VSC system with different values of the k_d .

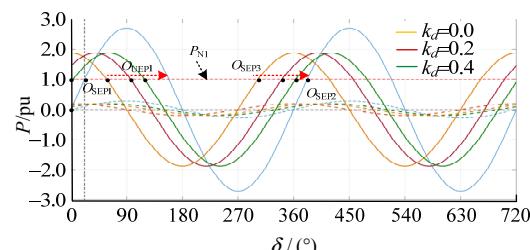


Fig. 3 P - δ curves of the GFM-VSC system with different values of the k_d