

基于虚拟电阻的构网变流器电压幅值调节策略

吕振华, 李强, 张森

(国网江苏省电力有限公司 电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要: 构网型变流器(GFC)可以为电网提供电压和频率支持,从而有效提升电力电子化电力系统的稳定性,但存在大扰动下暂态失稳的风险。通过研究影响GFC暂态稳定性的关键因素并进行定量分析,揭示了GFC的暂态失稳机理,并推导出暂态期间GFC保持电压稳定的幅值临界值。在此基础上,提出了自适应虚拟电阻调节电压幅值从而提高GFC暂态稳定性的方法,相图曲线分析充分揭示了所提出方法可以改善GFC暂态稳定性。最后,仿真和实验验证了所提出方法的正确性和有效性。

关键词: 构网型变流器;暂态稳定;幅值稳定;虚拟电阻;相图曲线

中图分类号: TM614 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed26442

Voltage Amplitude Adjustment Strategy for Grid-forming Converters Based on Virtual Resistors

LÜ Zhenhua, LI Qiang, ZHANG Sen

(Electric Power Science Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd.,
Nanjing 211103, Jiangsu, China)

Abstract: Grid-forming converter (GFC) can provide voltage and frequency support for the power grid, effectively improving the stability of power electronic power systems, but there is a risk of transient instability under large disturbances. By studying the key factors affecting the transient stability of GFC and conducting quantitative analysis, the transient instability mechanism of GFC was revealed, and the critical amplitude value for GFC to maintain voltage stability during the transient period was derived. On this basis, a method of adaptive virtual resistance to adjust the voltage amplitude and improve the transient stability of GFC was proposed. The phase diagram curve analysis fully revealed that the proposed method can improve the transient stability of GFC. Finally, the correctness and effectiveness of the proposed method were verified through simulation and experiments.

Key words: grid-forming converter (GFC); transient stability; amplitude stability; virtual resistor; phase diagram curve

为了减少碳排放并满足日益增长的能源需求,可再生能源在电力系统中的渗透率持续上升。通常,可再生能源通过电流源特性的电力电子变换器与电网交互,这类变换器被称为跟网型变流器^[1-3]。然而,可再生能源发电容量的不断增加给电力系统的控制和稳定运行带来挑战。另一方面,构网型变流器(grid forming converter, GFC)由于其电压源特性,能够像同步发电机一样支持电网运行,为电网提供电压和频率支撑^[4-6]。因此,GFC可以很好地解决跟网型变流器存在的问题,是实现大规模新能源友好并网

有效途径。

研究表明,惯性常数、阻尼系数、有功功率、输电线路阻抗和电压幅值等参数对GFC的暂态稳定性起着重要的作用。其中,惯性常数和阻尼系数对GFC暂态期间的输出功率产生影响,而有功功率决定了故障后系统是否存在平衡点,一旦有功功率超过参考值,系统丧失稳定点并与电网失去同步^[7-9]。文献[10]利用奇异摄动理论对GFC的大信号模型进行了降阶,发现电网阻抗和输送功率的增加会导致系统更容易出现类似同步发电机的功角失稳问题。

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(5108-202218280A-2-303-XG)

作者简介: 吕振华(1988—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为新能源并网和储能技术,Email:lvzhenhua999@163.com

为此,国内外学者提出多种方法来增强GFC的暂态稳定性。文献[11]指出增加阻尼系数可以提高暂态稳定性,但这只解决了功角超调量的问题。文献[12]指出了惯性可以增大临界清除时间,但所提出的基于开关通断的参数设计方法难以保证精度。

此外,可以通过在电网电压暂降期间降低有功功率参考值来改善GFC的暂态稳定性^[13-17],然而有功功率的降低会恶化频率调节性能,甚至会导致停电事故。文献[18]针对有平衡点时故障下大惯性虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)频率稳定性与暂态稳定性之间的矛盾,提出了一种基于角频率偏差反馈的GFC控制策略。然而该方法会增大惯性和阻尼系数,并进一步影响功率偏差,可能导致系统失去平衡点。为此,国内外学者研究防止有功功率超过参考值而导致的系统失稳方法。文献[19]提出一种非对称虚拟阻抗来模拟同步发电机的磁阻转矩,以提高其功率传输能力,但可能会因阻抗耦合而导致系统不稳定。文献[20]研究了电压控制参数对GFC有功功率和频率响应能力的影响,但是缺乏电压幅值影响的定量分析。文献[21]提出两种升压器来改善GFC的暂态稳定性,但依旧缺乏定量分析和实验验证,并且采用开关切换而非平滑的调节方式,导致电压控制精度不高。文献[22]研究了电压幅值与GFC暂态稳定性的关系,但同样缺乏电阻对电压幅值影响的定量分析。

现有的研究缺乏对影响GFC暂态稳定性因素进行定量分析。本文根据电压控制参数对GFC有功功率的影响,对电压、功角和电网电阻等影响GFC暂态稳定的因素进行定量分析,针对电网电压跌落带来的GFC暂态稳定性问题,提出一种基于自适应虚拟电阻的电压幅值调节策略。该方法在传统下垂控制的基础上加入自适应虚拟电阻调节,从而提高GFC的暂态稳定性。

1 主电路及模型

1.1 构网变流器拓扑及简化模型

图1给出了GFC的系统结构,变流器输出通过由 L_f 和 C_f 组成的LC滤波器与电网连接,电网为电阻 R_{gs} 、电感 L_{gs} 和电源 V_s 串联连接的模型。 V_{dc} 为GFC直流母线电压, $i_{L,abc}$ 为变流器侧电感电流, V_{gabc} 和 i_{gabc} 分别为公共耦合点(point of common coupling, PCC)处的电压和注入电网的电流。

GFC与电网之间的相位差表示为 δ_g ,称为功角。

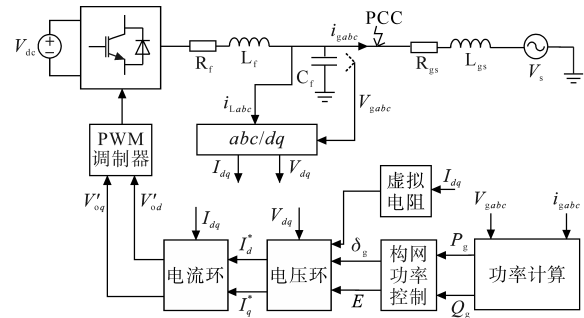


图1 GFC的单相电路和控制框图

Fig.1 Single phase circuit and control block diagram of the GFC

通常,GFC具有三个级联控制环路,即内环电流环路、中环电压环路和外环有功/无功功率控制环路^[20]。有功功率 P_g 和无功功率 Q_g 分别由 V_{gabc} 和 i_{gabc} 计算得出。首先,功率环产生参考电压 E 和功角 δ_g 。然后,电压环调节GFC输出电压 V_{dq} 以跟踪参考电压 E ,电流环级联到电压环以主动抑制LC谐振。最后,将电流环输出的信号进行调制,得到需要的控制信号。

考虑到电压环带宽远大于功率环,输出电压调节速度快,GFC可简化为可控交流电压源 $V_g \angle \delta_g$,如图2所示,其中 V_g 为电压幅值。电网电压和电流分别用 $V_s \angle 0$ 和 $I_g \angle 0$ 表示。 R_{gs} 和 X_{gs} 分别为变流器和电网之间的电阻和电抗。此外,GFC的相位角由有功功率控制器决定。

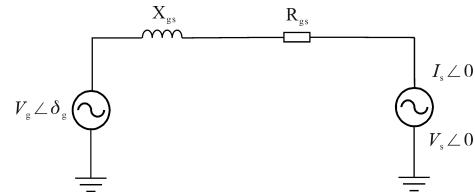


图2 GFC系统的简化模型图

Fig.2 Simplified model diagram of the GFC system

基于该简化模型,可以推导出从 V_g 传输到 V_s 的有功功率 P_g 和无功功率 Q_g ,如下所示:

$$P_g = \frac{3[V_g(V_g - V_s \cos \delta_g)R_{gs} + V_g V_s \sin \delta_g X_{gs}]}{2(X_{gs}^2 + R_{gs}^2)} \quad (1)$$

$$Q_g = \frac{3[V_g(V_g - V_s \cos \delta_g)X_{gs} - V_g V_s \sin \delta_g R_{gs}]}{2(X_{gs}^2 + R_{gs}^2)} \quad (2)$$

1.2 构网变流器下垂控制算法

根据控制环节的差异,可以将构网型控制策略进一步划分为下垂控制、VSG控制、虚拟振荡器控制、匹配控制等,其中尤其以下垂控制、VSG控制受到关注。

文献[19]基于下垂控制、VSG控制的数学共性,构建了构网型控制的统一表达式。并且VSG

策略又多在对有功功率和电压的控制中引入下垂控制思想,因此虚拟阻抗在 VSG 控制和下垂控制中的作用机制是相通的^[20-23]。我们可以以下垂控制为例进行分析。

图 3 为下垂控制框图, ω_0 和 V_{gd_ref} 分别为 GFC 的角频率和参考电压。 K_{pf} 和 K_{qv} 分别为有功功率控制和无功功率控制的下垂增益。

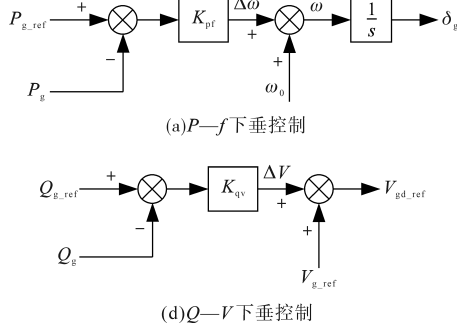


图 3 GFC 下垂控制框图

Fig.3 GFC droop control block diagram

如图 3a 和图 3b 所示, P - f 和 Q - V 控制方程可以写成如下形式:

$$d\delta_g/dt = \omega_0 + K_{pf}(P_{g_ref} - P_g) \quad (3)$$

$$V_{gd_ref} = V_{g_ref} + K_{qv}(Q_{g_ref} - Q_g) \quad (4)$$

2 电压幅值调节

2.1 暂态稳定性分析

构网型变流器在受到大扰动后同样可能存在或不存在平衡点,其暂态失稳机理与传统同步发电机系统也是一致的:要么是由于平衡点丧失导致暂态失稳;要么是存在平衡点,但在动态过程中穿越了非稳定平衡点导致暂态失稳。然而,与传统单机无穷大系统不同,构网型变流器的功率曲线特性受其同步控制方法的影响^[24]。

首先,考察 V_g 对暂态稳定性的影响,根据式 (1) 可以得到图 4 所示 P_g - δ_g 曲线,详细参数如表 1 所示。可见, P_g - δ_g 曲线分为 $P_g > 0$ 和 $P_g < 0$ 两种情况,上标“'”表示 $P_g < 0$ 时的情况。

表 1 构网控制参数

Tab.1 Grid-forming control parameters					
参数	符号	取值	参数	符号	取值
额定电压	V_0	110 V	线路电感	L_{gs}	13 mH
电网电压幅值	V_s	110 V	线路电阻	R_{gs}	0.6 Ω
变流器参考电压	V_{g_ref}	110 V	P - f 下垂增益	K_{pf}	0.15
电网频率	f	50 Hz	Q - V 下垂增益	K_{qv}	1

如图 4 所示,GFC 系统稳定时,系统存在两个

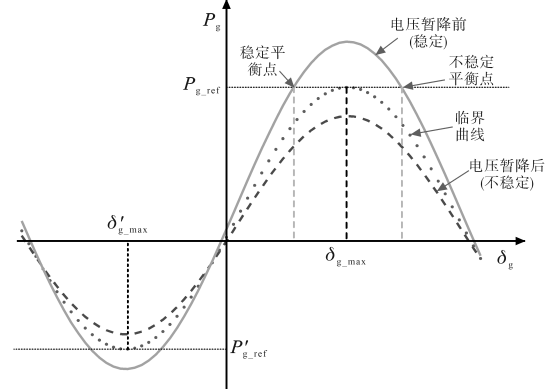


图 4 电压暂降前后 P_g - δ_g 曲线

Fig.4 P_g - δ_g curve before and after voltage sag

平衡点。如果电压暂降后不存在平衡点,则 P_g 总是小于 P_{g_ref} 或大于 P'_{g_ref} 。根据式 (3),此时 $d\delta_g/dt > 0$ 或 $d\delta_g/dt < 0$,从而导致 δ_g 单调增加至 $+\infty$ 或减少至 $-\infty$,此时,GFC 与电网失去同步。

如果存在 $d\delta_g/dt = 0$ 的平衡点,则 δ_g 可能会达到平衡点并停留在该点上,这表明 GFC 能够保持稳定。

如图 4 所示,在稳定状态和不稳定状态之间存在一个临界状态,此时 P_g - δ_g 曲线与 P_{g_ref} (P'_{g_ref}) 只有一个交点。将临界稳定状态下的 GFC 的电压幅值表示为 V_{gL} (V'_{gL})。

如果 V_g 增加, P_g - δ_g 曲线会上下拉伸,此时必然存在平衡点,暂态稳定性会提高。如果 V_g 减小, P_g - δ_g 曲线会压缩,此时必然不存在平衡点,会发生暂态不稳定现象。因此,为了防止发生暂态不稳定的现象, V_g 应大于 V_{gL} (V'_{gL})。

2.2 电压幅值调节的定量分析

为了确定 GFC 暂态稳定条件,以下对 GFC 暂态稳定的临界状态的参数进行分析,系统参数见表 1。

2.2.1 极限功率角 δ_{g_pmax} (δ'_{g_max})

在临界稳定状态下,令有功功率传输限制 P_{g_max} (P'_{g_max}) 等于其参考 P_{g_ref} (P'_{g_ref}),此时的功率角为极限功率角 δ_{g_pmax} (δ'_{g_max})。令 $dP_g/d\delta_g = 0$,得到极值点处的功率角 δ_{g_pmax} (δ'_{g_max}),如下式所示:

$$\delta_{g_pmax} = \begin{cases} \arctan(-X_{gs}/R_{gs}) + \pi & R_{gs} \neq 0 \\ \pi/2 & R_{gs} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\delta'_{g_max} = \begin{cases} \arctan(-X_{gs}/R_{gs}) & R_{gs} \neq 0 \\ -\pi/2 & R_{gs} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} \delta_{g_pmax} \in [\pi/2, \pi) \\ \delta'_{g_max} \in [-\pi/2, 0) \end{cases}$$

由式 (5) 和式 (6) 可知极限功率角 δ_{g_pmax}

(δ'_{g_max})受电网电阻 R_{gs} 的影响。

进一步,将极限功率角 δ_{g_pmax} (δ'_{g_max})代入式(1),可得到临界有功功率 P_{g_max} (P'_{g_max}),如下式所示:

$$P_{g_max} = \frac{3V_g(V_g - V_s \cos \delta_{g_pmax})R_{gs}}{2(X_{gs}^2 + R_{gs}^2)} + \frac{3V_g V_s \sin \delta_{g_pmax} X_{gs}}{2(X_{gs}^2 + R_{gs}^2)} \quad (7)$$

$$P'_{g_max} = \frac{3V_g(V_g - V_s \cos \delta'_{g_max})R_{gs}}{2(X_{gs}^2 + R_{gs}^2)} + \frac{V_g V_s \sin \delta'_{g_max} X_{gs}}{2(X_{gs}^2 + R_{gs}^2)} \quad (8)$$

2.2.2 临界参考电压 V_{gL} (V'_{gL})

对式(1)整理可得:

$$3R_{gs}V_g^2 - 3V_sAV_g - 2P_gZ = 0 \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} A = R_{gs} \cos \delta - X_{gs} \sin \delta \\ Z = R_{gs}^2 + X_{gs}^2 \end{cases} \quad (10)$$

将 V_s 作为自变量,可以解得:

$$V_{gL} = \begin{cases} \frac{3V_s A'_{max}}{6R_{gs}} + \frac{\sqrt{9V_s^2 A'^2_{max} + 24P'_{g_max} Z R_{gs}}}{6R_{gs}} & R_{gs} \neq 0 \\ \frac{2P'_{g_max} X_{gs}}{3V_s} & R_{gs} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$V'_{gL} = \begin{cases} \frac{3V_s A'_{max}}{6R_{gs}} + \frac{\sqrt{9V_s^2 A'^2_{max} + 24P'_{g_max} Z R_{gs}}}{6R_{gs}} & R_{gs} \neq 0 \\ \frac{2P'_{g_max} X_{gs}}{3V_s} & R_{gs} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中

$$A_{max} = R_{gs} \cos \delta_{g_pmax} - X_{gs} \sin \delta_{g_pmax} \quad (13)$$

$$A_{max'} = R_{gs} \cos \delta'_{g_max} - X_{gs} \sin \delta'_{g_max} \quad (14)$$

当 $P_g > 0$ 时,基于表1参数,求解式(1)、式(5)、式(7)、式(11)和式(13),可以计算出 V_{gL} 为25 V。当 $P_g < 0$ 时,基于表1参数,求解式(1)、式(6)、式(8)、式(12)和式(14),可以计算出 V'_{gL} 为23.75 V。

电压幅值调节下的相图如图5所示,基于图5,可以很容易地预测 δ_g 的变化。因此, $V_g < V_{gL}$ (V'_{gL})时,系统没有平衡点,构网系统不稳定,而 $V_g > V_{gL}$ (V'_{gL})时,系统存在平衡点,构网系统是稳定的。在实际工况中,电压降落可能会低于 V_{gL} (V'_{gL}),需要提高此时的系统稳定性。

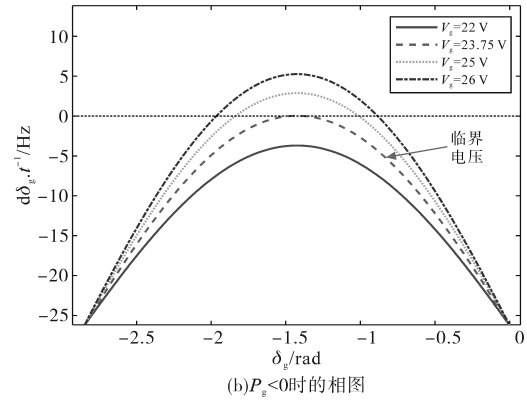
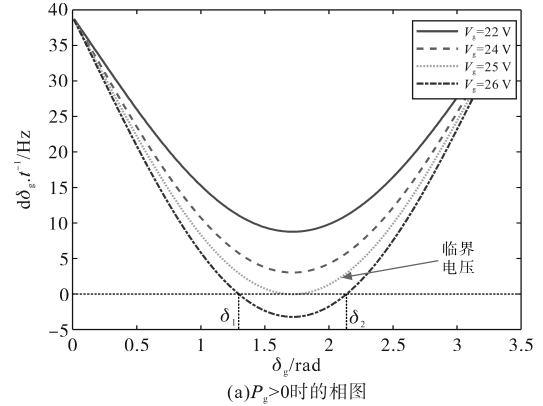


图5 电压幅值调节下的相图

Fig.5 Phase diagram under voltage amplitude adjustment

3 自适应虚拟电阻

3.1 线路电阻对电压幅值控制的影响

在式(7)中,对 V_g 求导,得到:

$$\frac{dP_{g_max}}{dV_g} = \frac{3R_{gs}V_g - 3V_sA_{max}}{2(X_{gs}^2 + R_{gs}^2)} \quad (15)$$

其中

$$\begin{aligned} A_{max} &= R_{gs} \cos \delta_{g_pmax} - X_{gs} \sin \delta_{g_pmax} \\ &= -(X_{gs} \sin \delta_{g_pmax} - R_{gs} \cos \delta_{g_pmax}) \\ &= -\sqrt{X_{gs}^2 + R_{gs}^2} \sin [\delta_{g_pmax} + \arctan(-\frac{R_{gs}}{X_{gs}})] \end{aligned} \quad (16)$$

考虑到表达式 $\arctan(-R_{gs}/X_{gs}) \in (-\pi/2, 0]$ 且 $\delta_{g_pmax} \in [\pi/2, \pi)$, $0 < \delta_{g_pmax} - \arctan(-R_{gs}/X_{gs}) < \pi$,故 $A_{max} < 0$ 。因此可以得到:

$$dP_{g_max}/dV_g > 0 \quad (17)$$

在式(8)中,对 V_g 求导得到:

$$\frac{dP'_{g_max}}{dV_g} = \frac{3R_{gs}V_g - 3V_sA'_{max}}{2(X_{gs}^2 + R_{gs}^2)} \quad (18)$$

通过计算可以发现, dP'_{g_max}/dV_g 随着 V_g 的增加,先为负值,后来变为正值。

由上述结论可知, V_g 能够直接影响临界有功功率 P_{g_max} (P'_{g_max}),进而影响GFC暂态稳定性。但

是当系统出现电压跌落, V_g 随 V_s 下降, 无法直接调节 V_g , 让 GFC 系统稳定。由式(15)和式(18)可以发现线路电阻 R_{gs} 能够影响 V_g 与 P_{g_max} (P'_{g_max}) 的变化关系, 进而影响 GFC 系统的暂态稳定性。

为了进一步确定线路电阻 R_{gs} 对 GFC 暂态稳定性的影响, 需要对 P_{g_max} (P'_{g_max}) 和 R_{gs} , V_{g_L} (V'_{g_L}) 之间的关系进行分析。

为此, 在式(7)中, 对 R_{gs} 求导, 得到:

$$\frac{dP_{g_max}}{dR_{gs}} = \frac{3V_g V_s R_{gs} A_{max}}{2Z^2} + \frac{3V_g^2 (X_{gs}^2 - R_{gs}^2)}{2Z^2} \quad (19)$$

当 $P_g > 0$ 时, GFC 工作在电压控制模式下, 电网电压 V_s 发生电压降落时, 由于存在线路阻抗, 在实际电路中 $V_g > V_s$, 又因为 V_g 随 V_s 下降, 变化趋势相同, 为简化计算, 令 $V_g = V_s$, 代入式(19)可得:

$$\frac{dP_{g_max}}{dR_{gs}} = \frac{3V_g^2 (R_{gs} A_{max} + X_{gs}^2 - R_{gs}^2)}{2Z^2} \quad (20)$$

令 $dP_{g_max}/dR_{gs} = 0$, 可得 $R_{gs} \approx 2.35 \Omega$ 。

根据式(1)、式(7)和式(8), 选取不同的 R_{gs} 绘制出 $P_{g_max} - V_g$ 曲线, 如图6所示。

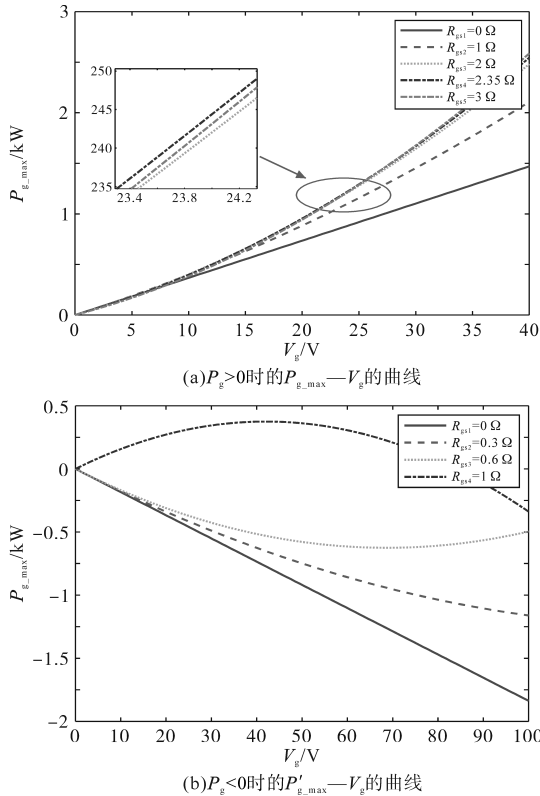


图6 不同的 R_{gs} 下的 $P_{g_max} - V_g$ 的曲线

Fig.6 $P_{g_max} - V_g$ plots for different R_{gs}

对于 $P_g > 0$, 当 $R_{gs} = 0$ 时, dP_{g_max}/dV_g 为常数, 即图6a中的直线; 当 $0 < R_{gs} < 2.35 \Omega$ 时, 根据式(19), $dP_{g_max}/dR_{gs} > 0$, 此时 P_{g_max} 随着 R_{gs} 增加而增加; 当 $R_{gs} > 2.35 \Omega$ 时, $dP_{g_max}/dR_{gs} < 0$, 此时 P_{g_max} 随着 R_{gs} 增

加而减小, 因此合理增加 R_{gs} 会提高 GFC 向电网输出有功功率, 会增强暂态稳定性。

对于 $P_g < 0$, 当 $R_{gs} = 0$ 时, dP'_{g_max}/dV_g 为常数, 即图6b中的直线; 当 $R_{gs} < 0$ 时, V_g 较小时 $P'_{g_max} > 0$; 当 $R_{gs} > 0$ 时, P'_{g_max} 随着 V_g 的增加, 先减小再增加, 此时增大 R_{gs} 会削弱 GFC 暂态稳定性。电阻 R_{gs} 增加会降低 $|P_{g_max}|$, 即电阻 R_{gs} 增加会降低 GFC 从电网吸收有功功率, 会显著降低暂态稳定性。

3.2 自适应虚拟电阻控制方法

在电网发生电压骤降后, 如果不存在平衡点则系统必然失稳。因此, 实现暂态稳定的前提是要保证电网电压骤降故障后系统稳定平衡点的存在。

为了提高构网型变流器的暂态稳定性, 本文在电压电流双闭环模块与下垂控制模块之间加入虚拟电阻 R_{vir} , 使得 $R = R_{gs} + R_{vir}$ 。本文的自适应虚拟电阻采用与其它虚拟电阻不同的控制方案, 具体分析如下。引入虚拟电阻的 GFC 系统的简化模型如图7所示。

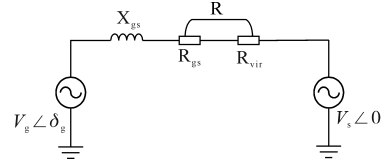


图7 引入虚拟阻抗后的系统简化模型

Fig.7 Simplified model of the system with the introduction of virtual impedance

对于 $P_g > 0$ 时, 令 $P_g = P_{g_max}$, 再将虚拟电阻 R_{vir} 代入式(20)可得:

$$\frac{dP_{g_max}}{dR} = \frac{3V_g^2 R (R \cos \delta - X_{gs} \sin \delta)}{2(X_{gs}^2 + R^2)^2} + \frac{3V_g^2 (X_{gs}^2 - R^2)}{2(X_{gs}^2 + R^2)^2} \quad (21)$$

令

$$G(R) = R(R \cos \delta - X_{gs} \sin \delta) + X_{gs}^2 - R^2 \quad (22)$$

则有:

$$dP_{g_max}/dR = [3V_g^2 G(R)] / 2(X_{gs}^2 + R^2)^2 \quad (23)$$

因此, $G(R)$ 与 dP_g/dR 同号。

令 $G(R) = 0$, 结合式(5)可得:

$$G(R) = R^2 \left\{ \left(\frac{X_{gs}}{R} \right)^2 - \frac{X_{gs}}{R} \sin [\arctan (\frac{X_{gs}}{R})] \right\} - \cos [\arctan (X_{gs}/R)] - 1 \quad (24)$$

由于

$$\begin{cases} \arctan [\sin (X_{gs}/R)] = \frac{X_{gs}/R}{\sqrt{1 + (X_{gs}/R)^2}} \\ \arctan [\cos (X_{gs}/R)] = 1/\sqrt{1 + (X_{gs}/R)^2} \end{cases} \quad (25)$$

则有:

$$G(R) = R^2 \left[\left(\frac{X_{gs}}{R} \right)^2 - \sqrt{\left(\frac{X_{gs}}{R} \right)^2 + 1} - 1 \right] \quad (26)$$

令 $G(R)=0$, 解得:

$$R = X_{gs} / \sqrt{3} \quad (27)$$

当 $0 < R < X_{gs} / \sqrt{3}$ 时, $dP_{g_max}/dR > 0$, 此时 P_{g_max} 随着 R 增加而增加。当 $X_{gs} / \sqrt{3} < R$ 时, $dP_{g_max}/dR < 0$, 此时 P_{g_max} 随着 R 增加而减小。当 $R = X_{gs} / \sqrt{3}$ 时, P_{g_max} 为最大值。因此, 为了尽可能增加 GFC 的暂态稳定性, R 的取值应该尽量靠近 $X_{gs} / \sqrt{3}$ 。

对于 $P_g < 0$ 时, 电阻 R_{gs} 增加会显著降低暂态稳定性改善的效果, 因此应尽量使 R 减小, 即 R 的取值应该尽量靠近 0。

因此, $P_g > 0$ 和 $P_g < 0$ 时的虚拟电阻 R_{vir} 的控制函数为

$$R_{vir} = \begin{cases} X_{gs} / \sqrt{3} - R_{gs} & P_g > 0 \\ -R_{gs} & P_g < 0 \end{cases} \quad (28)$$

4 仿真和实验验证

本文建立了一个 Matlab/Simulink 模型, 进行仿真以验证其有效性。仿真结果清楚地验证了所提方法对改善暂态稳定性的有效性。

GFC 系统的原理图和控制结构见图 1, 系统和控制参数见表 1, 有功功率参考 P_{g_ref} (P'_{g_ref}) 设置为 2 000 W (-500) W。

如图 8 所示, 当 GFC 没有发生电压暂降时, $P_g > 0$ 和 $P_g < 0$ 时 GFC 均能正常工作, V_g , P_g 和 ω_g 按预期保持不变。当发生电网电压降落时, 电网电压 V_s 由 100 V 降至 30 V, 变流器电压 V_g 随 V_s 下降, 构网有功功率 P_g 在短暂振荡后, 重新稳定, ω_g 波动后重新稳定。此时电网电压尚未降到临界参考电压 V_{gl} , 所以构网系统在故障后能够重新稳定。

为了进一步与其他方法进行对比, 采用文献 [19] 提出的非对称虚拟阻抗进行仿真, 如图 9 所示, 电网电压 V_s 由 110 V 降至 20 V, 变流器电压 V_g 随 V_s 下降, 此时电网电压小于临界参考电压 V_{gl} (V'_{gl})。此时构网系统没有平衡点, V_g , P_g , ω_g 的波形均出现振荡, 系统失稳。表明如果 $V_g < V_{gl}$ (V'_{gl}), 系统失稳, 即电网电压暂降引发了不稳定的暂态响应。

如图 10 所示, GFC 采用自适应虚拟电阻控制方法时, 电网电压 V_s 由 100 V 降至 20 V, 变流器电压 V_g 随 V_s 下降, 此时电网电压 V_s 小于临界参考电

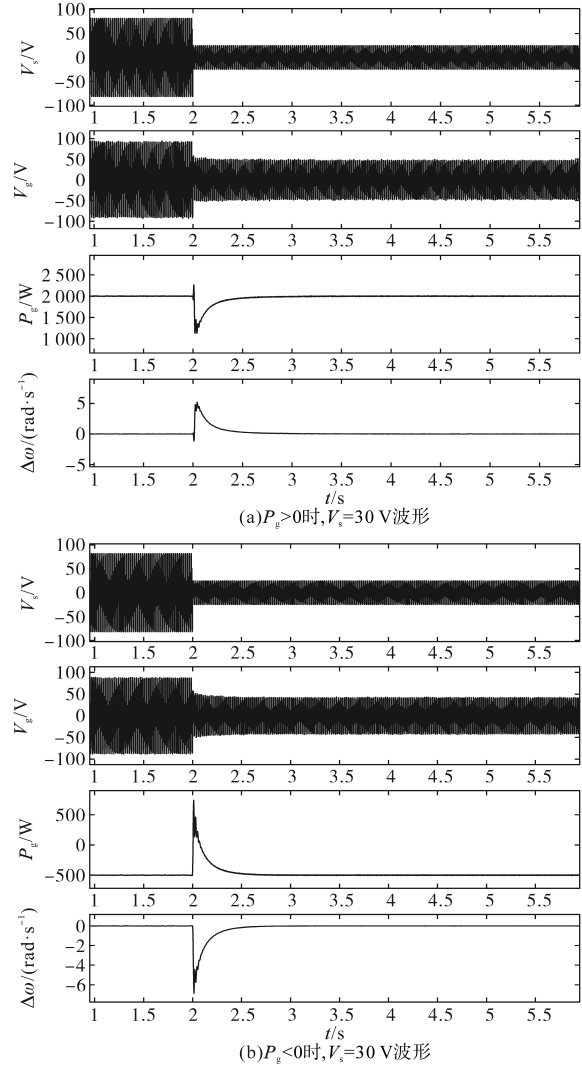


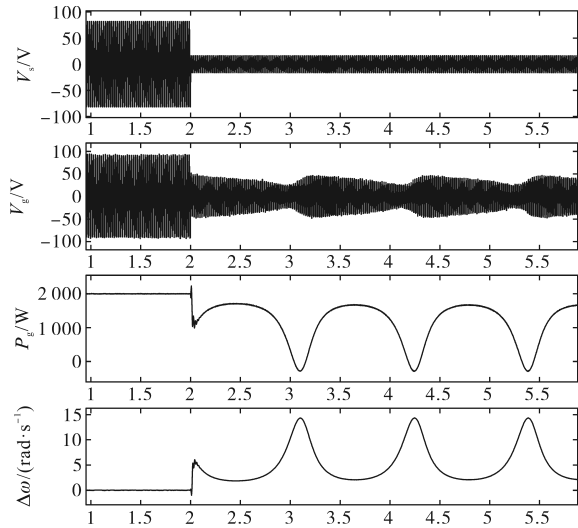
图 8 GFC 的暂态仿真 ($V_s=30$ V)

Fig.8 Transient simulation of GFC ($V_s=30$ V)

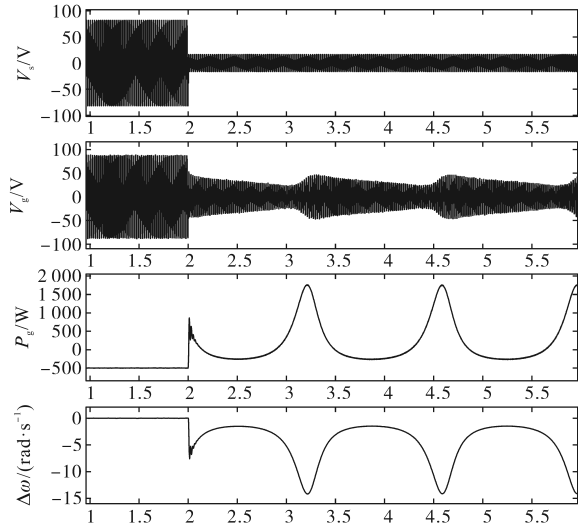
压 V_{gl} (V'_{gl})。由于构网系统加入虚拟电阻, 构网系统存在平衡点, 此时有功功率 P_g 在短暂振荡后, 重新稳定, ω_g 在短暂振荡后也能达到新的稳定状态, 系统在短暂振荡后重新稳定。

从仿真波形图中可以看出, 自适应虚拟电阻能够使电网电压跌落后, 构网系统重新稳定, 并在暂态过程中有效降低了振荡, 提高了暂态稳定性。

为了进一步确定理论的正确性, 搭建了基于图 11 所示的 RT-LAB 硬件在环平台, 进行进一步的实验验证。建立图 1 所示的主电路模型, 并在 RT-LAB 平台中实现。RT-LAB 通过接口卡与 TM S320F28335 DSP 控制器相连。当所提方法在 DSP 中成功编程并运行后, 产生的 PWM 信号被送入 RT-LAB 模型进行实现, 将信号输出到示波器。分别对传统和所提自适应虚拟电阻控制在 $V_s=30$ V 和 $V_s=20$ V 下的暂态性能进行了实验。



(a) $P_g > 0$ 时, $V_s = 20$ V 波形(失稳)



(b) $P_g < 0$ 时, $V_s = 20$ V 波形(失稳)

图9 GFC的暂态仿真($V_s=20$ V, 失稳)

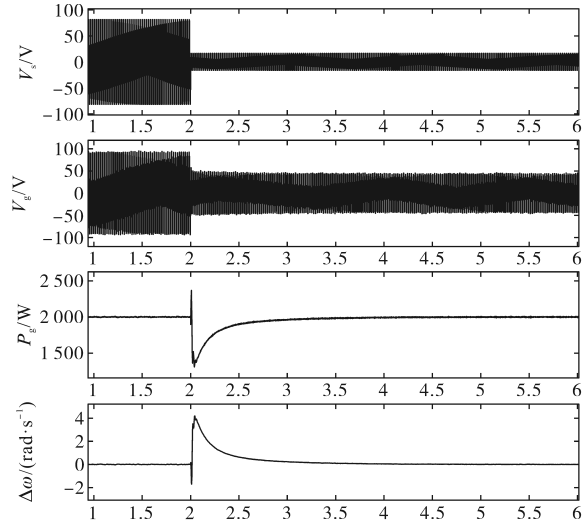
Fig.9 Transient simulation of GFC ($V_s=20$ V, unstable)

图 12 显示了电网电压跌落到 30 V 的波形图。从上到下的四个信号分别是 V_s 、 V_g 、 P_g 和 $\Delta\omega$ 。结果表明,当电网电压跌落到 30 V 时,在短暂波动后构网系统能够重新稳定,这与图 8 中的理论分析一致。

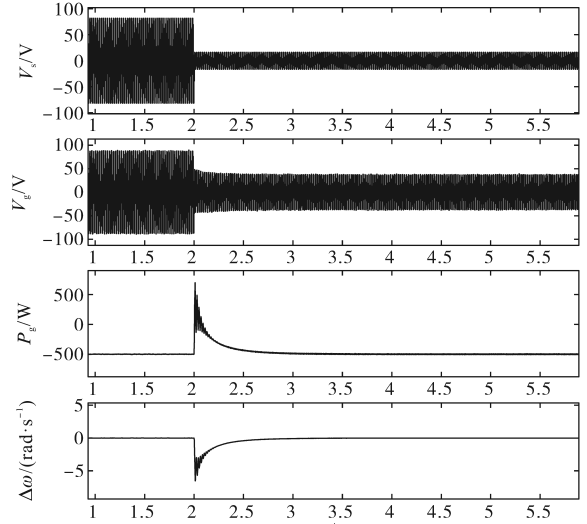
图 13 显示了采用非对称虚拟阻抗时电网电压跌落到 20 V 的波形图。结果表明,当电网电压跌落到 20 V 时, V_g 、 P_g 、 $\Delta\omega$ 的波形均出现振荡,系统失稳,这与图 9 中的理论分析一致。

图 14 显示了采用自适应虚拟电阻控制方法时电网电压跌落到 20 V 的波形图。结果表明,当电网电压跌落到 20 V 时,由于构网系统加入虚拟电阻,构网系统存在平衡点,此时构网有功功率 P_g 在短暂振荡后重新稳定, ω_g 在短暂振荡后也能达到新的稳定状态,系统在短暂振荡后重新稳定,

这与图 10 所示仿真结果一致。



(a) $P_g > 0$ 时, $V_s = 20$ V 波形(稳定)



(b) $P_g < 0$ 时, $V_s = 20$ V 波形(稳定)

图 10 加入虚拟电阻的 GFC 电压暂降仿真($V_s=20$ V, 稳定)

Fig.10 Voltage sag simulation of GFC with virtual resistor employed ($V_s=20$ V, stable)

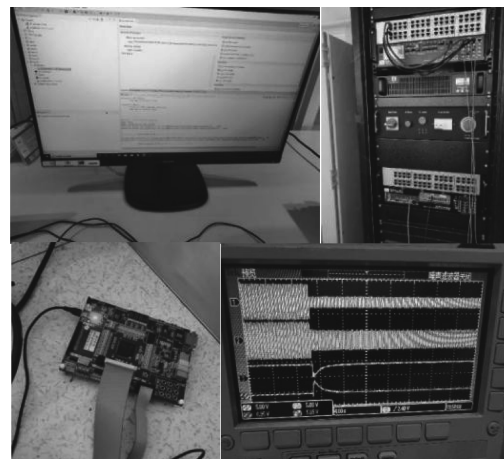
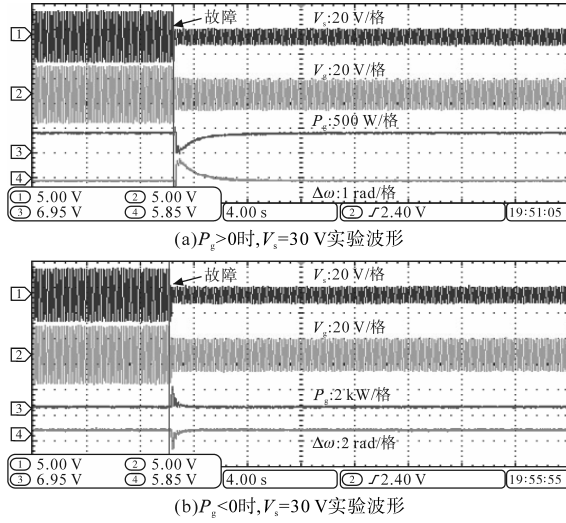
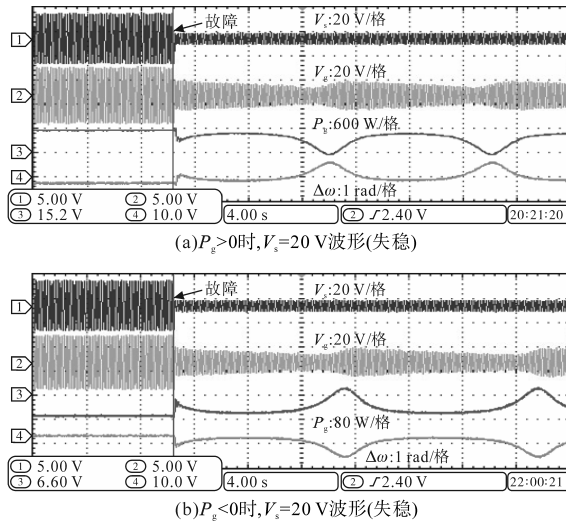
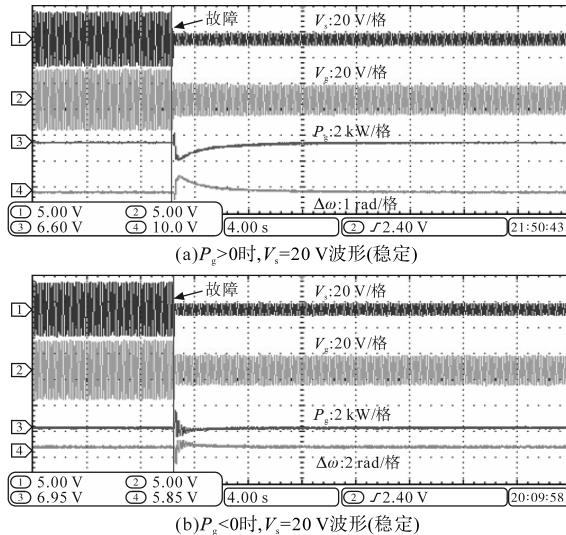


图 11 RT-LAB 实验平台

Fig.11 RT-LAB experimental platform

图 12 GFC 的暂态实验波形图 ($V_s=30\text{ V}$)Fig.12 Transient experimental waveforms of GFC ($V_s=30\text{ V}$)图 13 GFC 的暂态实验波形图 ($V_s=20\text{ V}$, 失稳)Fig.13 Transient waveforms of GFC ($V_s=20\text{ V}$, unstable)图 14 含虚拟电阻的 GFC 电压暂降实验波形 ($V_s=20\text{ V}$, 稳定)Fig.14 Experimental waveforms of GFC voltage sag with virtual resistor employed ($V_s=20\text{ V}$, stable)

5 结论

本文提出了一种提高 GFC 暂态稳定性的方法,加入自适应虚拟电阻改变电压幅值,进而提高 GFC 的暂态稳定性。所提出的方法能够显著提高 $P_g > 0$ 和 $P_g < 0$ 时 GFC 的暂态稳定性。定量分析了临界值,详细地揭示了所提出方法对暂态稳定性改善的效果,并通过相图直观地描述了效果。计算了暂态期间电压幅值和虚拟电阻的临界值以指导参数设计,通过定量分析能够确定电阻的取值范围,本文采用 $P_g=2\ 000\text{ W}$ 和 $P_g=-500\text{ W}$ 两种工况进行验证,通过 Matlab 仿真和 RT-LAB 实验平台验证了本文所有的理论分析。

参考文献

- [1] 郑重, 苗世洪, 李超, 等. 面向微型能源互联网接入的交直流配电网协同优化调度策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(1): 192-207.
ZHENG Zhong, MIAO Shihong, LI Chao, et al. Coordinated optimal dispatching strategy of AC/DC distribution network for the integration of micro energy internet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1): 192-207.
- [2] 尹翔, 张效俊, 冯鑫佳, 等. 基于构网型变流器频率控制策略应用[J]. 电气传动, 2024, 54(11): 11-18.
YIN Xiang, ZHANG Xiaojun, FENG Xinjia, et al. Application of frequency control strategy based on grid-forming converter[J]. Electric Drive, 2024, 54(11): 11-18.
- [3] GUAN L, JUN Y. Dynamic coupling analysis and small-signal stability for multi-parallel PLL-synchronous VSC-based renewable energy plants during asymmetrical LVRT[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(4): 2020-2035.
- [4] 许诒翔, 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): 3586-3595.
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): 3586-3595.
- [5] ZHAO F, WANG X, ZHU T. Power dynamic decoupling control of grid-forming converter in stiff grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(8): 9073-9088.
- [6] GAO X, DAO Z, AMJAD A, et al. Stability analysis of grid-following and grid-forming converters based on state-space modelling[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(3): 4910-4920.
- [7] 尚磊, 唐王倩云, 苏适, 等. 构网型无功补偿抑制新能源送端暂态过电压[J]. 电力工程技术, 2024, 43(2): 83-93.
SHANG Lei, TANG Wangqianyun, SU Shi, et al. Suppression of transient overvoltage in renewable energy transmission terminal by grid-forming based reactive power compensation[J].

- Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(2):83-93.
- [8] WU H, WANG X. Design-oriented transient stability analysis of grid connected converters with power synchronization control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 6473-6482.
- [9] RAVAN J, MOHAMMAD H, DAYAN B, et al. Impact of voltage-loop feedforward terms on the stability of grid-forming inverters and remedial actions[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(3):1554-1565.
- [10] 朱蜀, 刘开培, 秦亮. 虚拟同步发电机的暂态稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 51-58.
- ZHU Shu, LIU Kaipei, QIN Liang. Transient stability analysis of virtual synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 51-58.
- [11] PAN D, WANG X, LIU F, 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.
- [12] GE P, TU C, XIAO F, et al. Design-oriented analysis and transient stability enhancement control for a virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(3): 2675-2684.
- [13] 郭佳俊, 徐志, 翟保豫, 等. 构网型新能源-储能联合并网系统 LVRT 控制策略研究[J]. 电气传动, 2024, 54(7): 58-65, 72.
- GUO Jiajun, XU Zhi, ZHAI Baoyu, et al. Research on LVRT control strategy of combined grid-connected system with new energy energy-storage based on grid-forming converters[J]. Electric Drive, 2024, 54(7): 58-65, 72.
- [14] 张鑫宇, 薛峰, 李碧君, 等. 双馈风电场串补系统次同步振荡紧急控制策略[J]. 电力工程技术, 2023, 42(5):108-116.
- ZHANG Xinyu, XUE Feng, LI Bijun, et al. Emergency control strategy for subsynchronous oscillation of DFIG-based wind farms with a series-compensated line[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(5):108-116.
- [15] XIONG X, WU C, HU B, et al. Transient damping method for improving the synchronization stability of virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions Power Electronics, 2021, 36(7): 7820-7831.
- [16] 贾焦心, 沈钟毓, 秦本双, 等. 构网型和跟网型电力电子设备混联系统惯量响应的匹配问题综述[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(6):77-89.
- JIA Jiaoxin, SHEN Zhongyu, QIN Benshuang, et al. Review on inertia response matching problem of hybrid power systems with grid-forming and grid-following power electronic devices[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(6): 77-89.
- [17] YANG W, TU C, XIAO F, et al. A method to improve both frequency stability and transient stability of virtual synchronous generators during grid faults[J]. Sustainability, 2024, 16: 1769.
- [18] 高本锋, 符章棋, 王刚, 等. 适用于次同步振荡分析的直驱风电场平衡降阶方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 112-120.
- GAO Benfeng, FU Zhangqi, WANG Gang, et al. Balanced reduction method of direct-drive wind farm for subsynchronous oscillation analysis[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3): 112-120.
- [19] SI W, FANG J. Transient stability improvement of grid-forming converters through voltage amplitude regulation and reactive power injection[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(10): 12116-12125.
- [20] 迟永宁, 江炳蔚, 胡家兵, 等. 构网型变流器:物理本质与特征[J]. 高电压技术, 2024, 50(2):590-604.
- CHI Yongning, JIANG Bingwei, HU Jiabing, et al. Grid-forming converters: physical mechanism and characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 590-604.
- [21] 陈智勇, 董新伟, 李传辉, 等. 基于相位与幅值补偿的虚拟同步发电机低电压穿越控制[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3): 42-51.
- CHEN Zhiyong, DONG Xinwei, LI Chuanhui, et al. Low voltage ride-through control of virtual synchronous generator based on phase and amplitude compensation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(3):42-51.
- [22] 谢黎龙, 李勇汇, 肖金星, 等. 基于改进虚拟同步机的风储微网综合控制[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(22):9660-9668.
- XIE Lilong, LI Yonghui, XIAO Jinxing, et al. Integrated control of wind storage microgrid based on improved virtual synchronous machine[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(22):9660-9668.
- [23] 颜湘武, 宋子君, 崔森, 等. 基于变功率点跟踪和超级电容器储能协调控制的双馈风电机组一次调频策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(3): 530-541.
- YAN Xiangwu, SONG Zijun, CUI Sen, et al. Primary frequency regulation strategy of doubly-fed wind turbine based on variable power point tracking and supercapacitor energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(3): 530-541.
- [24] WANG J, ZHANG X. Active power and voltage cooperative control for improving fault ride-through capability of grid-forming converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(10):12301-12311.

收稿日期:2025-02-05

修改稿日期:2025-03-05