

考虑电流约束的构网变换器综合故障穿越策略

文骏宇¹, 孙龙远¹, 谢阳健¹, 蓝心¹, 梁旭耀^{1*}, 王勇²

(1. 中国能源建设集团广西电力设计研究院有限公司, 广西南宁 530023;

2. 上海交通大学, 上海 200240)

A Comprehensive Fault Ride-Through Strategy for Grid-Forming Converters Considering Current Constraints

Wen Junyu¹, Sun Longyuan¹, Xie Yangjian¹, Lan Xin¹, Liang Xuyao^{1*}, Wang Yong²

(1. Guangxi Electric Power Design Institute Co., Ltd., China Energy Engineering Group,

Nanning 530023, China;

2. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: [Objective] With the continuous increase in the penetration of renewable energy generation, the grid-forming (GFM) converter, owing to their capability to actively support voltage and frequency, are regarded as a key technology for enabling the reliable integration and stable operation of power systems with high shares of renewable energy. However, due to the limited overcurrent withstand capability of power semiconductor devices, when voltage sags or other faults occur in the power grid, the GFM converter prone to large power angle deviations, loss of synchronization, and transient overcurrent, thereby posing significant challenges to stable operation. [Methods] Aiming at the above problems, based on the equivalent impedance model of the GFM converter and combined with the vector diagrams of system voltage and output current before and after the fault, this paper systematically analyzed the generation mechanism of overcurrent during the fault process and the influence of voltage amplitude and power angle variations on the fault current amplitude. On the basis of the above analysis, a comprehensive control strategy that took into account both transient synchronization stability and fault overcurrent suppression was proposed. The proposed strategy adaptively reduced the active power reference value to enhance the power angle stability of the system. Meanwhile, to achieve overcurrent mitigation throughout the entire fault process, the strategy implemented fault current magnitude constraints along with a combined control approach. This

approach synergized internal voltage reference regulation for steady state fault current management and virtual impedance for surge current suppression. [Results] Finally, the rationality and effectiveness of the proposed strategy were verified through comparative tests on an experimental platform. The experimental results indicated that, compared with conventional methods, the proposed strategy had significant advantages in enhancing the transient performance of the grid-forming converter. It was able to maintain the power angle stability of the system under various grid fault conditions, effectively suppress the fault current, and ensure that both the surge current and the steady-state fault overcurrent magnitude were below the preset thresholds.

[Conclusion] The comprehensive fault ride-through strategy for the GFM converters considering current constraints proposed in this paper takes into account both power angle stability and overcurrent suppression, and can significantly improve the operational reliability of grid-forming converters under complex grid fault conditions.

Key words: renewable energy; grid-forming converter; current limiting; power angle stability; fault ride-through

摘 要: 【目的】随着新能源发电比例的持续提高, 构网型变换器凭借其主动电压与频率支撑能力, 已成为实现高比例新能源电力系统可靠接入与稳定运行的关键技术。然而, 由于功率器件的过流承受能力有限, 当电网发生电压跌落或其他故障时, 构网变换器易出现功角偏移、同步失稳及暂态过流等问题, 从而对系统稳定运行构成显著挑战。【方法】针对上述问题, 本文基于构网变换器的等效阻抗模型, 结合故障前后系统电压与输出电流矢量关系图, 系统分析故障过程中过流的产生机理及电压

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U25B200105)

Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (U25B200105)

幅值与功角变化对故障电流幅值的影响。在上述分析基础上,提出了一种兼顾暂态同步稳定性与故障过流抑制的综合控制策略。所提策略通过自适应降低有功功率参考值以增强系统功角稳定性,同时引入故障电流幅值约束,并提出内部电压参考调节和浪涌电流抑制虚拟阻抗结合的控制方式,实现全故障过程的过流抑制。【结果】最后,通过试验平台进行对比测试验证了所提策略的合理性和有效性。试验结果表明,相较于传统方法,所提策略在提升构网型变换器暂态性能方面具有显著优势,能够在不同电网故障下维持系统功角稳定,并有效抑制故障电流,确保浪涌电流和故障稳态过流幅值均低于预设阈值。【结论】本文提出的考虑电流约束的构网变换器综合故障穿越策略,兼顾了功角稳定和过流抑制,能显著提升构网型变换器在复杂电网故障条件下的运行可靠性。

关键词: 新能源;构网变换器;限流;功角稳定;故障穿越

0 引言

随着“双碳”战略目标的持续推进,以风电和光伏为代表的可再生能源发电正加速替代传统化石能源,逐步成为新型电力系统的主体形式^[1-2]。在此背景下,传统以同步发电机为主导的电力系统正向以电力电子变流器为主导的电力电子化系统演进^[3]。因此,作为可再生能源并网的关键接口设备,变流器的控制策略对电力系统的稳定性与安全性具有至关重要的影响^[4]。传统跟网型变流器控制策略依赖于电网电压的幅值和相位信息,在电网强度较高且运行点稳定的条件下能够表现出良好的控制性^[5]。然而,在高比例可再生能源接入的弱电网场景中,随着电网等效阻抗的增加及运行点波动的加剧^[6],传统跟网型变流器易发生失稳甚至脱网等问题,且难以有效支撑电网电压与频率稳定^[7]。

为了提升高比例电力电子化系统的稳定性与支撑能力,构网控制技术应运而生。构网型变流器通过模拟同步发电机的物理特性,主动为电网提供电压和频率支撑^[8],表现出类似“虚拟同步机”的惯性阻尼特性,可显著增强电网的稳定性和鲁棒性,被视为构建高比例新能源新型电力系统的关键技术之一^[9]。然而,尽管构网型变流器展现出较强的电网支撑能力,其在实际运行中仍面临诸多挑战^[10]。其中,故障工况下的同步稳定性问题以及过电流问题尤为突出。

区别于跟网型变流器采用锁相环快速跟踪电网相位^[11],构网型变流器本质上作为受控电压源运行,其输出电压相位由内部控制环路自主决定^[12]。当电网发生对称或不对称短路故障时,电网电压会在短时间内骤然跌落,进而在构网型变流器端口与故障点之间产生巨大的电位差,从而引发远超额定值的瞬态浪涌电流^[13]。不同于同步发电机通常具备 5~7 倍额定电流的短时过载能力,典型电力电子变流器在安全运行条件下通常仅能承受约 1.2~2 倍的过电流^[14]。由于电力电子器件的过载能力相对有限,故障期间产生的过电流不仅可能触发保护机制并导致变流器被迫停运,还可能引发可再生能源机组脱网,从而进一步加剧电力系统的运行风险^[15-16]。另一方面,在故障工况下,构网变换器的输出功率受限,系统可能失去稳定平衡点,从而引发功角失稳现象^[17]。

针对上述问题,国内外学者已开展了一系列研究。在抑制故障过电流方面,文献[18-19]在故障期间将构网控制策略切换为跟网型控制,直接抑制变换器输出电流。然而,这些方法大多未能充分考虑构网型控制本身的内在特性,致使其在故障期间改变了原本的电压源特性。虚拟阻抗法近年来备受关注,文献[20]采用外部功率指令与虚拟阻抗相结合的方法,其中功率指令用于调制稳态故障电流,虚拟阻抗则用于抑制暂态过流;文献[21-22]采用了自适应虚拟阻抗策略,通过实时评估短路电流的越限程度来动态调整阻抗值,从而有效抑制暂态电流。虚拟阻抗方法的引入会降低系统输出功率特性,且由于动态响应较慢,增加了限流阈值设计的难度。进一步地,结构相对简单、易于实现的电流饱和器限流策略被广泛应用,该策略通过在电流内环中直接引入电流参考值饱和机制,设置饱和值以抑制输出电流。根据限流作用方式的不同,常见形式包括 d 轴限流器、 q 轴限流器和环形限流器等^[23-24]。然而,该饱和环节具有显著的非线性特征,从而增加了系统建模与稳定性分析的复杂性。

在提高同步稳定性方面,文献[25-26]通过降低有功参考值抑制功角的变化,以实现故障穿越;文献[27]通过附加控制回路对构网控制的功角特性曲线进行重塑以提高系统暂态同步稳定性。此外,文献[28]提出了虚拟功率控制方法,使得

系统在不需要降低有功功率参考的同时保证稳定平衡点,但无法反映实际输出功率。因此,在电网发生故障的情况下,如何在保证构网型变流器同步稳定性的同时,实现对故障过电流的快速且准确的抑制,是一个亟待突破的关键科学问题。

综上,本研究旨在分析电网故障下构网型变流器的过电流和功角失稳机理,并提出一种综合暂态性能提升策略。通过建立构网型变流器在电网故障下的等效电路模型,揭示了过电流的构成与影响因素。在此基础上,提出了一套融合多维度调控的故障穿越协同控制策略,包括动态调整功率参考值、故障下旁路无功环并重构内部参考电压以及附加浪涌电流虚拟阻抗。最后,通过理论推导与试验验证,证明了所提方法能够显著抑制过电流,并保证系统故障下的暂态同步稳定性,提升构网型变流器的故障穿越鲁棒性与运行可靠性,为高比例新能源电网的安全稳定运行提供了有力的技术支撑。

1 构网控制结构

图1为本文所研究的构网型(Grid-Forming, GFM)变换器的结构示意图。该系统主要由主功率电路、功率计算环节、功率控制环节、电压控制回路、电流控制回路、坐标变换环节以及脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)环节组成。变换器的直流侧通常接入储能电池,因此其可以被认为是一个恒定的直流源,用 V_{DC} 表示。在交流侧,逆变器经过输出滤波电路接入公共耦合点(Point of Common Coupling, PCC),其中 L_f 表示输出滤波电感, C_f 表示输出滤波电容。逆变器的输出电压和电流分别用 v_o 和 i_o 表示。电网等效阻抗记为 Z_g ,通常由电阻和电感的串联形式组成, v_g 表示电网电压。

功率控制回路主要由两部分组成:有功-频率控制环节以及无功-电压控制环节。其中,有功功率控制采用虚拟同步机控制策略,输出的相位角 θ 用于对采样的电压和电流信号进行Park变换,从而实现变量由静止坐标系向旋转 dq 坐标系的转换。在无功功率控制方面,采用基于下垂特性的控制策略以生成内部电压参考信号,进而实现对逆变器电压幅值的有效调节。基于上述控制思路,功率控制的数学表达式可表示为

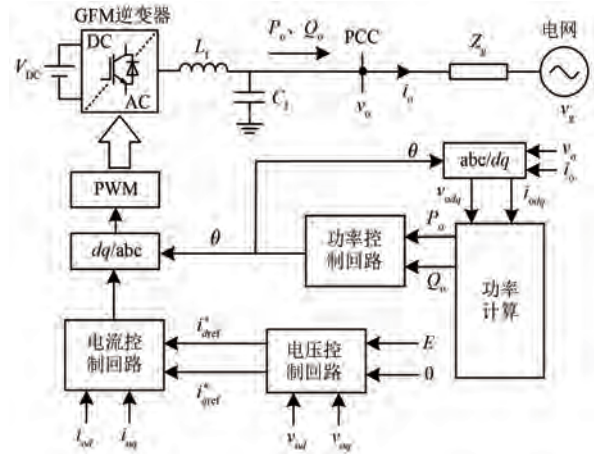


图1 构网型变换器结构图

Fig. 1 Structure diagram of the GFM converter

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = P_{ref} - P_o - D_p(\omega - \omega_0) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega - \omega_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$Q_{ref} - Q_o = D_q(E - E_0) \quad (2)$$

式中: J 为虚拟转动惯量,用于刻画构网变换器的惯性响应特性; D_p 为有功功率下垂系数; ω 为参考角速度; E 为内部电压参考值; ω_0 为系统的额定角速度; D_q 为无功功率下垂系数; E_0 为系统的额定电压幅值; P_{ref} 与 Q_{ref} 分别为变换器的有功功率和无功功率参考值; P_o 与 Q_o 分别为变换器的实际有功功率和无功功率输出。

Q_o 通过对PCC点输出电压与电流进行采样,并在功率计算模块处理后得到, P_o 与 Q_o 的表达式如下:

$$\begin{cases} P_o = \frac{3}{2}(v_{od}i_{od} + v_{oq}i_{oq}) \\ Q_o = \frac{3}{2}(v_{oq}i_{od} - v_{od}i_{oq}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: v_{od} 、 v_{oq} 分别为变换器输出电压的 d 轴和 q 轴分量; i_{od} 、 i_{oq} 分别为变换器输出电流的 d 轴和 q 轴分量。

为了提高构网变换器在宽范围短路比(Short Circuit Ratio, SCR)应用场景下的稳定性^[29],本文采用虚拟导纳控制+PI控制结合的电压电流双环控制结构。其中电压外环用于生成电流环的参考输入信号,从而实现对输出电压的有效控制。电流环采用PI控制器,以实现对参考信号的快速跟踪,从而有效消除电流跟踪误差,确保电流动态响

应性能。电流环的输出信号经过 Park 变换由 dq 坐标系转换至 abc 坐标系,并在此基础上生成 PWM 调制波,作为开关信号作用于变换器功率器件,从而实现交流侧的正弦信号输出。

2 电网故障暂态特征

构网型变换器通过内部控制能够主动构建电压与频率,因此在系统建模中可等效为受控电压源。在正常运行模式下,进一步考虑虚拟导纳控制,其动态特性可以表征为电压源与串联虚拟阻抗相结合的结构形式。基于此,整个系统的等效阻抗模型如图 2 所示。其中 R_v 、 X_v 分别表示电压环引入的虚拟阻抗中的电阻和电抗分量, R_g 、 X_g 分别表示电网线路的电阻与感抗, V_g 表示网侧电压。

在坐标定义方面,本文规定内部电压参考 E 与 d 轴方向一致,进一步, δ 代表内部电压参考相位和电网电压相位之间的相位差,即 $\delta = \theta - \theta_g$,其中 θ 与 θ_g 分别为内部电压参考和电网电压的相位角。

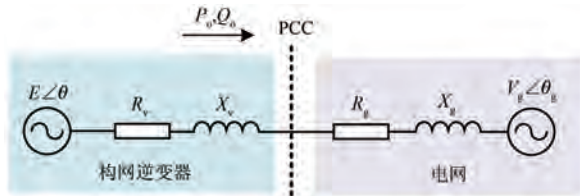


图 2 构网变换器等效模型

Fig. 2 Equivalent model of the GFM converter

图 3 给出了构网型变换器在正常工况与故障工况下的矢量关系对比图。由图 3(a)可见,当构网型变换器在正常运行条件下工作时,其输出电流幅值 I_o 通常被有效维持在额定电流 I_n 的范围内,保证了系统在稳态下的安全运行与电气设备的可靠性。

然而,当电网发生故障时,系统运行特性将发生显著变化,特别是在遭遇深度电压骤降等严重扰动情况下。功率控制环节能够维持故障前设定的内部电压参考值 E 不变,即 $E_t = E$ 。此时,为了满足预设的功率传输需求,变换器会被迫提升输出电流,从而导致电流幅值在短时间内急剧增加。输出电流可能迅速攀升至额定电流的数倍,极易触发器件过载或保护动作,如图 3(b)所示。故障后的电气量以下标“f”表示,用以区分故障前后的

运行状态。

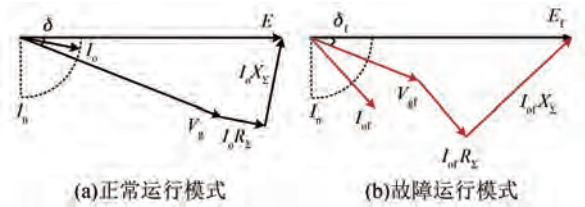


图 3 电网电压跌落前后对比矢量图

Fig. 3 Comparative vector diagrams before and after grid voltage sag

根据构网型变换器的等效模型及其与电网的相互作用关系,可推导出输出有功功率与无功功率的表达式:

$$P_o = \frac{3}{2} \cdot \frac{X_\Sigma E V_g \sin \delta + R_v (E V_g \cos \delta - V_g^2) + R_g (E^2 - E V_g \cos \delta)}{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2} \quad (4)$$

$$Q_o = \frac{3}{2} \cdot \frac{(X_v - X_g) E V_g \cos \delta - R_\Sigma E V_g \sin \delta + X_g E^2 - X_v V_g^2}{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2} \quad (5)$$

式中: R_Σ 、 X_Σ 分别为等效总阻抗和等效总感抗。

$$\begin{cases} R_\Sigma = R_v + R_g \\ X_\Sigma = X_v + X_g \end{cases} \quad (6)$$

基于功率传输表达式,进一步绘制了不同电网电压水平下的功角特性曲线,如图 4 所示。该曲线能够直观反映在电网电压变化条件下,功率随功角的动态变化规律。

根据功角曲线可得,随着网侧电压 V_g 下降,功角曲线整体呈下移趋势,系统可传输的最大功率逐渐减小,进而导致稳定平衡点发生变化。在 $V_g = 1.0$ p.u.时,功角曲线与有功功率参考 P_{ref} 的交点为 a 、 b 两点,其中 a 点为稳定平衡点,而 b 点为不稳定平衡点,对应功角分别为 δ_e 和 δ_{ce} ;当电网发生一般性故障时,网侧电压下降至 $V_{gf} = 0.6$ p.u.时,功角曲线仍然同 P_{ref} 存在两个平衡点 a_1 、 b_1 ,对应功角分别为 δ_{e1} 和 δ_{ce1} ;然而,当电网遭遇严重故障,导致网侧电压进一步下降至 $V_g = 0.2$ p.u.时,功角曲线与有功功率参考不存在交点,即不存在稳定平衡点,此时系统会产生暂态同

步失稳现象。

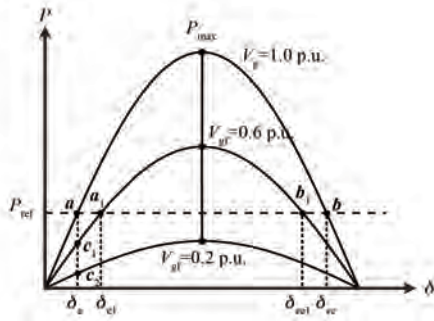


图4 不同电网电压下的功角特性曲线

Fig. 4 Power-angle characteristic curves under different grid voltages

鉴于实际系统中电阻值通常远小于电感值,其对电气特性影响可以忽略不计,因此本文在建模与分析中仅考虑电感元件的作用。在这一假设下,故障后的电压电流关系得以简化,相应的故障后矢量图如图5所示。

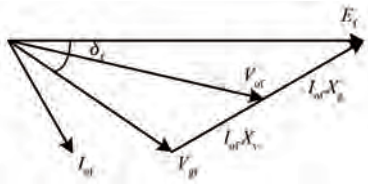


图5 故障后简化矢量图

Fig. 5 Simplified vector diagram after fault

在式(4)和式(5)基础上,结合等效阻抗模型与假设条件,此时构网型变换器的输出功率表达式可进一步简化为

$$\begin{cases} P_o = \frac{3}{2} \frac{EV_g \sin \delta}{X_\Sigma} \\ Q_o = \frac{3}{2} \frac{E^2 - EV_g \cos \delta}{X_\Sigma} \end{cases} \quad (7)$$

此外,基于图3(a)和图5,可进一步推导出在电网发生故障前后的变换器输出电流幅值的解析表达式:

$$\begin{cases} I_o = \sqrt{\frac{V_g^2 + E^2 - 2EV_g \cos \delta}{(X_\Sigma)^2}} \\ I_{of} = \sqrt{\frac{V_{gf}^2 + E^2 - 2V_{gf}E \cos \delta_i}{(X_\Sigma)^2}} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可知,输出的电流幅值不仅与系统故障程度密切相关,同时还受到线路阻抗参数及变换器运行状态的共同影响。进一步地,如图6

所示,通过对不同参数条件下的响应特性进行对比分析,可以清晰地揭示各因素对故障电流幅值的影响规律。

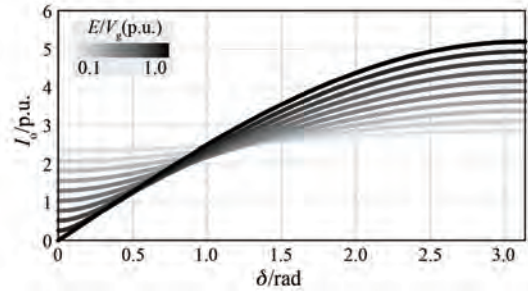


图6 不同参数对输出电流的影响

Fig. 6 Influence of different parameters on output current

由式(8)还可知,在保持其余参数不变的条件下,内部电压参考 E 与电网电压 V_g 对故障电流幅值 I_o 的影响规律是一致的。如图6所示,当功角处于较小范围时,随着电压幅值的降低,输出电流的幅值呈现上升趋势;而当功角增大至一定程度后,则表现出相反的变化规律,即电压下降反而导致电流幅值的减小。此外,在电压保持恒定的情况下,输出电流幅值仍随功角的变化而呈现显著波动,这进一步表明了功角不仅决定了电压与电流之间的相位关系,也在很大程度上影响了故障期间电流的幅值特性,该结果揭示了电压幅值与功角在电流响应过程中的耦合效应。

3 暂态性能提升策略

基于前文的理论分析,本文提出了一种适用于电网故障工况的构网型变换器暂态性能提升综合控制策略。该策略在实现故障电流有效抑制的同时,兼顾系统的同步稳定性,从而提升变换器在故障全过程中的动态响应性能与运行安全性,其框架如图7所示。该策略主要包含三个环节:首先,通过动态调整有功功率参考值,增强系统功角稳定性;其次,在故障工况下旁路传统无功功率控制环节,并引入电压调节参数 V_{adj} ,以在保持电压支撑能力的同时实现对故障过流的有效抑制;最后,引入浪涌电流控制回路,以在故障初始对浪涌电流实现快速限制,避免大幅度电流冲击对系统设备造成危害。

如图7所示,针对电网电压跌落后的功角失稳问题,本文采用基于输出电压自适应的有功

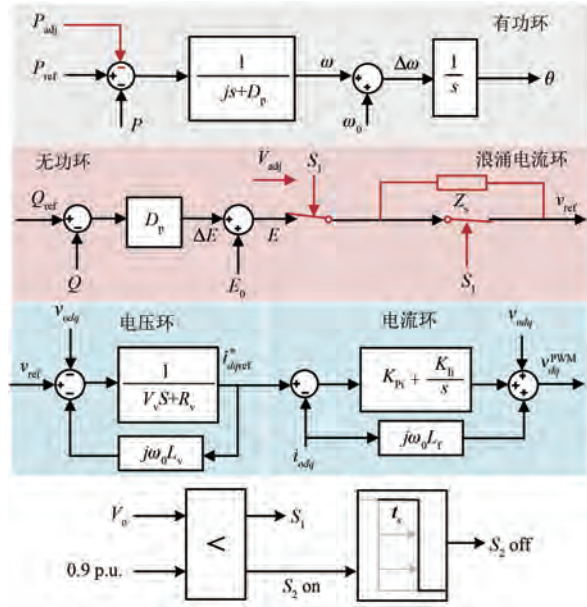


图 7 暂态性能提升策略整体框架图

Fig. 7 Overall strategic framework for enhancing transient performance

率调节策略,即在电网故障期间根据 PCC 点电压的跌落程度对有功功率参考值进行动态降低。通过该方式,可保证系统故障后的稳定平衡点,从而保证功角稳定性,具体的有功功率调节参数 P_{adj} 可由下式表示:

$$P_{adj} = \frac{V_o - V_{osag}}{V_o} \quad (9)$$

式中: V_o 和 V_{osag} 分别为故障前后的 PCC 电压幅值。

此外,如图 6 所示,故障期间的过流特性不仅受到电网电压幅值的影响,还与变换器的内部电压参考值及功角密切相关。当故障期间电流幅值被限制至限流值 I_{lim} 时,故障后过流表达式可表达为

$$I_{lim} = \sqrt{\frac{V_{gf}^2 + E_f^2 - 2V_{gf}E_f \cos \delta_f}{(X_\Sigma)^2}} \quad (10)$$

进一步地,由式 (10) 可推导得到在限流约束作用下系统的功角余弦解析表达式:

$$\cos^2 \delta = \frac{(V_{gf}^2 + E_f^2 - I_{lim}^2 X_\Sigma^2)^2}{4V_{gf}^2 E_f^2} \quad (11)$$

同样地,基于简化后的功率传输关系式 (7),可以进一步推导得到功角与系统参数之间的正弦函数关系。其解析形式为

$$\sin^2 \delta = \frac{4}{9} \frac{P_o^2 X_\Sigma^2}{V_{gf}^2 E_f^2} \quad (12)$$

结合式 (11) 和式 (12),并利用基本三角恒等式 $\sin^2 \delta + \cos^2 \delta = 1$,可以进一步对故障过流幅值表达式进行化简,从而消除功角变量对电流幅值的影响:

$$\frac{4}{9} \frac{P_o^2 X_\Sigma^2}{V_{gf}^2 E_f^2} + \frac{(V_{gf}^2 + E_f^2 - I_{lim}^2 X_\Sigma^2)^2}{4V_{gf}^2 E_f^2} = 1 \quad (13)$$

式 (13) 进一步化简可得:

$$E_f^4 - m_1 E_f^2 + m_2 = 0 \quad (14)$$

其中 m_1 、 m_2 分别代表:

$$\begin{cases} m_1 = 2(I_{lim}^2 X_\Sigma^2 + V_{gf}^2) \\ m_2 = (V_{gf}^2 - I_{lim}^2 X_\Sigma^2)^2 + \frac{16}{9} P_o^2 X_\Sigma^2 \end{cases} \quad (15)$$

由于电网电压幅值 V_{gf} 受外部系统条件制约,无法通过变换器自身控制加以调节,因此在故障发生后,故障电流幅值的有效抑制只能依赖于内部电压参考 E 的调整。为此,本文在所提策略中引入电压调节量 V_{adj} ,通过动态修正内部电压参考,实现对故障电流的快速约束,其中 V_{adj} 的解析表达式可由 (14) 进一步推导得到:

$$V_{adj} = k_v \sqrt{\frac{m_1 + \sqrt{m_1^2 - 4m_2}}{2}} \quad (16)$$

需要注意的是,由于 m_1 、 m_2 参数均与电网电压幅值 V_{gf} 密切相关,但在实际运行中, V_{gf} 的准确测量存在一定困难,难以直接应用于控制环节。为此,本文提出采用 PCC 电压 V_{of} 作为替代量,以避免对不可测参数的依赖。同时,引入调节系数 k_v 对因参数替代所引起的偏差进行补偿,从而实现电压调节量的有效修正与自适应调节。

最后,在故障初始时刻,系统电流中会叠加显著的非周期分量,形成幅值较大的浪涌电流。如果该浪涌电流不能得到及时抑制,可能会导致保护装置的误触发。考虑到电网短路故障,浪涌电流对应表达式为

$$i_{ol}(t) = \frac{E_f}{\sqrt{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}} \sin(\omega_0 t + \alpha - \varphi) + C e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (17)$$

式中: φ 为电路阻抗角; α 为初始相位角,即 $t=0$ 时的相位角; τ 为自由分量衰减的时间常数, C 为积分常数,由初始条件决定。

C 的表达式为

$$C = I_o(0) - \frac{E_f}{\sqrt{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}} \sin(\omega_0 t + \alpha - \varphi) \quad (18)$$

由式(17)可以看出,在故障期间引入虚拟阻抗 Z_s 能够有效抑制浪涌电流。在进行 Z_s 设计时,需要针对最严重的故障工况进行计算,即 $I_o(0) = 0$ 且 $\alpha - \varphi = 3\pi/2$,以确保控制策略在极端条件下仍具备可靠性,在此条件下,式(17)可等效为

$$i_{oi}(t) = \frac{E_f}{\sqrt{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}} \left[e^{-\frac{t}{\tau}} - \cos(\omega_0 t) \right] \quad (19)$$

在式(19)中,电流大约在半个基波周期时达到最大值 I_{olmax} :

$$I_{olmax} = \frac{3}{2} \frac{E_f}{\sqrt{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}} \quad (20)$$

因此,根据设计的电流限值 I_{lim} ,使得 $I_{olmax} = I_{lim}$ 可进一步计算得到满足该限值要求所需的浪涌电流抑制阻抗值 Z_s 。此外,为了兼顾较大的时间常数特性并简化控制实现方式,本文将虚拟阻抗 Z_s 设计为纯电阻形式。

4 试验验证

为了进一步验证前文理论分析的正确性,本文基于硬件在环(Hardware-in-the-Loop, HIL)平台开展了试验验证,其整体构成如图8所示。与传统方法相比,HIL技术能够在保证试验安全性的前提下实现对控制算法的实时验证,不仅具备较高的灵活性和可扩展性,还能够在不依赖大功率硬件设备的条件下真实反映控制器与电力电子系统之间的动态交互,该平台为本文所提策略的性能评估提供了有效支撑。在试验电路部分,直流侧电压设定为1300V,输出侧配置LC滤波器以抑制高频谐波分量,试验所采用的主要控制参数列于表1中。

为验证本文所提控制策略的有效性与优越性,在统一控制结构框架下(如图1所示),对不同控制策略的运行性能进行了试验对比分析,其中限流阈值统一设定为1.5 p.u.。图9为在电网电压骤降至0.2 p.u.条件下,GFM变换器在不同控制策略下的试验故障穿越响应对比结果。



图8 试验平台示意图

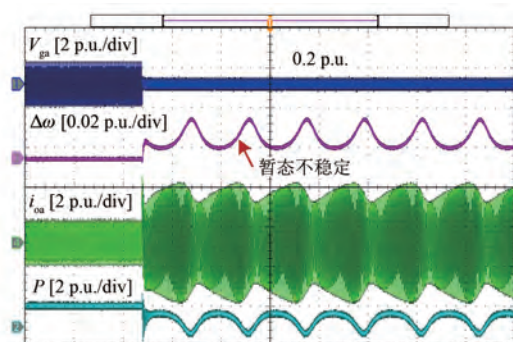
Fig. 8 Schematic of the experimental platform

表1 构网变流器的控制参数

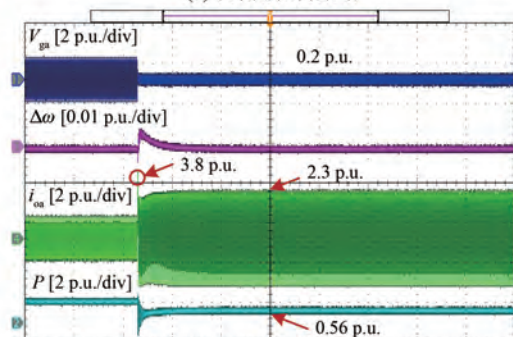
Tab. 1 Control parameters of the GFM converter

参数名称	参数值
网侧电压 V_g/V	690
功率基准值 P_{base}/kW	200
限流值 $I_{lim}/p.u.$	1.5
短路比	5
电网阻抗阻感比	0.1
额定输出有功功率 $P_0/p.u.$	1
额定输出无功功率 $Q_0/p.u.$	0
变换器输出电感值 L_f/H	0.000 2
变换器输出电容值 C_f/mF	10
理想直流电压源电压值 V_{dc}/V	1 300
虚拟阻抗电感值 $X_v/p.u.$	0.2
虚拟阻抗阻感比	0.01

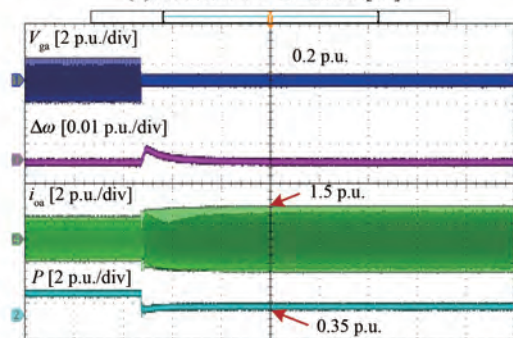
图9(a)对应未采用任何故障穿越控制策略的情形,可观察到,在电网电压突降后,由于系统缺乏稳定的工作点,GFM变换器的输出有功功率发生明显振荡,最终导致严重的同步失稳。同时,系统出现显著超过额定值的过电流现象。因此,为保证系统在严重电压扰动下的暂态稳定性,需引入适当的瞬态控制与电流抑制策略。图9(b)为仅引入功率调节 P_{adj} 策略后的系统动态响应,结果表明,当电网电压由1 p.u.骤降至0.2 p.u.时,系统虽未发生同步失稳,但GFM变换器输出电流达到了2.3 p.u.。并且,在故障初期仍可观察到高达3.8 p.u.的浪涌电流,表明单一功率调节策略在极端电压扰动下仍存在电流抑制不足的问题。进一步地,如图9(c)所示,当采用本文提出的综合控制策略时,在相同的电压跌落条件下,系统不仅



(a) 不采用任何策略



(b) 仅降低功率, 参考文献[19]



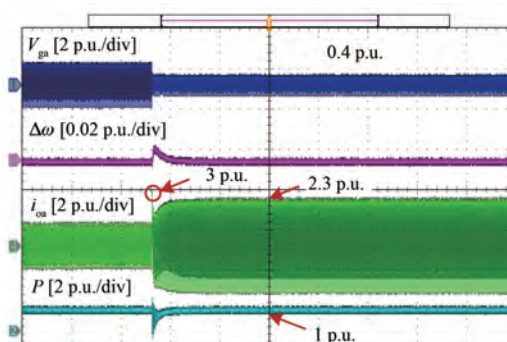
(c) 所提策略

图 9 电压跌落至 0.2 p.u. 的输出波形
Fig. 9 Output waveforms during voltage sag to 0.2 p.u.

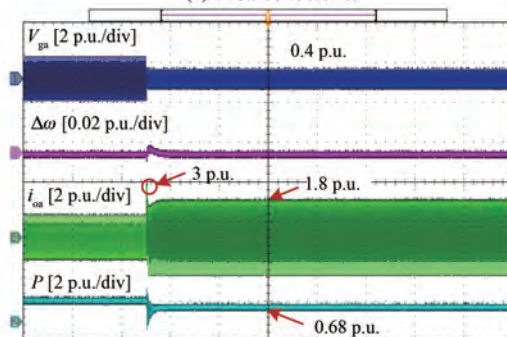
能够保持同步稳定性, 同时将浪涌电流与稳态输出电流均有效限制在 1.5 p.u. 以下, 显著增强了 GFM 变换器的故障穿越能力性能。

相较于图 9, 图 10 展示了在电网故障程度较轻的情况下 GFM 变换器的动态响应特性, 此时电网电压仅跌落至 0.4 p.u.。

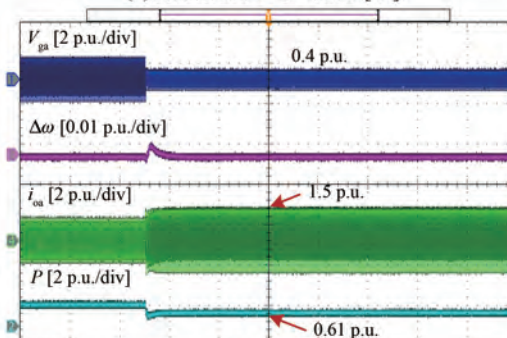
由图 10 可知, 由于电压跌落幅度较小, 系统仍然存在稳定平衡点, 即便未采用任何控制策略, 故障期间系统也不会发生同步失稳现象。然而, 在未实施任何策略以及仅采用功率参考下调策略的情况下, 系统均出现明显的过流与浪涌电流问



(a) 不采用任何策略



(b) 仅降低功率, 参考文献[19]



(c) 所提策略

图 10 电压跌落至 0.4 p.u. 的输出波形
Fig. 10 Output waveforms during voltage sag to 0.4 p.u.

题, 分别如图 10(a) 与图 10(b) 所示。相比之下, 当采用本文所提出的综合控制策略时, 如图 10(c) 所示, 系统在电网故障期间能够有效抑制过流现象, 保持电流波形平稳, 显著提升了 GFM 变换器在较轻电压扰动下的暂态电流控制性能与故障穿越能力。

综上所述, 试验结果验证了所提控制策略在提升构网型变换器不同工况下故障穿越能力方面的显著优势, 为 GFM 变换器在低电压穿越场景下的高性能稳定运行提供了一种有效且可行的技术途径。

5 结语

构网型并网储能变换器是以新能源为主体的新型电力系统安全稳定运行的关键,其在电网故障期间存在的过电流问题和低电压穿越能力不足是其面临的主要挑战。本文针对构网型变换器在电网电压跌落等故障条件下的暂态稳定性问题,开展了系统性的理论分析与试验验证研究。首先,建立了变换器故障前后统一的等效阻抗模型,并基于矢量关系与功率方程揭示了电压跌落引起的故障电流特性及其对功角动态的耦合影响,明确了电压幅值变化与功角偏移是导致过流与同步失稳的关键因素。其次,针对上述机理,提出了一种综合暂态性能提升策略:通过自适应调整有功功率参考以增强系统功角稳定性,并结合内部电压参考调节与浪涌电流抑制环,实现了故障全过程的电流限幅与稳定支撑。最后,通过试验平台的对比测试验证了所提方法的有效性。结果表明,传统控制策略下构网变换器在严重电压扰动中易出现功角失稳与过流,而本文提出的控制方法能够有效抑制故障电流、保持系统同步运行,并显著提升构网变换器在电压暂降工况下的动态支撑能力与故障穿越性能,为高比例新能源电力系统中构网型变换器的安全稳定运行提供了可行的技术途径。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

文骏宇、孙龙远、谢阳健进行了方案设计、内容总结与论文撰写,蓝心进行了试验研究,梁旭耀、王勇参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary and paper writing were carried out by Wen Junyu, Sun Longyuan and Xie Yangjian. The experiment was conducted by Lan Xin. The manuscript was revised by Liang Xuyao and Wang Yong. All authors have read the last version of paper and consented for

submission.

参考文献

- [1] 谢小荣,贺静波,毛航银,等.“双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-474.
- Xie X R, He J B, Mao H Y, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-474.
- [2] 刘志坚,洪朝飞,郭成,等. 基于 WRLS-ARMAX 系统辨识的新能源电力系统惯量评估[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(7): 84-93.
- Liu Z J, Hong C F, Guo C, et al. Inertia estimation of new energy power system based on WRLS-ARMAX system identification [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(7): 84-93.
- [3] 孙思男,郝正航. 基于自适应 VSG 控制的光伏并网系统[J]. 电子科技, 2022, 35(9): 22-29.
- Sun S N, Hao Z H. Photovoltaic grid-connected system based on adaptive VSG control [J]. Electronic Science and Technology, 2022, 35(9): 22-29.
- [4] 舒印彪,陈国平,贺静波,等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 61-69.
- Shu Y B, Chen G P, He J B, et al. Building a new electric power system based on new energy sources [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.
- [5] 唐王倩云,周保荣,胡家兵,等. 锁相同步型风机-同步机互联电力系统转子转速尺度暂态同步稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 6900-6916.
- Tang W Q Y, Zhou B R, Hu J B, et al. Transient synchronous stability of PLL-based wind power-synchronous generation interconnected power system in rotor speed control timescale [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 6900-6916.
- [6] 史兴华,张雪垠,甘纯,等. 基于主动电压抬升的光伏全直流汇集与送出系统网侧故障穿越策略[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(4): 20-28.
- Shi X H, Zhang X Y, Gan C, et al. Fault ride-through strategy for PV full DC collection and transmission system based on active voltage rising method [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(4): 20-28.

- [7] 黄萌, 舒思睿, 李锡林, 等. 面向同步稳定性的电力电子并网变流器分析与控制研究综述[J]. 电工技术学报, 2024, 39(19): 5978-5994.
- Huang M, Shu S R, Li X L, et al. A review of synchronization-stability-oriented analysis and control of power electronic grid-connected converters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(19): 5978-5994.
- [8] 许诒翊, 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): 3586-3595.
- Xu J Y, Liu W, Liu S, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology [J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3586-3595.
- [9] 李萌, 姚增慧, 包博, 等. “双高”电力系统暂态电压稳定新问题综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2026, 46(2): 462-477.
- Li M, Yao Z H, Bao B, et al. Review and prospect of new transient voltage stability issues in power systems with high proportion of renewables and power electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(2): 462-477.
- [10] 李智, 刘辉, 刘明波, 等. 虚拟同步发电机并网稳定性与控制技术研究综述[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(11): 1-10.
- Li Z, Liu H, Liu M B, et al. Research overview of grid-connected virtual synchronous generator stability and control technologies [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(11): 1-10.
- [11] 陈磊, 郑燊聪, 郭瑶, 等. 基于惯量-阻尼动态调整的跟网-构网变流器并联系统暂态稳定控制方法[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(9): 924-934.
- Chen L, Zheng S C, Guo Y, et al. Transient stability control method for parallel system of grid-following and grid-forming converters based on dynamic adjustment of inertia-damping [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(9): 924-934.
- [12] 黄晓芸, 李杰生, 蒋仁战, 等. 考虑阻感比变化的构网型变流器功率解耦控制方法[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(12): 26-38.
- Huang X Y, Li J S, Jiang R Z, et al. Power decoupling control method for grid-forming converters considering changes in resistance-inductance ratio [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(12): 26-38.
- [13] 詹长江, 吴恒, 王雄飞, 等. 构网型变流器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2339-2359.
- Zhan C J, Wu H, Wang X F, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2339-2359.
- [14] Hooshyar A, Iravani R. Microgrid protection [J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1332-1353.
- [15] 李奕杰, 陈良亮, 孔庆朝, 等. 新型耦合电感阻抗源逆变器应力简化分析方法[J]. 电气工程学报, 2022, 17(3): 138-146.
- Li Y J, Chen L L, Kong Q C, et al. A simplified stress analysis method for coupled-inductor impedance-source inverters [J]. Journal of Electrical Engineering, 2022, 17(3): 138-146.
- [16] 张长春, 赵尚, 杨弘诚, 等. 光伏并网逆变器内部短路故障耐受性能试验研究[J]. 高压电器, 2022, 58(7): 28-33.
- Zhang C C, Zhao S, Yang H C, et al. Research on withstand performance test of internal short circuit fault of photovoltaic grid connected inverter [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 28-33.
- [17] 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): 2911-2925.
- Liang S, Yao L Z, Xu J, 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): 2911-2925.
- [18] Schweizer M, Almér S, Pettersson S, et al. Grid-forming vector current control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(11): 13091-13106.
- [19] 陈天一, 陈来军, 郑天文, 等. 基于模式平滑切换的虚拟同步发电机低电压穿越控制方法[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2134-2140.
- Chen T Y, Chen L J, Zheng T W, et al. LVRT control method of virtual synchronous generator based on mode smooth switching [J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2134-2140.
- [20] Liu T, Wang X F, Liu F C, et al. A current limiting method for single-loop voltage-magnitude controlled

- grid-forming converters during symmetrical faults [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(4): 4751-4763.
- [21] Fan B, Liu T, Zhao F Z, et al. A review of current-limiting control of grid-forming inverters under symmetrical disturbances [J]. IEEE Open Journal of Power Electronics, 2022, 3: 955-969.
- [22] Paquette A D, Divan D M. Virtual impedance current limiting for inverters in microgrids with synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2): 1630-1638.
- [23] Baeckeland N, Chatterjee D, Lu M H, et al. Overcurrent limiting in grid-forming inverters: a comprehensive review and discussion [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(11): 14493-14517.
- [24] Zhang Y, Zhang C, Yang R X, et al. Current-constrained power-angle characterization method for transient stability analysis of grid-forming voltage source converters [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(2): 1338-1349.
- [25] 张余余, 赵晋斌, 李芬, 等. 基于功角动态补偿的 VSG 故障穿越方法研究[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3667-3673.
- Zhang Y Y, Zhao J B, Li F, et al. VSG fault crossing method based on dynamic compensation of power angle [J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3667-3673.
- [26] Taul M G, Wang X F, 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.
- [27] Deng H, Qi Y, Fang J Y, et al. A robust low-voltage-ride-through strategy for grid-forming converters based on reactive power synchronization [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(1): 346-357.
- [28] Baeckeland N, Yang B W, Seo G. Transient stability-enhancing method for grid-forming inverters under current limiting [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(5): 6714-6725.
- [29] Xiong X L, Wu C, Blaabjerg F. Effects of virtual resistance on transient stability of virtual synchronous generators under grid voltage sag [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(5): 4754-4764.

收稿日期:2026-02-13

收到修改稿日期:2026-04-19

作者简介:

文骏宇(1991—),男,学士,中级工程师,研究方向为电气自动化,578978697@qq.com;

*通信作者:梁旭耀(1974—),男,学士,高级工程师,研究方向为电气自动化、微电网协同控制,1608809434@qq.com。