

# 考虑源侧电压跌落与故障重合闸的下垂逆变器优化控制策略

彭子豪<sup>1</sup>, 肖凡<sup>1</sup>, 涂春鸣<sup>1</sup>, 郭祺<sup>1</sup>, 谢伟杰<sup>1</sup>, 汪清<sup>2</sup>

(1. 国家电能变换与控制工程技术研究中心(湖南大学), 湖南省长沙市 410082;

2. 深圳供电局有限公司, 广东省深圳市 518000)

**摘要:** 配电网源侧电压跌落将导致下垂并网逆变器暂态失稳,随之而来的传统无检重合闸又会带来过电流问题,逆变器安全运行面临巨大挑战。文中针对配电网源侧电压跌落时下垂逆变器暂态功角失稳和过电流问题,以及传统无检自动重合闸时产生冲击电流问题,提出一种故障暂态全周期的下垂逆变器优化控制方法。该方法有效提高了逆变器并网运行稳定性,减小重合闸时冲击电流,实现平滑并网。首先,分析了故障期间逆变器暂态特性及重合闸瞬时过电压与高压侧断路器两侧电压幅值、相角和频率偏差之间的规律。其次,在电压跌落阶段,根据下垂逆变器有功功率关于并网点电压输出特性和无功功率对线路电流幅值影响关系,结合实际工况动态调整逆变器功率参考值,控制故障前后暂态功角稳定,限制逆变器输出电流在安全阈值之下;在重合闸过渡阶段,引入频率-相角综合调节机制来减小电压频率差和相角差,相比于现有并网控制机制减少了指令计算环节比例-积分(PI)控制器的数量,极大地缩短了准同期所需时间。最后,结合仿真与实验结果,证明了理论分析与所提方法的正确性。

**关键词:** 下垂逆变器; 暂态功角控制; 故障限流控制; 准同期; 自动重合闸

## 0 引言

近年来,随着新型可再生能源发电装机容量迅速增加,分布式能源通过电力电子变流器大量接入电网<sup>[1-2]</sup>,变流器安全稳定运行对新能源可靠并网意义重大<sup>[3-4]</sup>。结合目前国内外研究,交流系统中的并网逆变器可分为构网型(grid-forming, GFM)逆变器和跟网型(grid-following, GFL)逆变器两类<sup>[5]</sup>。下垂逆变器作为一种GFM逆变器,其具备为电网提供电压和频率支撑的能力<sup>[6]</sup>,以及无须依赖于外部传输相位信息的同步控制方式<sup>[7]</sup>,被广泛应用于新能源并网<sup>[8]</sup>。

在配电网源侧电压跌落时,下垂逆变器运行过程中存在一系列暂态问题<sup>[9-10]</sup>。这些问题主要体现在以下两个方面:电压跌落时下垂逆变器会出现与同步发电机类似的暂态功角失稳问题<sup>[11-12]</sup>;下垂逆变器中的电力电子器件过电流能力较弱,配电网源侧电压跌落时会出现因过电流导致开关器件损毁的问题<sup>[13-14]</sup>。在电压跌落持续一定时间后,区域配

网可依据上级电网运行状态选择离网运行,从而保障对其内部负荷不间断供电<sup>[15]</sup>。在断路器动作后的重合闸过渡阶段,下垂逆变器带负载短暂孤岛运行<sup>[16]</sup>。受负载影响,逆变器输出电压的幅值、相角和频率会出现偏差,若逆变器不采用合理的控制策略,配电网无检重合闸时将产生巨大的冲击电流,威胁到逆变器运行稳定性。由此可见,在配电网源侧电压跌落期间,对下垂逆变器稳定性及故障后重合闸平滑并网过程的深入分析具有重要意义。

现有研究往往将低电压穿越控制与准同期控制作为两个独立问题加以解决,鲜有研究在重合闸过渡阶段,考虑配电网故障工况和下垂逆变器低电压穿越过程对断路器重合闸的影响,缺乏故障全周期稳定性分析。配电网电压跌落后,下垂逆变器进行低电压穿越:1)在暂态功角稳定控制策略研究上,主要有调整有功功率指令值<sup>[13,17]</sup>、负反馈调节<sup>[18-19]</sup>和改变控制结构<sup>[20-21]</sup>几种方法,但存在忽略无功环路的影响或没有考虑下垂逆变器过电流等问题。2)在电流限幅控制策略研究上,文献[22-23]通过切换逆变器控制方式为电网跟随控制模式实现限幅,但存在失去同步的高风险<sup>[24]</sup>;文献[25-26]通过引入虚拟阻抗来限制逆变器输出电流,但会降低逆变器

收稿日期: 2024-04-17; 修回日期: 2024-09-11。

上网日期: 2024-10-28。

国家自然科学基金资助项目(52077072)。

系统的暂态稳定性<sup>[27]</sup>。3)在准同期控制策略研究上,文献[28]在逆变器并-离网过程中改变了逆变器的控制方式,但这类控制策略没有考虑孤岛检测时间延迟的影响,在逆变器突然脱网工况下难以瞬时完成控制模式的切换<sup>[29]</sup>。

基于此,本文针对配电网电压跌落后断路器动作导致逆变器短暂离网后再重合闸的运行工况,考虑低电压穿越控制和准同期控制之间的配合关系,兼顾故障时逆变器并网稳定运行、离网后对负荷高可靠供电和重合闸前快速准同期的要求,提出一种配电网故障重合闸全周期控制策略。首先,分析了在配电网源侧电压跌落时下垂逆变器功角和输出电流的暂态特性,总结了重合闸瞬时电压差关于断路器两侧电压幅值差、频率差和相角差的变化规律。其次,提出一种面向配电网源侧电压跌落时的下垂逆变器全周期控制策略。在低电压穿越阶段,根据电压跌落程度,结合逆变器有功功率关于并网电压的输出特性和无功功率对线路电流幅值的影响关系,动态调节逆变器参考功率,保障电压跌落期间逆变器安全稳定运行;在重合闸过渡阶段,以10 kV高压侧断路器为研究对象,兼顾逆变器稳定性和重合闸并网标准,优化无功-电压环以减小电压幅值差,引入频率-相角综合控制环节以减小电压相角差和频率差,实现重合闸无冲击并网目的。最后,结合仿真和实验证明了理论分析与控制策略的正确性和有效性。

## 1 源侧电压跌落下逆变器暂态特性分析

图1所示为基于下垂控制的光伏逆变器的主电路结构和控制结构图。图中: $L_g$ 为线路电抗; $L_f$ 和 $C_f$ 分别为滤波电感和滤波电容;Load为配电网负荷;QF为10 kV高压侧断路器; $u$ 、 $i$ 分别为下垂逆变器输出电压和电流; $U_m$ 、 $I_m$ 分别为正常工况下逆变器输出电压和电流幅值; $U_{dc}$ 为逆变器直流侧电压值; $U_{pcc}$ 为逆变器公共连接点(point of common coupling, PCC)电压幅值; $U_g$ 为配电网侧电压幅值; $U_h$ 为变压器高压侧电压幅值; $\delta$ 为虚拟功角; $e$ 为合成电压指令。

下垂逆变器控制环节的有功-频率和无功-电压控制方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} P_0 - P_e = k_p(\omega - \omega_N) \\ Q_0 - Q_e = -k_q(U_N - E) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_0$ 、 $P_e$ 分别为下垂逆变器有功功率参考值和实际输出值; $\omega_N$ 、 $\omega$ 分别为虚拟转速额定值和实际值; $k_p$ 、 $k_q$ 分别为有功-频率与无功-电压下垂系数; $Q_0$ 、 $Q_e$

分别为无功功率参考值和实际输出值; $U_N$ 、 $E$ 分别为额定电压幅值和电压指令值。

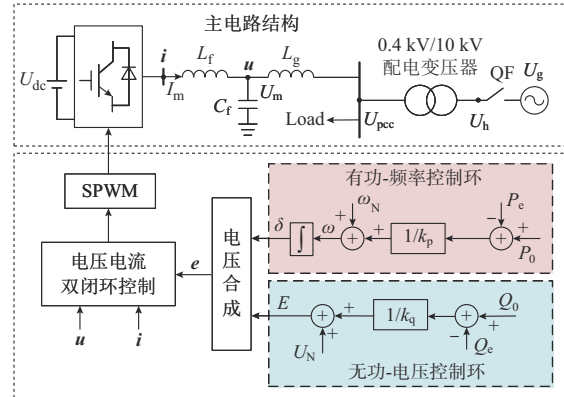


图1 下垂逆变器主电路结构和控制结构

Fig. 1 Main-circuit structure and control structure of droop-controlled inverter

附录A图A1为配电网源侧电压跌落后的动作时序图。在重合闸过渡阶段,受负荷影响,下垂逆变器输出电压与电网侧电压存在偏差。传统无检重合闸时,会产生一定冲击损坏逆变器器件,致使重合闸失败。

### 1.1 下垂逆变器的暂态功角特性和输出电流特性

下垂逆变器向配电网输送的有功、无功功率如式(2)所示。

$$\begin{cases} P_e = \frac{3U_m U_{pcc} \sin \delta}{2X_g} \\ Q_e = \frac{3U_m (U_m - U_{pcc} \cos \delta)}{2X_g} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $X_g = \omega L_g$ 为线路电抗。

在配电网源侧电压跌落前后,线路电抗值可能出现变化,其实际值可以通过系统原始状态评估或实时测量获得<sup>[30]</sup>,但这不是本文的主要研究内容,故将 $X_g$ 视为一个恒定值。

下垂逆变器有功-频率控制方程呈现出一阶特性,功角的变化率与逆变器有功功率输入、输出差值密切相关。附录A图A2为不同工况时下垂逆变器功角曲线、 $\delta$ - $t$ 曲线和 $d\delta$ - $d$ - $t$ 曲线。图A2(a)表示电压跌落存在功率平衡点的工况,以曲线II为例分析,下垂逆变器初始运行状态在 $A_1$ 点,对应的初始功角为 $\delta_0$ ,电压跌落后运行点跳变到 $B_3$ 点,随后沿曲线II运动到新的功率平衡点 $B_1$ ,功角将稳定在 $\delta_1$ 。图A2(b)为不存在功率平衡点的工况,以曲线III为例分析, $A_1$ 点发生电压跌落后,功角变化率周期变化且恒大于零,功角不断增大,系统最后失稳。由图A2(c)可知,该工况下功角和功角变化率都存在稳定值,逆变器能够实现暂态稳定。

在图1所示系统中,当配电网源侧电压跌落为 $U_{gF}$ 时,记逆变器输出电压为 $U_{mF}$ ,并网点电压幅值为 $U_{pccF}=U_{gF}\times 0.4/10$ ,故障期间逆变器输出电流为 $I_F$ ,其计算表达式如式(3)所示。

$$L_g \frac{di_F}{dt} = U_{mF} \sin(\omega t) - U_{pccF} \sin(\omega t - \delta_F) \quad (3)$$

式中: $\delta_F$ 为电压跌落后下垂逆变器的功角; $i_F$ 为逆变器输出电流随时间变化值。

进而,可得 $I_F$ 表达式为:

$$I_F = \frac{\sqrt{U_{pccF}^2 + U_{mF}^2 - 2U_{pccF}U_{mF} \cos \delta_F}}{|X_g|} \quad (4)$$

结合上文分析可知,在配电网源侧电压跌落后,若存在功率平衡点,则逆变器功角稳定于 $\delta_F = \delta_1 > \delta_0$ ;若电压跌落后不存在功率平衡点,则逆变器功角失稳,输出电流随功角周期振荡并不断增大最后失控。附录A图A3为配电网电压分别跌落至0.5 p.u.和0.2 p.u.时的逆变器输出波形。

## 1.2 非同期合闸瞬时电压差变化规律

在配电网源侧电压跌落持续一定时间后,区域配电网将脱网进入重合闸过渡阶段<sup>[31]</sup>。附录A图A4为断路器动作后两侧电压频率、相角及线路电流波形。如图A4(a)所示,在该阶段若不采用合适的控制策略调整下垂逆变器输出电压,则变压器高压侧电压将与配电网侧电压存在较大的频率和相角偏差。此时,直接进行重合闸将会产生较大的冲击电流,其波形如图A4(b)所示。为减小重合闸过电流冲击,应在断路器合闸前调节变压器高压侧电压幅值、相角和频率到并网标准范围内<sup>[32]</sup>。

以变压器高压侧A相电压为例展开分析。重合闸时产生的瞬时电压差 $\Delta u$ 与配电网侧电压、变压器高压侧电压的幅值、相角和频率的关系为:

$$\Delta u = U_g \sin(\omega_g t + \theta_g) - U_h(t) \sin[\omega_h t + \theta_h(t)] \quad (5)$$

式中: $\omega_g$ 和 $\theta_g$ 分别为配电网电压角频率和初始相角; $\omega_h$ 和 $\theta_h$ 分别为变压器高压侧电压角频率和初始相角。记瞬时幅值差 $\Delta U = U_g - U_h$ 、瞬时相角差 $\Delta \theta = \theta_g - \theta_h$ 、瞬时频率差 $\Delta \omega = \omega_g - \omega_h$ 。

下垂逆变器在重合闸过渡阶段稳定运行时,基于无功-电压环调节可以控制 $\Delta U$ 在并网标准范围内,无须额外增加控制策略。而 $\Delta \theta$ 和 $\Delta \omega$ 受控制策略和本地负荷影响,逆变器离网运行后存在较大偏差。附录A图A5为 $\Delta u$ 关于 $\Delta \theta$ 和 $\Delta \omega$ 在 $[-\pi, \pi]$ 区间内的变化关系映射图。由图A5(a)可知,在 $\Delta \theta \in [-\pi/2, \pi/2]$ 区间内 $\Delta u$ 增长速率较大,当相角差超出并网标准范围较小值时,将会额外产生较大

的瞬时电压差。由图A5(b)可知, $\Delta \omega$ 越大, $\Delta u$ 幅值随时间增长速率越快,对重合闸的影响越大。当 $\Delta \omega$ 为 $0.1\pi$ 和 $\pi$ 时, $\Delta u$ 上升到100 V所需的时间分别为0.520 s和0.119 s。可见,若能够限制 $\Delta \theta$ 和 $\Delta \omega$ 在很小范围内,则能够有效抑制重合闸时的瞬时电压差值。

综上所述,在重合闸过渡阶段通过无功-电压环控制减小电压幅值偏差,引入相角、频率准同期控制策略快速调节电压的相角和频率偏差,控制电压幅值、相角和频率均在并网标准范围内,降低重合闸瞬时过电压大小,实现重合闸平滑并网。

## 2 下垂逆变器重合闸全周期控制策略

配电网源侧电压跌落后,相关并网逆变器技术要求标准中规定光伏电站在一定电压跌落范围和时间间隔内保证不脱网连续运行。附录A图A6(a)中绘制了低电压穿越曲线不同时间和电压等级下对应的区域<sup>[33]</sup>。其中,蓝色区域为低电压穿越区域,该区域内逆变器必须保证不间断并网运行;当并网点电压在曲线1以下时,光伏逆变器允许脱网,在图中黄色区域内逆变器可以短暂孤岛运行,即本文所提重合闸过渡阶段;若进入绿色区域,则会触发防孤岛保护机制。附录A图A6(b)为GB/T 37408—2019中逆变器低电压穿越能力要求曲线图<sup>[34]</sup>,并给出了低电压穿越时间和交流侧电压等级详细数据。

基于此,针对配电网源侧电压跌落后区域电网非计划短暂孤岛运行工况,即当并网点电压在附录A图A6(b)中电压轮廓线以下时,本章提出一种重合闸全周期控制策略,其控制时序图如附录A图A7所示。电压跌落期间,结合下垂逆变器功角曲线、有功功率关于电压的输出特性,以及无功功率对线路电流的影响关系,动态调节功率参考值以维持逆变器暂态功角稳定,限制输出电流幅值,同时向系统提供一定的无功支撑。在重合闸过渡阶段,引入基于电压瞬时值交叉计算的相角-频率综合控制,减小频率和相角偏差,实现重合闸时区域配电网平滑并网。

### 2.1 基于功率调整的下垂逆变器低电压穿越方法

配电网源侧电压跌落前后,记电压跌落系数为 $k$ ,即 $U_{pccF} = kU_{pcc}$ 。结合附录A图A2和图A3分析可知,在配电网电压跌落后( $U_{gF} < U' = 0.9U_g$ ,其中, $U'$ 为配电网允许的最低电压波动值),无论系统是否存在稳定平衡点,若不对逆变器进行控制,其功角值都会偏离初始值。若对逆变器有功功率参考值进行控制,调节 $P_0$ 为不同故障下有功功率指令值 $P_{F,II}$ 、 $P_{F,III}$ 后系统存在功率平衡点,则可以通过调节逆变器有功功率参考值实现功角稳定。

配电网源侧电压跌落前后逆变器输出有功功率比值为:

$$\frac{P_{eF}}{P_{e0}} = \frac{1.5U_{mF}U_{pccF} \sin \delta_F / X_g}{1.5U_m U_{pcc} \sin \delta_0 / X_g} = k \frac{U_{mF} \sin \delta_F}{U_m \sin \delta_0} \quad (6)$$

式中:  $P_{e0}$  和  $P_{eF}$  分别为故障前、后逆变器输出有功功率。

进而, 得到配电网电压跌落前后逆变器功角为:

$$\delta_F = \arcsin \frac{P_{eF} U_m \sin \delta_0}{k P_{e0} U_{mF}} \quad (7)$$

$P_{eF}$  受下垂有功-频率控制环参考有功功率影响, 可以根据式(8)调整  $P_0$  为故障下有功功率指令  $P_F$ , 控制配电网侧电压跌落前后逆变器暂态功角值不变。

$$P_F = k P_0 \frac{U_{mF}}{U_m} \quad (8)$$

结合式(1)、式(2)可得, 无功-电压控制环输出的电压指令如式(9)所示。由于功率外环带宽很小, 在分析逆变器功角稳定性时, 可以认为  $U_m$  能够无差跟踪  $E$ 。

$$U_m = E = \frac{1}{6} \left[ a + \sqrt{a^2 + 24X_g(kU_N + Q_0)} \right] \quad (9)$$

式中:  $a = 3U_{pcc} \cos \delta_0 - 2k_q X_g$

将式(9)代入式(4), 可得逆变器输出电流关于配电网侧电压和功角的表达式如式(10)所示。

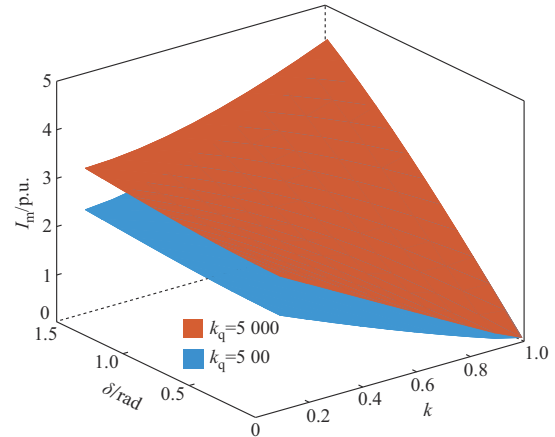
$$I_F = \frac{\sqrt{U_{pccF}^2 + \frac{b^2}{36} - \frac{1}{3} U_{pccF} b \cos \delta_F}}{|X_g|} \quad (10)$$

式中:  $b = 3U_{pccF} \cos \delta_0 - 2k_q X_g + [(3U_{pccF} \cos \delta_0 - 2k_q X_g)^2 + 24X_g k_q U_N]^{0.5}$ 。

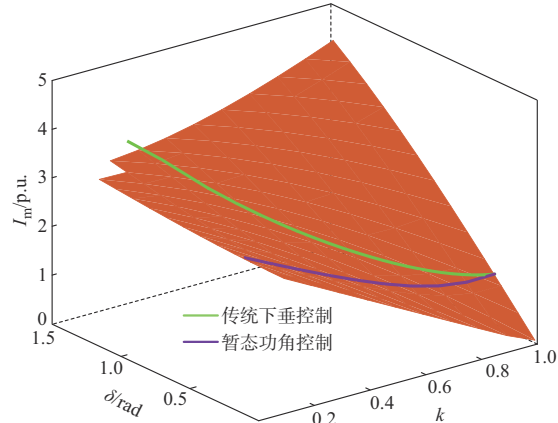
根据式(10)绘制  $I_m$  关于  $k$  和  $\delta$  三者之间的关系如图2所示。由图2(a)分析可知, 当  $k_q = 5000$  时, 在任意电压等级下  $I_m$  值都比  $k_q = 500$  时大。分析图2(b)可知, 相同电压跌落系数时暂态功角控制下  $I_m$  更小, 逆变器输出电流达到安全阈值对应的电压跌落系数更低。

在配电网电压跌落时, 电网规程要求逆变器能够保持并网状态并向系统注入一定的无功功率。由式(1)可知, 逆变器并网点电压和输出无功功率与无功-电压下垂系数相关, 在附录A图A8中分别绘制了  $U_{pcc}$  和  $Q_e$  关于  $k$  的变化关系。由图A8可知, 在配电网侧电压跌落时,  $k_q$  值越小, 逆变器输出无功功率越小, 并网点电压越低, 不利于下垂逆变器在故障工况下的并网稳定运行。

综上所述, 兼顾配电网电压跌落时下垂逆变器暂态功角稳定性、输出电流和并网点电压特性, 在本文中取  $k_q$  为 2000, 得到如附录A图A9所示的下垂



(a) 不同  $k_q$  值下逆变器输出电流与电压跌落系数和功角的关系



(b)  $k_q = 5000$  时不同控制策略下逆变器输出电流与电压跌落系数和功角的关系

图2 不同  $k$  值与控制策略下的  $I_m$  变化  
Fig. 2 Variation of  $I_m$  with different  $k$  values and control strategies

逆变器输出电流随配电网电压变化曲线。在暂态功角控制下, 配电网电压跌落一定范围 ( $U'' < U_g < U'$ ,  $U''$  为暂态功角控制限流能力临界电压) 内, 可限制逆变器输出电流在安全阈值内, 为留有一定裕度, 取  $U'' = 0.6U_g$ 。

当  $U_g < U''$  时, 仅通过暂态功角控制难以限制逆变器输出电流在安全阈值内。由式(4)可知, 逆变器输出电流还与输出电压相关, 故可以通过无功-电压控制环调节参考无功功率, 控制输出电压大小进而限制输出电流幅值, 同时还能配电网提供无功支撑。由式(4)可得  $U_{mF}$  为:

$$U_{mF} = U_{pccF} \cos \delta_0 + \sqrt{(I_F X_g)^2 - (U_{gF} \sin \delta_0)^2} \quad (11)$$

调节式(11)中  $I_F$ , 限制其幅值为安全阈值  $1.5I_m$ , 代入式(2)可得电压跌落期间无功功率调整值  $Q_F$ , 即

$$Q_F = \frac{3c(kU_g \cos \delta_0 + c)}{2X_g} \quad (12)$$

式中:  $c = [(1.5I_N X_g)^2 - (kU_{pcc} \sin \delta_0)^2]^{0.5}$ 。

因此,当检测到配电网源侧电压跌落,即  $U_g < U'$  时,根据式(8)调节逆变器参考有功功率控制故障前后功角稳定。当  $U_g < U''$  时,根据式(12)调节参考无功功率来限制逆变器输出电流幅值,同时为配电网提供无功支撑。为保证逆变器输出无功功率能够无差跟踪指令值,在  $U_g < U''$  后改变无功-电压控制方程如式(13)所示,在合适的参数控制下,配电网电压跌落时,逆变器输出电流可以实现无超调过渡,避免大电流带来的负面影响。

$$Q_0 - Q_e = \left( k_{qp} + \frac{k_{qi}}{s} \right) (U_N - E) \quad (13)$$

式中:  $k_{qp}$  为无功-电压下垂比例系数;  $k_{qi}$  为无功-电压下垂积分系数。

## 2.2 配电网自动重合闸准同期控制策略

传统区域配电网准同期并网方法大多基于重合闸前微电网/逆变器系统已经是稳定运行状态,围绕电压幅值、相角和频率分别进行调节,其主要控制模块如附录 A 图 A10 所示。当区域配电网由孤岛向并网运行模式转换时,其中的控制模块先检测配电网侧电压和孤岛系统并网点电压的幅值、相角和频率,通过具备调压和调频能力的逆变器给定二次调压、二次调频指令进行调节,在断路器两侧电压满足合闸条件后,发出并网信号实现模式切换。传统准同期控制中,比例-积分(PI)环节数目多,且相角与频率之间存在耦合关系,参数调节难以控制,一定程度上降低了准同期并网的时效性。

本节所提准同期控制策略是针对非计划孤岛工况的重合闸,考虑逆变器暂态过程带来的影响,以重合闸过渡阶段逆变器稳定运行和重合闸时平滑并网为目标,对原有控制进行优化并引入频率-相角综合调节机制。电压幅值调节上,在逆变器无功-电压环作用下控制输出电压在 311 V 附近,断路器两侧电压差满足并网标准要求,无须额外增加控制。频率和相角调节上,使用电压瞬时值交叉计算方法,该方法将频率调节和相角调节环节统一,以减轻相角和频率之间的耦合影响;同时,相比于传统控制减少了两组指令计算环节 PI 控制器的数量,能够快速实现相角和频率的同步。考虑断路器老化后合闸时间具有不确定性,本文控制策略对有功-频率控制环进行相应延时,以避免断路器尚未重合闸而控制先退出的问题。基于以上控制,重合闸过渡期间逆变器输出工频电压,保障所带负荷正常工作,重合闸瞬间没有冲击电流实现平滑并网。

在重合闸过渡阶段的任意时刻,  $U_g$ 、 $U_h$  在  $\alpha\beta$  静止坐标系的分量  $u_{g\alpha}$ 、 $u_{g\beta}$ 、 $u_{h\alpha}$ 、 $u_{h\beta}$  满足式(14)。

$$\begin{cases} u_{g\alpha} = U_g \cos \varphi_g \\ u_{g\beta} = U_g \sin \varphi_g \\ u_{h\alpha} = U_h \cos \varphi_h \\ u_{h\beta} = U_h \sin \varphi_h \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $\varphi_g$  和  $\varphi_h$  为实际相角值,与  $\theta_g$  和  $\theta_h$  的关系为

$$\begin{cases} \varphi_g = \omega_g t + \theta_g \\ \varphi_h = \omega_h t + \theta_h \end{cases} \quad (15)$$

由式(14)可得交叉项  $(u_{h\alpha} u_{g\beta} - u_{g\alpha} u_{h\beta})$  关于  $U_g$ 、 $U_h$ 、 $\varphi_g$  和  $\varphi_h$  的关系式为:

$$u_{h\alpha} u_{g\beta} - u_{g\alpha} u_{h\beta} = U_g U_h \sin [(\omega_g - \omega_h)t + \varphi_g - \varphi_h] \quad (16)$$

重合闸过渡期间,逆变器输出电压频率由静态频率下垂特性曲线和有功功率负荷共同决定,与配电网侧电压频率可能存在偏差。将式(1)变形,可得逆变器输出频率表达式如式(17)所示。

$$\omega = \omega_N + \frac{P_0 - P_e}{k_p} \quad (17)$$

在重合闸过渡阶段,负荷功率与逆变器参考功率存在偏差,导致  $\omega$  偏离  $\omega_N$ ,根据式(17)所示的关系,通过增大  $k_p$  值来减小  $\omega$  与  $\omega_N$  的偏差,从而控制频率差为较小值。此时,交叉项通过低通滤波器后可等效为:

$$-u_{g\alpha} u_{h\beta} + u_{h\alpha} u_{g\beta} = U_g U_h \sin(\varphi_g - \varphi_h) \quad (18)$$

当电网侧电压和逆变器输出电压相角差足够小时,式(18)可以简化为式(19)。当控制交叉项为零时,可以实现相角的同步。

$$-u_{g\alpha} u_{h\beta} + u_{h\alpha} u_{g\beta} = U_g U_h (\varphi_g - \varphi_h) \quad (19)$$

由附录 A 图 A11 可推得相角和频率的闭环调节函数具有相同的特征方程,如式(20)所示。因此,选择合适的闭环调节参数  $k_{fp}$ 、 $k_{fi}$  能同时实现相角和频率的跟踪,满足重合闸时的并网标准。

$$\frac{\varphi_h}{\varphi_g} = \frac{\omega_h}{\omega_g} = \frac{U_g U_h k_{fp} s + U_g U_h k_{fi}}{s^2 + U_g U_h k_{fp} s + U_g U_h k_{fi}} \quad (20)$$

在重合闸过渡期间,逆变器仅需要为本地负荷提供有功功率,而在并网运行工况下要输出参考有功功率,二者存在一定差值。在重合闸瞬间,逆变器运行工况发生变化,其输出有功功率会出现突变,这将导致逆变器频率失稳进而损毁器件。为避免重合闸瞬间逆变器输出功率变化过大,根据逆变器功角关系,发现可通过限制功角变化率来限制输出有功功率变化率。结合式(1)和式(2)可得:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_N = \frac{P_0}{k_p} - \frac{U_{pcc} \sin \delta_0 (d_1 + \sqrt{d_1^2 + d_2})}{4X_g k_p} \quad (21)$$

式中： $d_1 = 3U_{pcc} \cos \delta_0 - 2k_q X_g$ ,  $d_2 = 24X_g (k_q U_N + Q_0)$ 。

附录 A 图 A12 为根据式 (21) 绘制的下垂逆变器的相平面图,重合闸前逆变器运行工况对应于 A 点,在断路器合闸后,功角变化率与功角关系按照曲线轨迹运动。由图 A12 可知, $k_p$  值越大,合闸瞬间下垂逆变器功角变化率越大,逆变器输出的有功功率变化值越大。为避免重合闸瞬间下垂逆变器输出有功功率变化过大,在重合闸过渡阶段调整  $k_p$  为  $Mk_p$  ( $M > 1$ )。考虑到实际工况下断路器合闸受到自身机械性能等因素影响,合闸时间具有不确定性,可适当延长  $Mk_p$  在有功-频率控制环中的作用时间,保证在此期间断路器已执行合闸操作。同时,也可以限制在重合闸过渡期间逆变器输出频率偏差,控制频率差  $\Delta\omega$  为较小值。

### 2.3 暂态控制流程与方案

图 3 所示为主电路与控制结构图。图中： $I_d, I_q$  分别为  $i$  的  $d, q$  轴分量； $U_d, U_q$  分别为  $u$  的  $d, q$  轴分量；QF 为需要研究自动重合闸的断路器,通过断路器两侧的电压互感器采集并传输线路电压信号,实现对电压的监测。正常工况下,逆变器的控制回路如图 3 中实线连接所示,所有的开关都接在 1 号位上。点线框中为开关切换判据及对应的连接点,其中,开关  $A_2$  为暂态功角控制策略投入开关,  $B_2$  为逆变器限流控制投入开关,  $C_2$  为准同期控制投入开

关,  $D_2$  为  $k_p$  调节开关。当检测到系统工况变化满足相关判据时,会切换开关到对应连接点实现控制切换,在退出暂态控制后控制回路切换为图 3 所示初始状态。

配电网源侧电压跌落后,基于下垂控制的重合闸全周期暂态控制框图如附录 A 图 A13 所示。首先,对配电网电压  $u_g$  和变压器高压侧电压  $u_h$  实时监测。当  $u_g$  的幅值  $U_g < U'$  时,进行投入暂态功角控制,即将图 3 中开关  $A_1$  切换到  $A_2$ ,根据有功功率关于并网点电压的输出特性,动态调节有功功率参考值控制故障前后功角值稳定,并在一定程度上限制逆变器输出电流。当  $U_g < U''$  时,切换开关  $B_1$  到  $B_2$ ,结合无功功率对输出电流的影响关系,切换无功控制环为 PI 调节,动态调节无功功率限制逆变器输出电流为安全阈值。当配电网电压跌落持续时间超过标准规定的低电压穿越最长时间  $T$  时,断路器断开,下垂逆变器进入重合闸过渡阶段。根据时间  $T$ ,系统能够预测逆变器脱网时间,从而实现快速切换控制模式,缩短准同期过程。在重合闸过渡阶段,将下垂逆变器无功-电压控制环切换回比例调节,即切换回  $B_1$ ;切换开关  $C_1$  至  $C_2$ ,引入频率-相角综合调节机制来减小频率和相角偏差,满足重合闸并网要求;同时,切换开关  $D_1$  至  $D_2$ ,调节有功-频率下垂系数为  $5k_p$ ,限制逆变器离网运行时出现的频率偏差大小和合闸瞬间线路电流冲击,在断路器重合闸后 0.3 s 时切换回  $D_1$ 。基于上述控制,若重合闸前配电网电压已经恢复,则下垂逆变器能无冲击平滑并网,退出暂态控制。

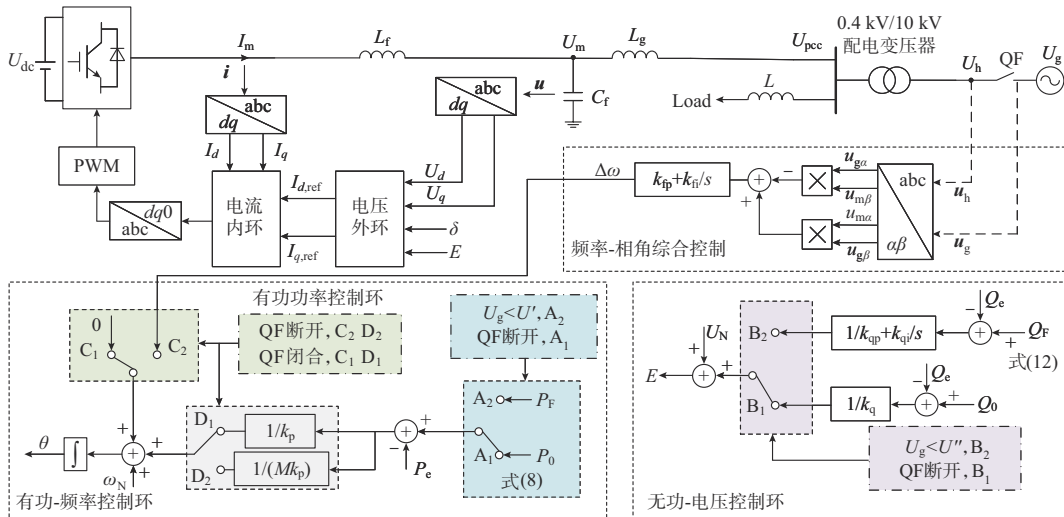


图 3 主电路结构和全周期综合控制框图

Fig. 3 Main-circuit structure and full-cycle integrated control block diagram

### 3 仿真与实验分析

#### 3.1 仿真分析

在MATLAB/Simulink仿真平台上搭建了图3所示的下垂逆变器仿真模型,用于验证本文所提暂态控制策略的可行性,主要仿真参数如表1所示。

表1 仿真参数  
Table 1 Simulation parameters

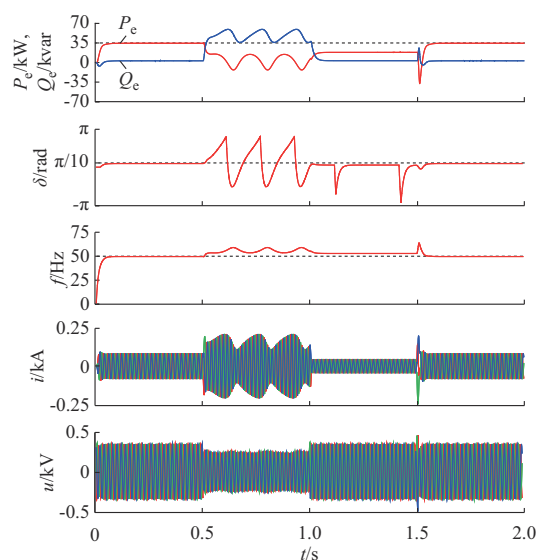
参数	数值
直流侧电压 $U_{dc}$	700 V
电网电压 $U_g$	380 V
滤波电容 $C_f$	50 $\mu$ F
滤波电感 $L_f$	3 mH
线路电感 $L_g$	4 mH
功率参考值 $P_0, Q_0$	35 kW, 0 kvar
系统负荷功率 $P, Q$	30 kW, 0 kvar
额定角速度 $\omega_N$	314 rad/s
有功-频率下垂系数 $k_p$	5 000
无功-电压下垂比例系数 $k_{qp}$	2 000
无功-电压下垂积分系数 $k_{qi}$	0.11
频率-相角调节比例系数 $k_{\theta p}$	$1.5 \times 10^{-5}$
频率-相角调节积分系数 $k_{\theta i}$	$1 \times 10^{-5}$

配电网源侧电压跌落,传统控制时下垂逆变器全周期仿真波形如图4(a)所示。0.5 s电压跌落至0.2 p.u.时,下垂逆变器暂态失稳,输出电压  $u$  随暂态功角振荡,输出电流  $i$  超过安全阈值。1 s时断路器动作,下垂逆变器带负荷进入重合闸过渡阶段,受负荷影响,逆变器输出电压频率  $f$  偏离工频。1.5 s断路器重合闸,由于逆变器输出电压与配电网侧电压存在偏差,重合闸时产生较大的冲击电流,逆变器输出电压波形出现畸变。加入重合闸全周期综合控制后的下垂逆变器输出波形如图4(b)所示。配电网源侧电压跌落,下垂逆变器的功角维持在额定值,输出电流幅值限制在1.5 p.u.,暂态过渡过程中没有出现冲击,满足安全运行需求。重合闸过渡期间,在综合控制下逆变器输出频率为50 Hz,输出电压幅值维持在311 V左右,可保障负荷的正常运行。重合闸时逆变器输出功率、电流和功角平滑过渡,实现无冲击并网目标。

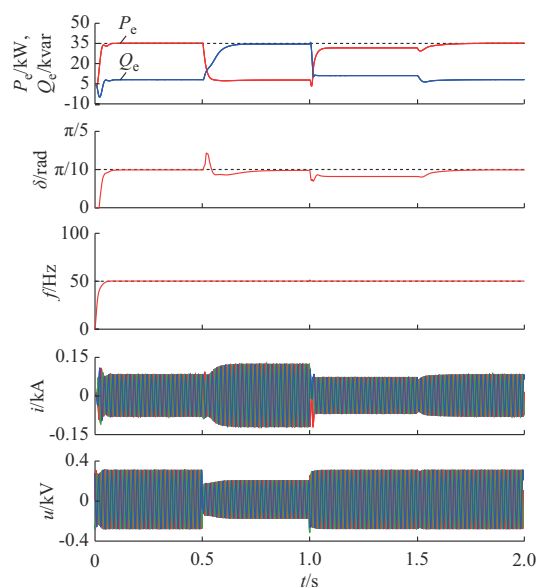
有无延时调节的有功-频率下垂系数电压、电流波形如附录A图A14所示。由图A14可知,在不动态调节  $k_p$  时,合闸瞬间变压器高压侧电流  $i_h$  出现波动,采用延时调节  $k_p$  策略后,重合闸时  $i_h$  平滑过渡。

#### 3.2 实验分析

为进一步验证本文所提下垂逆变器暂态控制策略的有效性,在附录A图A15所示的实验平台进行



(a) 传统下垂控制时逆变器仿真波形



(b) 综合控制时逆变器仿真波形

图4 配电网侧电压为0.2 p.u.时的下垂逆变器输出波形  
Fig. 4 Output waveforms of droop-controlled inverter when voltage on distribution network side is 0.2 p.u.

相关实验。其中,实验参数与仿真一致,配电网电压在3.0 s时跌落,4.0 s时断路器动作后下垂逆变器孤岛运行,配电网电压在4.5 s时恢复,5.0 s时断路器重合闸。

附录A图A16为配电网源侧电压跌落到0.2 p.u.时,采用不同控制策略时的下垂逆变器实验波形。由图A16可知,在传统下垂控制下逆变器功角失稳,输出功率和电流随功角振荡。在加入功角稳定和故障限流控制后,电压跌落期间的下垂逆变器功角维持在额定值附近,逆变器输出电流幅值控制在1.5 p.u.,满足安全稳定运行要求。

附录A图A17为综合控制下重合闸时变压器

高压侧电压和电流波形。重合闸过渡阶段,在综合控制下变压器高压侧电压相角在几个周期内跟踪上配电网电压相角,电压频率维持在 50 Hz,电压幅值控制在 311 V 左右,满足自动重合闸并网要求。在配电网电压恢复前后,变压器高压侧电压频率和相角波形没有发生变化,意味着综合控制下的下垂逆

变器运行状态不受配电网侧电压影响。

图 5 所示为全周期综合控制时的下垂逆变器输出波形。在断路器重合闸时,逆变器输出电压、电流和功率平滑过渡,没有出现电流冲击和电压波形畸变。实验结果与仿真分析吻合,证明本文所提方法具有较好的控制效果。

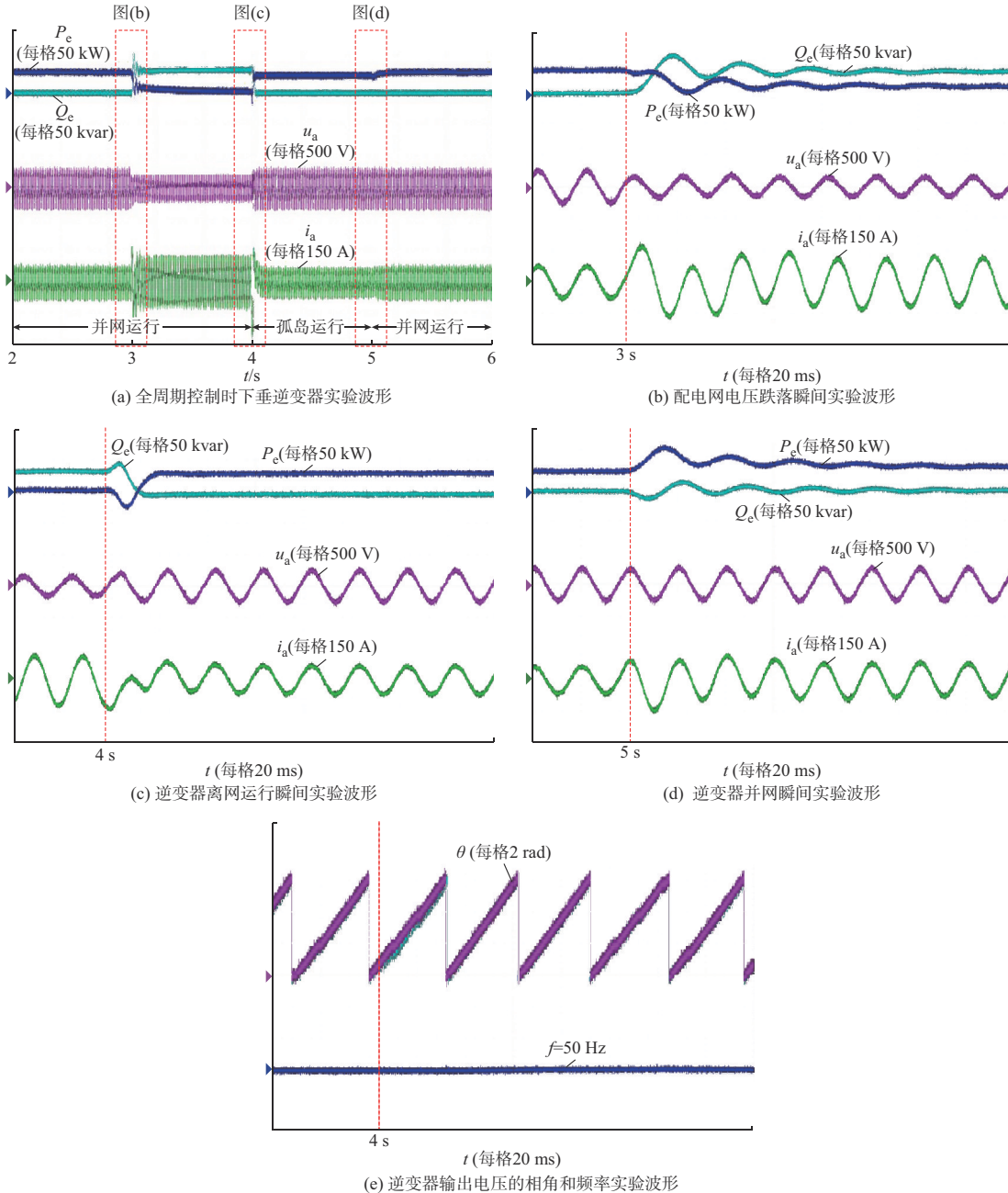


图 5 全周期综合控制时的下垂逆变器实验波形  
Fig. 5 Experimental waveforms of droop-controlled inverter under full-cycle integrated control

#### 4 结语

为实现配电网电压跌落时逆变器并网稳定运行,重合闸时逆变器平滑并网,抑制并网冲击电流,

本文提出一种重合闸全周期的下垂逆变器优化控制方法。通过理论分析和仿真得到以下结论:

- 1) 低电压穿越控制与准同期控制存在先后顺序,准同期控制策略投入时间即为标准要求低电压



穿越允许最长时间,在低电压穿越结束后就可以投入准同期控制,而无须对逆变器允许状态再次检测,减少了对通信的需求,缩短了准同期所需时间,提高了重合闸成功率。

2)配电网源侧电压跌落期间,功角稳定性与是否存在功率平衡点有关;逆变器输出电流大小与逆变器输出电压和电网电压差值相关。在配电网源侧电压跌落期间,可以通过调节下垂逆变器功率参考值实现暂态功角稳定和限制输出电流的大小,同时为系统提供无功支撑。

3)在下垂逆变器重合闸过渡期间,通过频率-相角综合调节机制,减少频率和相角控制参数的耦合,缩短准同期过程,提高重合闸成功率。

本文只考虑GFM逆变器单机并网系统中,配电网侧电压跌落后系统的全周期暂态稳定性。未来,在多源异构系统中配电网侧电压跌落后,还需要充分考虑多机之间的耦合关系,建立GFM和GFL混合模型,进一步探索故障时并网逆变器之间控制策略的配合关系,深入分析多机并联系统暂态同步稳定性。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

## 参 考 文 献

- [1] 胡博,谢开贵,邵常政,等.双碳目标下新型电力系统风险评估:特征、指标及评估方法[J].电力系统自动化,2023,47(5):1-15.  
HU Bo, XIE Kaigui, SHAO Changzheng, et al. Commentary on risk of new power system under goals of carbon emission peak and carbon neutrality: characteristics, indices and assessment methods[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 1-15.
- [2] 卓振宇,张宁,康重庆,等.面向双碳目标的电力系统规划方案量化归因分析方法[J].电力系统自动化,2023,47(2):1-14.  
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Quantitative attribution analysis method of power system planning scheme for carbon emission peak and carbon neutrality goals[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(2): 1-14.
- [3] 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):461-475.  
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, 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): 461-475.
- [4] 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):2109-2124.  
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): 2109-2124.
- [5] 曹炜,钦焕乘,陆建忠,等.新型电力系统下虚拟同步机的定位和应用前景展望[J].电力系统自动化,2023,47(4):190-207.  
CAO Wei, QIN Huancheng, LU Jianzhong, et al. Orientation and application prospect of virtual synchronous generator in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 190-207.
- [6] 王淋,巨云涛,吴文传,等.面向频率稳定提升的虚拟同步化微电网惯量阻尼参数优化设计[J].中国电机工程学报,2021,41(13):4479-4490.  
WANG Lin, JU Yuntao, WU Wenchuan, et al. Optimal design of inertia and damping parameters of virtual synchronous microgrid for improving frequency stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4479-4490.
- [7] 彭放,高厚磊,郭一飞,等.构网逆变电源故障穿越控制策略及其对保护影响的研究综述[J/OL].电网技术:1-15[2024-09-10].  
<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1308>.  
PENG Fang, GAO Houlei, GUO Yifei, et al. A review of fault ride-through control strategies of grid-forming inverter-based resources and the influence on protection[J/OL]. Power System Technology: 1-15 [2024-09-10]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1308>.
- [8] 谢震,高翔,张悬光,等.弱电网下功率同步构网型DFIG的阻尼分析及转矩振荡抑制[J].电力系统自动化,2023,47(11):29-38.  
XIE Zhen, GAO Xiang, ZHANG Xuanguang, et al. Damping analysis and torque oscillation suppression of power synchronized grid-forming doubly-fed induction generator in weak grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(11): 29-38.
- [9] 赵郅毅,许寅,吴翔宇,等.含异构微源的混合型孤岛微电网暂态有功响应分析与控制策略[J].电工技术学报,2024,39(19):6072-6084.  
ZHAO Zhiyi, XU Yin, WU Xiangyu, et al. Transient active power response analysis and control strategy of hybrid island microgrid containing heterogeneous microsources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(19): 6072-6084.
- [10] 孙正龙,郝舒宇,李明达,等.含构网型双馈风电的电力系统低频振荡能量结构分析方法[J/OL].电工技术学报:1-16[2024-11-22].  
<https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240271>.  
SUN Zhenglong, HAO Shuyu, LI Mingda, et al. Low frequency oscillation analysis method for grid-forming doubly-fed wind power systems based on energy structures[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society: 1-16[2024-11-22]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240271>.
- [11] 张静怡,田震,李锡林,等.考虑阻尼影响的虚拟同步发电机暂态同步稳定性量化分析[J/OL].电力系统自动化[2024-06-19].  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20240617.2227.004.html>.  
ZHANG Jingyi, TIAN Zhen, LI Xilin, et al. Quantitative analysis of transient synchronous stability of virtual synchronous generator considering damping effect[J/OL]. Automation of Electric Power Systems [2024-06-19]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20240617.2227.004.html>.

- kcms/detail/32.1180.TP.20240617.2227.004.html.
- [12] 颜湘武,蔡光,李锐博,等.计及功角偏差和阻尼效应的构网型双馈风机暂态稳定性分析[J/OL].中国电机工程学报[2024-06-22].<https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.232186>.  
YAN Xiangwu, CAI Guang, LI Ruibo, et al. Transient stability analysis of grid forming-doubly fed induction generator with power angle deviation and damping effect [J/OL]. Proceedings of the CSEE [2024-06-22]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.232186>.
- [13] 王耀函,张扬帆,蔡光,等.计及电流限幅的构网型双馈风机暂态模型建模及适用性分析[J].电力系统保护与控制,2024,52(21):92-102.  
WANG Yaohan, ZHANG Yangfan, CAI Guang, et al. Transient modeling and applicability analysis of a grid-forming doubly-fed induction generator taking into account current limitation[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(21): 92-102.
- [14] 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.
- [15] 陈巧地,张兴,李明,等.基于阻抗辨识的下垂控制并网逆变器孤岛检测方法[J].电力系统自动化,2020,44(7):123-129.  
CHEN Qiaodi, ZHANG Xing, LI Ming, et al. Impedance identification based islanding detection method for grid-connected inverter with droop control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 123-129.
- [16] 吴宇奇,叶雨晴,马啸,等.抑制电压波动与规避频率越限的孤岛微电网并网预同步方案[J].电力系统自动化,2021,45(14):56-64.  
WU Yuqi, YE Yuqing, MA Xiao, et al. Pre-synchronization scheme with voltage fluctuation suppression and frequency out-of-limit avoidance for grid connection of islanded microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(14): 56-64.
- [17] 曹伟,何必伦,陈思远,等.改进故障穿越方法的VSG对同步机之间功角稳定性的影响研究[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(12):121-128.  
CAO Wei, HE Bilun, CHEN Siyuan, et al. Research on influence of VSG with improved fault ride through method on power angle stability between synchronous generators [J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2022, 34(12): 121-128.
- [18] LUO C, CHEN Y D, XU Y C, et al. Two-stage transient control for VSG considering fault current limitation and transient angle stability [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(7): 7169-7179.
- [19] 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.
- [20] PAN D H, WANG X F, LIU F C, 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.
- [21] ME S P, RAVANJI M H, MANSOUR M Z, et al. Transient stability of paralleled virtual synchronous generator and grid-following inverter [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(6): 4451-4466.
- [22] 张思东,黄云辉,周党生,等.弱电网下VSC控制环路对直流电压稳定性的影响分析[J].高电压技术,2021,47(8):2730-2742.  
ZHANG Sidong, HUANG Yunhui, ZHOU Dangsheng, et al. Impacts analysis of VSC control loop on DC voltage control stability in weak-grid [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2730-2742.
- [23] 马堰泓,付立军,胡祺,等.计及暂态模式切换下垂控制逆变器故障下同步稳定分析[J].电机与控制学报,2022,26(10):1-11.  
MA Yanhong, FU Lijun, HU Qi, et al. Synchronous stability analysis of droop controlled inverter considering transient mode switching under fault [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(10): 1-11.
- [24] 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.
- [25] 刘航,王跃,刘永慧,等.基于定量设计虚拟阻抗的VSG低电压穿越策略[J].高电压技术,2022,48(1):245-256.  
LIU Hang, WANG Yue, LIU Yonghui, et al. The LVRT strategy for VSG based on the quantitatively designed virtual impedance [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 245-256.
- [26] 郭力,黄玉辉,李霞林,等.VSC输出电流反馈型虚拟同步控制技术[J/OL].电力自动化设备:1-14[2024-09-10].<https://doi.org/10.16081/j.epae.202408018>.  
GUO Li, HUANG Yuhui, LI Xialin, et al. VSC output current feedback-based virtual synchronous control technology [J/OL]. Electric Power Automation Equipment: 1-14 [2024-09-10]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202408018>.
- [27] LI M X, SHU S R, WANG Y, et al. Analysis and improvement of large-disturbance stability for grid-connected VSG based on output impedance optimization [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(8): 9807-9826.
- [28] 邹常跃,陈俊,魏伟,等.基于下垂控制的柔直变流器孤岛-并网控制模式切换方法[J].南方电网技术,2022,16(11):92-101.  
ZOU Changyue, CHEN Jun, WEI Wei, et al. Method for switching of island-grid control mode for VSC-HVDC converter based on droop control [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(11): 92-101.
- [29] 张纯江,徐菁远,庆宏阳,等.主从结构微电网逆变器离网全过程平滑切换控制策略[J].电力系统自动化,2022,46(23):125-133.  
ZHANG Chunjiang, XU Jingyuan, QING Hongyang, et al. Seamless transferring control strategy for master-slave microgrid inverter in whole off-grid process [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(23): 125-133.
- [30] SUN K, YAO W, WEN J Y, 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.

- [31] 李育强,宋国兵,王维庆,等.基于参数识别光伏接入配网永久性故障判别方法[J].电力系统保护与控制,2017,45(16):1-7.  
LI Yuqiang, SONG Guobing, WANG Weiqing, et al. Permanent fault identification method based on parameter identification for photovoltaic access to distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 1-7.
- [32] IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems: IEEE Std 1547—2003[S]. 2003.
- [33] ZEB K, ISLAM S U, KHAN I, et al. Faults and fault ride through strategies for grid-connected photovoltaic system: a comprehensive review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 158: 112125.
- [34] 光伏发电并网逆变器技术要求:GB/T 37408—2019[S].2019.

Technical requirements for photovoltaic grid-connected inverter: GB/T 37408—2019[S]. 2019.

彭子豪(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向:分布式发电与电力电子技术应用。E-mail:PENGZH@hnu.edu.cn

肖凡(1988—),男,通信作者,副研究员,主要研究方向:电力电子在电力系统中的应用。E-mail:woliaokk123@126.com

涂春鸣(1976—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电网新型调控技术与设备。E-mail:chunming\_tu@263.net

(编辑 章黎)

### Optimal Control Strategy for Droop-controlled Inverter Considering Source-side Voltage Drop and Fault Reclosing

PENG Zihao<sup>1</sup>, XIAO Fan<sup>1</sup>, TU Chunming<sup>1</sup>, GUO Qi<sup>1</sup>, XIE Weijie<sup>1</sup>, WANG Qing<sup>2</sup>

(1. National Electric Power Conversion and Control Engineering Technology Research Center (Hunan University), Changsha 410082, China; 2. Shenzhen Power Supply Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** The voltage drop on the source side in the distribution network will lead to the transient instability of droop-controlled grid-connected inverters. Subsequent traditional unchecked reclosing will bring overcurrent problems, posing significant challenges to the safe operation of the inverter. To address the problems of transient power angle instability and overcurrent in the droop-controlled inverters due to the source-side voltage drops in the distribution network, as well as the impulse current generated by traditional unchecked automatic reclosing, this paper proposes an optimal control method for droop-controlled inverters during the full cycle of the fault transient. This method effectively improves the grid-connected operation stability of inverters and reduces the impulse current during reclosing to achieve a smooth grid connection. Firstly, the paper analyzes the transient characteristics of the inverter during the fault, and the relationship between the instantaneous overvoltage of the reclosing and the voltage amplitude, phase angle and frequency deviation on both sides of the high-voltage-side circuit breaker. Secondly, during the voltage drop phase, the reference value of the inverter power is dynamically adjusted based on the relationship between the active power of the droop-controlled inverter and the voltage output characteristics of the point of common coupling, as well as the influence of reactive power on the line current amplitude. This adjustment is made according to the actual working conditions, and the transient power angle stability before and after the fault is controlled to limit the output current of the inverter below the safety threshold. During the reclosing transition phase, the comprehensive adjustment mechanism of the frequency-phase angle is introduced to reduce the voltage frequency and phase angle difference. This mechanism reduces the number of proportional-integral controllers in the command calculation link and greatly shortens the time required for quasi-synchronization compared to the existing grid-connected control mechanism. Finally, the correctness of the theoretical analysis and proposed method is validated by combining simulation and experimental results.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52077072).

**Key words:** droop-controlled inverter; transient power angle control; fault current limiting control; quasi-synchronization; automatic reclosing

