

考虑暂态功角稳定和故障限流的并网逆变器 下垂暂态控制策略

杨欢红¹, 焦伟¹, 黄文焘², 施颖^{1,3}, 严灵杰¹

(1. 上海电力大学, 上海 200090; 2. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海 200240;
3. 国网上海市电力公司市区供电公司, 上海 200080)

摘要: 为解决下垂控制型逆变器在故障工况时发生暂态功角失稳和故障过电流问题, 提出了一种兼顾暂态功角稳定和故障限流的暂态控制策略。首先分析了下垂控制型逆变器的暂态功角失稳机理和故障电流暂态特性, 定量分析了无功控制回路对暂态稳定性的影响以及暂态功角、短路电流与逆变器输出电压三者之间的关系。其次, 以暂态功角稳定和故障限流为控制目标, 通过在有功控制回路中引入暂态功角动态补偿项、在无功控制回路自适应调整电压参考指令值进行综合控制。最后, 通过仿真实验验证了所提出控制策略不仅可以抑制故障过程中不平衡功率造成的功角持续增大和故障过电流, 并一定程度上增加了故障期间无功功率, 有利于故障电压恢复, 从而实现下垂控制型逆变器在电网故障时的安全稳定运行。

关键词: 下垂控制; 暂态功角稳定; 故障限流; 不平衡功率; 电压恢复

Droop transient control strategy considering transient power angle stability and fault current limitation of a grid-connected inverter

YANG Huanhong¹, JIAO Wei¹, HUANG Wentao², SHI Ying^{1,3}, YAN Lingjie¹

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education (Shanghai Jiao Tong University), Shanghai 200240, China;
3. State Grid Shanghai Urban Power Supply Company, Shanghai 200080, China)

Abstract: There are issues of transient power angle instability and fault overcurrent in droop-controlled inverters in fault conditions. Thus a transient control strategy that considers both transient power angle stability and fault current limiting is proposed. First, the mechanism of transient power angle instability in droop-controlled inverters and the transient characteristics of fault currents are analyzed. The impact of the reactive power control loop on transient stability and the relationship among transient power angle, short-circuit current, and inverter output voltage are quantitatively analyzed. Second, to achieve transient power-angle stability and fault current limiting, a comprehensive control approach is proposed, one which introduces a dynamic compensation term for transient power-angle in the active power control loop and adapts the voltage reference command value in the reactive power control loop. Finally, simulation experiments are conducted to validate the proposed control strategy. It not only suppresses the continuous increase of power angle caused by unbalanced power during fault processes and mitigates fault overcurrent but also increases reactive power during fault periods to facilitate fault voltage recovery. Consequently, the proposed strategy enables the safe and stable operation of droop-controlled inverters during grid faults.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177100).

Key words: droop control; transient power angle stability; fault current limitation; unbalanced power; voltage recovery

0 引言

随着可再生能源的快速发展, 电力电子逆变器

作为可再生能源最典型的并网接口, 在电力系统中得到了越来越广泛的应用^[1-8]。然而, 传统的并网逆变器常用控制策略, 如最大功率点跟踪控制或恒功率控制^[9], 不能为电网提供电压与频率支撑, 对含高比例可再生能源电网的稳定性运行带来严重挑战。为了解决这一问题, 提出下垂控制策略, 使逆

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177100); 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室开放课题资助(2022AA05)

变器具备有功-频率与无功-电压下垂特性,能够为电网提供电压频率支撑,广泛应用于新能源并网^[10-15]。当电网频率或者功率发生波动或者线路发生短路、电压跌落、线路跳闸等故障时,会给下垂控制型逆变器的稳态和暂态稳定性运行带来巨大挑战^[16-20]。目前,针对下垂控制型逆变器稳定性的研究多是基于电网稳态运行工况,包括参数优化、模型简化、控制改进以及小扰动稳定性分析等,由于忽略了非线性特性,常用的小扰动稳定性分析方法不能直接应用于大扰动稳定性分析^[21-25]。当电网出现大扰动时,下垂控制型逆变器会出现同传统同步发电机类似的暂态功角失稳问题^[26-27];同时下垂控制型逆变器作为一种电力电子设备,其载流能力较差,较大的故障电流会使逆变器无法正常工作甚至出现烧毁的现象^[28]。然而,随着电力系统中可再生能源渗透率逐渐提升,下垂控制型逆变器被要求具备一定的故障鲁棒性能,在一定情况下可以继续为电网提供必要的电压频率支撑。因此,深入分析下垂控制型逆变器在电网故障下的暂态特性,并研究其在故障下的暂态稳定性提升方法具有重要意义。

下垂控制型逆变器在故障工况下的研究主要包含暂态功角稳定控制与故障限流控制两方面。在暂态功角稳定控制方面,文献[29]详细阐述了下垂控制型逆变器暂态功角失稳机理,得到有功和无功下垂控制系数对暂态功角的影响,但并没有给出具体提高暂态功角稳定性的控制措施。文献[30]以暂态过程存在功率平衡点为控制目标,对下垂控制型逆变器进行调控,实现其在故障过程中的暂态稳定,但在暂态分析过程中忽视了无功控制回路的影响,结果具有一定的保守性。文献[31]分析了无功控制回路对下垂控制暂态稳定性的影响,但是仅仅做了定性分析。文献[32]考虑无功控制回路的影响,提出一种下垂系数自适应控制的方法来增强暂态功角稳定性,但是忽略了故障限流的问题。在故障限流控制方面,文献[33]通过对逆变器工作模式进行切换,在发生故障工况时,由电压型逆变器切换成电流型逆变器,能够抑制故障过电流大小,但在故障时无法为电网提供电压支撑且模式切换时存在暂态过电压。文献[34]在无功电压控制回路中引入虚拟阻抗来抑制故障工况时短路过电流,但没有考虑故障发生时暂态功角的变化对逆变器输出电压的影响。文献[35]通过对电压电流双闭环控制回路中的电流参考值进行控制来抑制短路过电流,但会导致逆变器输出有功功率降低,进而发生暂态功角失稳现象。为了更深入地研究电流限幅环节对逆变器暂态功角的影响,文献[36]提出虚拟功角的概念,并

基于虚拟功角阐述了限流环节对逆变器暂态功角的影响机理。现有文献研究方法都是将暂态功角稳定和故障限流作为两个单独的问题进行解决,而忽略了二者之间的耦合关系。故障工况时,故障电流大小与暂态功角大小密切相关。文献[30-32]提出的控制方法解决了暂态功角失稳问题,一定程度上抑制故障过电流,然而当故障深度较大时,故障限流能力较弱。文献[33-35]提出的控制方法虽然可以抑制故障过电流,然而却恶化了暂态功角稳定性。现有控制方法无法做到兼顾暂态功角稳定时抑制故障过电流。暂态功角稳定性和故障限流是衡量下垂控制型逆变器暂态稳定性的两个重要因素,缺一不可。因此在发生故障工况时,应兼顾暂态功角稳定和故障限流进行暂态控制研究。

基于此,本文首先阐述了故障工况时,下垂控制型逆变器的暂态功角失稳和故障过电流产生的原因。其次,定量地分析了无功控制回路对暂态稳定性的影响以及暂态功角、短路电流与逆变器输出电压三者之间的关系。以暂态功角稳定和故障限流为目标,提出一种兼顾功角稳定和故障限流的下垂控制型逆变器暂态控制策略,通过在有功控制回路中引入暂态功角动态补偿项来维持功角的暂态稳定,并通过构造李雅普诺夫(Lyapunov)能量函数证明了所提控制策略提高了暂态稳定性,并在无功控制回路自适应调整电压参考指令值来抑制故障过电流;最后,通过仿真实验来验证所提控制策略的正确性和有效性。

1 下垂控制型逆变器暂态特性

1.1 下垂控制基本原理

基于下垂控制的电压型逆变器(voltage source converter, VSC)的主电路和控制回路框图如图 1 所示。分布式电源用一个恒定的直流电压源 V_{dc} 代替, VSC 通过变压器和输电线路接入电网中。 X_T 和 X_L 分别为变压器漏电抗和输电线路电抗; L_f 和 C_f 分别为 LC 滤波回路中的滤波电感和滤波电容; V 和 I 分别 VSC 的输出电压矢量和输出电流矢量。从公共耦合点(point of common coupling, PCC)来看,大电网可以看作是一个等效电抗 X_g 与一个幅值为 E 的电压源的串联。

控制回路主要由下垂控制环节和电压电流双闭环两部分组成,其中下垂控制环节由有功-频率控制回路、无功-电压控制回路两部分组成,其控制方程分别为

$$\omega = \omega_0 + K_{pf}(P_0 - P) \quad (1)$$

$$V = V_0 + K_{qv}(Q_0 - Q) \quad (2)$$

式中: ω 和 V 分别为 VSC 运行时输出的角频率和

电压; ω_0 和 V_0 分别为 VSC 额定运行时的角频率和电压指令值; P 和 Q 分别为 VSC 输出有功功率和无功功率; P_0 和 Q_0 分别为 VSC 额定运行时有功功率指令值和无功功率指令值; K_{pf} 和 K_{qv} 分别为有功-频率和无功-电压下垂控制系数。

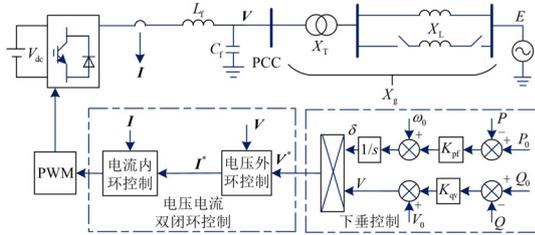


图 1 基于下垂控制的 VSC 主电路和控制回路框图
Fig. 1 Block diagram of VSC main circuit and control loop based on droop control

由图 1 可知, 通过下垂控制环节中有功-频率控制回路得到功角 δ , 与无功-电压控制回路得到的电压 V 形成电压参考矢量 V^* 。输出电压 V 通过电压外环控制对生成的电压参考矢量 V^* 进行跟踪控制。一般来说, 功率外环回路的动态响应时间比电压电流双闭环回路慢十几倍。因此, 在分析由功率外环引起的暂态稳定性问题时, 可以认为 V 对 V^* 实现了无差跟踪。即 $V = V^*$ 。以电网电压 E 为参考向量, 假设 V 与 E 的相位差为 δ , 可以得到 $E = E\angle 0$, $V = V\angle \delta$ 。因此 VSC 向电网输送的有功功率和无功功率分别为

$$P = \frac{3}{2} \cdot \frac{EV \sin \delta}{X_g} \quad (3)$$

$$Q = \frac{3}{2} \cdot \frac{V^2 - EV \cos \delta}{X_g} \quad (4)$$

式中: E 为电网电压; X_g 为等效线路电抗。

1.2 暂态功角失稳机理分析

当电网发生短路故障或断线故障等大干扰扰动时, 暂态功角的稳定性主要取决于 δ 变化的特性。如果 δ 经过振荡后能回到初始值或达到一个新的稳态值, 则系统具有暂态稳定性。若受到大干扰扰动后功角不断增大, 则系统失去暂态稳定性。因此, 可以用 δ 随时间变化的特性作为暂态稳定性的判据。暂时先不考虑无功-电压控制回路的影响, 假设 V 为常数 V_0 。由式(1)和式(3)可得 $\dot{\delta}$ 为

$$\dot{\delta} = K_{pf}(P_0 - P) = K_{pf} \left(P_0 - \frac{3}{2} \cdot \frac{EV \sin \delta}{X_g} \right) = K_{pf} \left(P_0 - \frac{3}{2} \cdot \frac{EV_0 \sin \delta}{X_g} \right) \quad (5)$$

式中, $\dot{\delta}$ 为功角变化率。

根据表 1 的参数和式(5)可以绘制出不同故障深度下, VSC 相平面图如图 2 所示。从相平面图中, 可知 δ 随时间变化的特性。若 $\dot{\delta}$ 大于零, δ 单调增大。若 $\dot{\delta}$ 小于零, δ 单调减小。若 $\dot{\delta}$ 等于零, 则 δ 位于平衡点。正常运行时, 由曲线 I 可知此时有两个平衡点, 其中 a 点是稳定平衡点, 而 b 点是不稳定平衡点。根据故障深度, 发生故障后将出现两种情形。在第一种情形下, 发生故障后平衡点仍然存在, 如图 2 中曲线 II 所示, 其中 d 点是稳定平衡点, e 点是不稳定平衡点。当电网电压 E 跌落至 0.6 p.u. 时, 输出有功功率 P 降低 δ 增大, 工作点由 a 点移至 c 点, 由于 $\dot{\delta}$ 大于零, 功角由 δ_a 开始不断增大。工作点由 c 点沿着曲线 II 运动到 d 点, 一旦到达 d 点, 由于此时 $\dot{\delta}$ 等于零, 会达到一个新的稳态, 此时功角会停留在 δ_d 不再发生变化。在第二种情形下, 发生故障后平衡点不存在, 如图 2 中曲线 III 所示, 当电网

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	大小
额定有功功率 P_0/kW	10
电网电压 E/V	220
直流侧电压 V_{dc}/V	700
额定频率 f/Hz	50
额定角频率 $\omega_0/(\text{rad/s})$	314
逆变器开关频率 f_s/kHz	10
线路电感 X_g/mH	8
滤波电感 L_f/mH	3
滤波电阻 R_f/Ω	0.01
滤波电容 $C_f/\mu\text{F}$	6
下垂控制系数 $K_{qf}/[(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s})/\text{rad}]$	2000
下垂控制系数 $K_{qv}/(\text{var}/\text{V})$	4500
电压外环比例系数 k_{cp}	3.5
电流内环积分系数 k_{vi}	0.0012
电流内环比例系数 k_{vp}	37.4

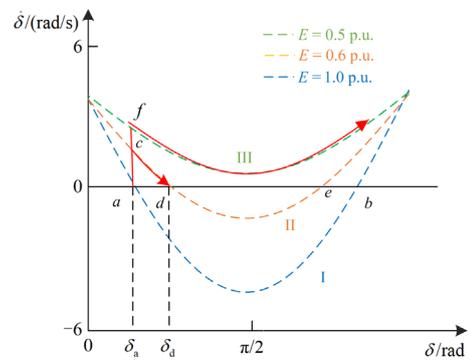


图 2 不同故障深度下的相平面图

Fig. 2 Phase plan diagram at different fault depths

电压 E 跌落至 0.5 p.u. 时, 输出有功功率 P 降低 $\dot{\delta}$ 增大, 工作点由 a 点移至 f 点, 工作点由 f 点沿着 III 运动, 由于此时 $\dot{\delta}$ 总是大于零, δ 不断增大, 最终失去稳定性。由上述分析可得, 暂态过程中不平衡功率是造成功角持续增大的原因, 若不平衡功率存在过零点, 即 $\dot{\delta}$ 存在过零点, 系统暂态功角稳定, 否则, 暂态功角失稳。

1.3 考虑无功控制回路对暂态功角的影响

在 1.2 节的分析中, 忽略无功-电压控制回路的影响, 假设 V 为常数 V_0 。然而在实际运行中, 当发生大干扰扰动时, VSC 输出有功功率和无功功率均发生变化。根据无功-电压控制方程可知, 变化的无功功率会改变输出电压, 而输出电压的变化又会改变输出有功功率, 进而影响暂态功角稳定性。

为了量化无功-电压控制回路对暂态功角稳定性的影响分析, 将式(4)代入式(2)可得到无功-电压控制回路方程为

$$V = V_0 + K_{qv} \left(Q_0 - \frac{3}{2} \cdot \frac{V^2 - EV \cos \delta}{X_g} \right) \quad (6)$$

显然这是一个关于 V 的一元二次方程, 通过求解这个方程, 可以得到 V 与 δ 之间的关系为

$$V = \frac{\sqrt{(K_{qv} E \cos \delta - X_g)^2 + 4K_{qv} X_g (V_0 + K_{qv} Q_0)}}{2K_{qv}} + \frac{K_{qv} E \cos \delta - X_g}{2K_{qv}} \quad (7)$$

因此考虑无功控制回路影响时, 输出的有功功率 P 为

$$P = \frac{E \sin \delta \sqrt{(K_{qv} E \cos \delta - X_g)^2 + 4K_{qv} X_g (V_0 + K_{qv} Q_0)}}{2K_{qv} X_g} + \frac{K_{qv} E^2 \sin \delta \cos \delta - X_g E \sin \delta}{2K_{qv} X_g} \quad (8)$$

根据式(7), 可以进一步研究 V 随 δ 的变化规律。为此, 引入中间变量 m 为

$$m = \frac{K_{qv} E \cos \delta - X_g}{2K_{qv}}, \quad \delta \in [0, \pi] \quad (9)$$

式(7)可以重新写为

$$V = \sqrt{m^2 + \frac{X_g (V_0 + K_{qv} Q_0)}{K_{qv}}} + m \quad (10)$$

分别令 V 对 m 求导、 m 对 δ 和 m 对 E 求偏导可得

$$\frac{dV}{dm} = 1 + \frac{m}{\sqrt{m^2 + X_g (V_0 + K_{qv} Q_0) / K_{qv}}} > 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial m}{\partial \delta} = -\frac{E}{2} \sin \delta \leq 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial m}{\partial E} = \frac{1}{2} \cos \delta \begin{cases} \geq 0, \delta \in [0, \pi/2] \\ < 0, \delta \in (\pi/2, \pi] \end{cases} \quad (13)$$

由式(11)可知, 随着 m 递减, V 单调递减。由式(12)可知, 随着 δ 增大, m 单调递减。所以随着 δ 增大, V 单调递减。由式(11)和式(13)可知, 当 $\delta \in [0, \pi/2]$ 时, V 随着电网电压 E 增加而单调增大, 当 $\delta \in (\pi/2, \pi]$ 时, V 随着电网电压 E 增加而单调减小。

根据表 1 的参数和式(7)绘制不同故障深度下相平面图和 V - δ 曲线图如图 3 所示。当电网电压 E 跌落至 0.6 p.u. 时, 若考虑无功控制回路影响, 电压工作点由 a_2 点移至 b_2 点, 输出电压由 V_0 下降至 V_b , 输出有功功率 P 降低, 不平衡功率增加, $\dot{\delta}$ 进一步增大。 δ 工作点由 b 点移至 b_1 点, 将沿着曲线 III 运动, 由于此时 $\dot{\delta}$ 总是大于零, δ 不断增大, 最终失去稳定性。当电网电压 E 跌落至 0.5 p.u. 时, 若考虑无功控制回路影响, 电压工作点由 a_2 点移至 c_2 点, 输出电压由 V_0 下降至 V_c , 与电网电压 E 跌落至 0.6 p.u. 相比, 有功功率 P 降低更多, 不平衡功率增加更多, $\dot{\delta}$ 增大更多, 暂态功角失稳更加严重。由上述分析可知, 在整个暂态过程中, 若考虑无功控制回路影响, 随着功角的增加, 输出电压减小, 输出有功功率进一步降低, 功角相平面图进一步升高, 一旦出现最小 $\dot{\delta}$ 大于零时, 将会出现暂态失稳现象。因此考虑无功控制回路的影响会进一步恶化 VSC 暂态功角稳定性。

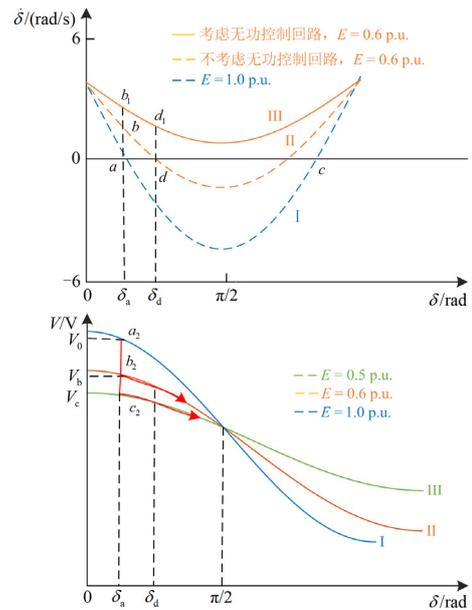


图 3 不同故障深度下相平面图和 V - δ 图

Fig. 3 Phase plan and V - δ diagram with different fault depths

1.4 故障电流特性

假设在 $t = t_0$ 时, 电网发生对称短路故障, 其等效电路图如图 4 所示。短路后电路仍是对称的, 以 a 相为例, 写出故障后 a 相微分方程如式(14)所示。

$$L_g \frac{di_F}{dt} = V_F \sin(\omega t + \delta') - E' \sin(\omega t) \quad (14)$$

式中: L_g 为线路等效电感; i_F 为发生故障时的短路电流; V_F 为发生故障时 VSC 输出电压; δ' 为发生故障时的暂态功角; E' 为故障时电网电压。

由式(14)可得故障时短路电流幅值为

$$I_F = \frac{\sqrt{2}}{|X_g|} \sqrt{V_F^2 + E'^2 - 2V_F E' \cos \delta'} \quad (15)$$

式中, I_F 为故障时短路电流幅值。

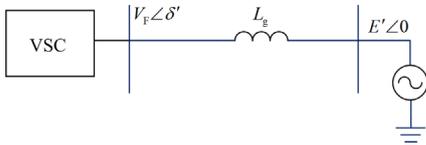


图 4 故障时系统等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit diagram of the system during fault

由式(15)和表 1 可知, 发生短路故障之后, 短路电流与 VSC 输出电压大小和暂态功角变化有关, 三者之间关系如图 5 所示。当输出电压与电网电压跌落一定时, 故障电流大小与暂态功角变化量呈正相关, 暂态功角变化越大, 故障电流越大。当暂态功角不变与电网电压跌落一定时, 故障电流大小与输出电压呈负相关, 输出电压越大则故障电流越小。因此故障工况时, 可以在控制暂态功角保持不变时, 通过控制输出电压大小来控制故障时的短路电流大小。

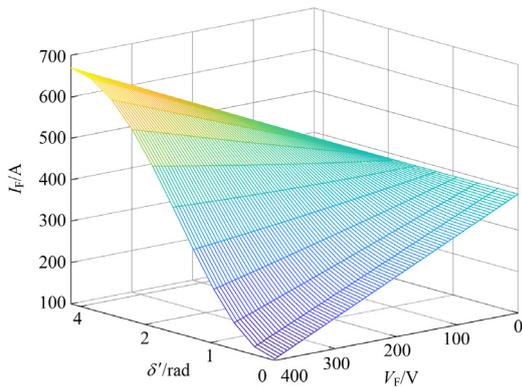


图 5 短路电流与 VSC 输出电压及暂态功角关系

Fig. 5 Relationship between short circuit current and VSC output voltage and transient power angle during fault

2 下垂控制型并网逆变器暂态控制策略

当故障程度比较深时, 电网电压会发生严重跌

落, VSC 将会出现暂态功角失稳和故障过电流。由第 1 节分析可知, 发生暂态功角失稳的根本原因是故障时输出的有功功率的最大值小于 VSC 额定运行时有功功率的指令值, 由于此时 δ 总是大于零, δ 不断增大, 最终暂态功角失稳。 δ 不断增大和电网电压的严重跌落会使产生的故障电流幅值大于 VSC 额定运行时的电流安全阈值 I_{limit} , 长时间工作在过流状态下将大大降低逆变器使用寿命。考虑到更快地达到暂态功角稳定和实现故障限流, 同时避免无功控制回路对暂态稳定性的影响, VSC 的暂态功角应在故障时保持在稳态值 δ_a 附近。如图 6 所示, 在发生故障时, 在有功控制回路中引入暂态功角动态补偿项补偿不平衡功率, 使得故障期间 VSC 额定运行是有功功率指令值由 P_0 变为 P_{0F} , 暂态功角工作点由 a 点到达新的稳定平衡点 b 点, VSC 的暂态功角被控制在故障前的稳态值 δ_a 。当引入暂态功角动态补偿项后, 暂态功角维持在稳态值 δ_a 保持不变, 此时故障电流幅值大小与 VSC 输出电压呈负相关。通过在无功控制回路自适应调整电压参考指令值将故障电流大小限制在 I_{limit} 。

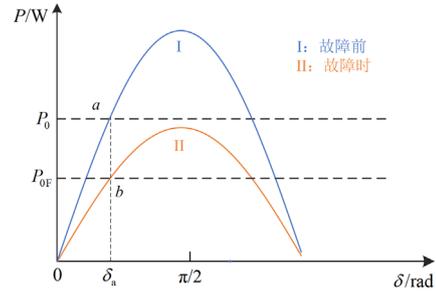


图 6 故障前和故障时的暂态功角曲线

Fig. 6 Transient power angle curve before and during fault

2.1 暂态功角动态补偿控制

故障发生前, VSC 工作在稳态时, 电网电压和 VSC 输出电压分别为 E 和 V_0 , 功角为 δ_a , 此时 VSC 输出有功功率为

$$P_n = \frac{EV_0}{X_g} \sin \delta_a \quad (16)$$

式中, P_n 为稳态时输出有功功率。

故障发生时, 电网电压跌落至 E' , VSC 输出电压为 V_F , 功角为 δ' , 其中 $\delta' = \delta_a + \Delta\delta$, 此时 VSC 输出有功功率为

$$P_{nF} = \frac{E'V_F}{X_g} \sin \delta' = \frac{E'V_F}{X_g} \sin(\delta_a + \Delta\delta) = \frac{E'V_F}{X_g} (\sin \delta_a \cos \Delta\delta + \cos \delta_a \sin \Delta\delta) \quad (17)$$

式中: P_{nf} 为故障时输出有功功率; $\Delta\delta$ 为暂态功角变化量。

当在有功控制回路中引入暂态功角动态补偿项时, VSC 功角几乎不发生变化, 可以控制在稳态功角 δ_a 左右, 即 $\Delta\delta$ 是一个极小量。所以 $\Delta\delta \approx 0$, $\cos \Delta\delta \approx 1$, $\sin \Delta\delta \approx \Delta\delta$, 式(17)进一步化简可得

$$P_{\text{nf}} = \frac{E'V_F}{X_g} \sin \delta_a + \frac{E'V_F}{X_g} \cos \delta_a \Delta\delta \quad (18)$$

由式(17)和式(18)可得

$$\Delta P = \frac{EV_0}{X_g} \sin \delta_a - \frac{E'V_F}{X_g} \sin \delta_a - \frac{E'V_F}{X_g} \cos \delta_a \Delta\delta \quad (19)$$

式中, ΔP 为不平衡功率, 由式(19)可知第一项和第二项是稳态功角项, 若要使产生的不平衡功率为零, 即与功角变化量无关, 需要在有功控制回路中引入暂态功角动态补偿项来补偿式(19)中第三项动态功角, 其控制框图如图 7 所示, 可得

$$P_s = K_s \Delta\delta = \frac{E'V_F}{X_g} \cos \delta_a \Delta\delta \quad (20)$$

式中, P_s 为暂态功角动态补偿功率。由式(20)可得

$$K_s = \frac{E'V_F}{X_g} \cos \delta_a \quad (21)$$

式中, K_s 为暂态功角动态补偿系数。

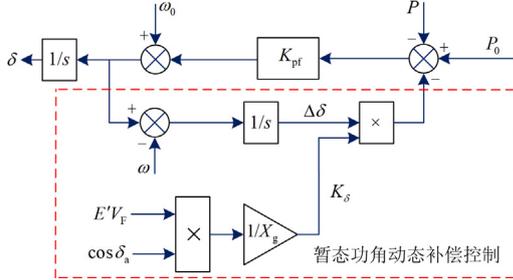


图 7 暂态功角动态补偿控制框图

Fig. 7 Block diagram of transient power angle dynamic compensation control

2.2 引入暂态功角动态补偿控制后稳定性证明

为了滤除高频扰动, 在有功-频率控制回路中引入低通滤波器(low pass filter, LPF), 其控制表达式如式(22)所示。

$$\omega - \omega_0 = \frac{K_{\text{pf}}}{1 + Ts} (P_0 - P) \quad (22)$$

式中, T 为低通滤波时间常数。

基于式(22)再引入暂态功角动态补偿项后可得

$$\frac{T}{K_{\text{pf}}} \frac{d\omega}{dt} = P_0 - P - \frac{1}{K_{\text{pf}}} (\omega - \omega_0) - K_s \Delta\delta \quad (23)$$

设状态变量 $x_1 = \delta - \delta_a$, $x_2 = \Delta\omega$, 由式(23)可

得到状态方程如式(24)。

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2 \\ \frac{T}{K_{\text{pf}}} \frac{dx_2}{dt} = P_0 - P - \frac{1}{K_{\text{pf}}} x_2 - K_s x_1 \end{cases} \quad (24)$$

对其构造 Lyapunov 能量函数为

$$E(x) = \frac{1}{2} (x_2)^2 + a \int_0^{x_1} [\sin(x_1 + \delta_a) - \sin \delta_a] dx_1 \quad (25)$$

式中:

$$\begin{cases} \delta_a = \arcsin \frac{P_0 X_g}{EV} \\ a = \frac{K_{\text{pf}} EV}{TX_g} > 0 \end{cases} \quad (26)$$

$$\dot{E}(x) = -\frac{1}{T} (x_2)^2 - \frac{K_{\text{pf}} K_s}{T} x_1 x_2 \leq 0 \quad (27)$$

当 $-\pi + \delta_a \leq \delta \leq \pi - \delta_a$ 时, 由式(25)和式(27)可知, 含 LPF 的下垂控制型逆变器在引入暂态功角动态补偿后, 在大范围内渐进性稳定。由文献[35]可知, 传统型下垂控制型逆变器是含 LPF 的下垂控制型逆变器的一种特例, 故在引入暂态功角补偿控制后, 其暂态稳定性得到增强。

2.3 电压自适应调控的故障限流控制策略

在发生故障时, 引入暂态功角动态补偿控制使暂态功角维持在稳态值 δ_a 附近, 可以一定程度上抑制故障电流幅值的大小。然而当电网发生严重故障时, 只通过控制暂态功角大小无法将故障电流限制在电流安全阈值范围内。当暂态功角与电网电压跌落一定时, 故障电流大小与 VSC 输出电压呈负相关。通过在无功控制回路自适应调整电压参考指令值将故障电流大小限制在 I_{limit} 。

故障发生前 VSC 处于稳态时, 由式(15)可得

$$\cos \delta_a = \frac{V_0^2 + E^2 - (X_g I_{\text{gN}})^2}{2V_0 E} \quad (28)$$

式中, I_{gN} 为稳态时额定电流幅值大小。发生故障工况时, 此时电网电压跌落至额定电压的 k 倍, 即 $E' = kE$, 由式(15)可得

$$\cos \delta' = \frac{V_F^{*2} + E'^2 - (X_g I_F)^2}{2V_F E'} \quad (29)$$

式中, V_F^* 为故障时输出电压指令值。引入暂态功角补偿后, 暂态功角 δ' 维持在稳态功角 δ_a 附近, 可得

$$\delta' \approx \delta_a \quad (30)$$

由式(28)一式(30)可得故障时输出电压指令值与故障电流之间的关系为

$$V_F^* = \frac{nk + \sqrt{n^2k^2 - 4(E^2k^2 - X_g^2I_F^2)}}{2} \quad (31)$$

其中:

$$n = \frac{V_0^2 + E^2 - X_g^2I_F^2}{V_0} \quad (32)$$

为保证故障电流不超过电流安全阈值, 将 $I_F = I_{limit} = 1.3I_{gN}$ 代入式(31)可得

$$V_F^* = \frac{nk}{2} + \sqrt{\frac{n^2k^2}{4} - E^2k^2 + 1.69X_g^2I_{gN}^2} \quad (33)$$

通过对无功控制回路中电压参考指令值进行调控, 可以使故障电流不超过额定运行时电流安全阈值, 故障时电压参考指令值 V^* 可设置为

$$V^* = \begin{cases} Q_0 - \frac{EV \cos \delta - V^2}{X_g} + V_0 & V^* \leq V_F^* \\ \frac{nk}{2} + \sqrt{\frac{n^2k^2}{4} - E^2k^2 + X_g^2I_{gN}^2} & V^* > V_F^* \end{cases} \quad (34)$$

式中, V^* 为稳态时输出电压参考指令值。当 $V^* > V_F^*$ 时, 需要对电压参考指令值进行调整, 冻结无功控制回路同时设置 $V^* = V_F^*$, 可以限制故障电流, 又可以为电网提供一定的无功功率; 当 $V^* \leq V_F^*$ 时, 则不需要对电压参考指令值进行调整。

2.4 暂态功角和故障电流综合控制流程

暂态控制策略流程框图如图 8 所示。首先, 对电网电压与逆变器输出电流进行实时监测来判断电网是否发生故障。当故障工况时电网电压小于额定值 0.9 倍时, 通过在有功控制回路中引入暂态功角动态补偿项来维持功角的暂态稳定。当 $V^* > V_F^*$ 时, 通过在无功控制回路自适应调整电压参考指令值来抑制故障过电流。最终实现了暂态功角稳定和故障电流抑制, 有利于电网安全稳定运行。

2.5 控制方法对比

暂态功角稳定和故障限流是下垂控制型逆变器稳定运行不可或缺的两个重要因素。此外, 无功控制回路会进一步恶化暂态功角稳定性, 若不考虑无功控制回路的影响, 分析结果偏于保守性; 故障电流特性与暂态功角大小密切相关。因此暂态控制策略要综合考虑暂态功角稳定、故障限流能力、是否考虑无功控制回路影响 3 个方面。表 2 为本文提出暂态控制方法与现有其他控制方法对比。由表 2 可知, 本文提出的控制方法在考虑无功控制回路影响的同时, 能够兼顾暂态功角稳定和故障限流, 有利于逆变器在故障工况下安全稳定运行。

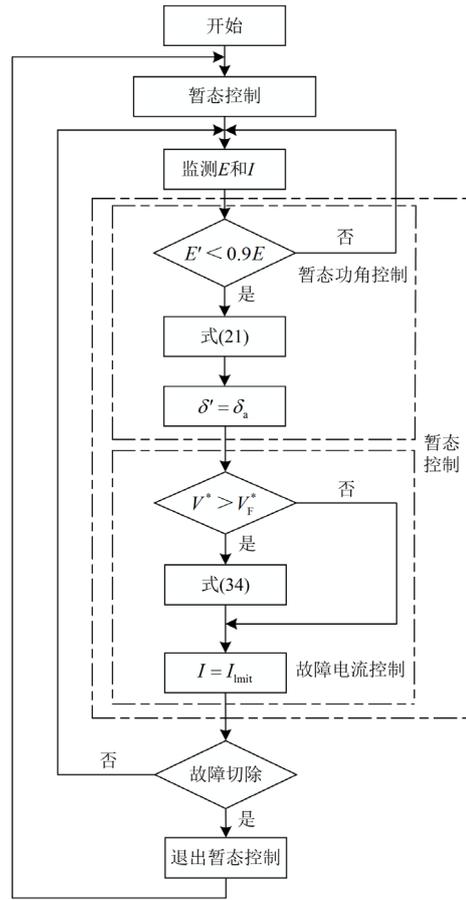


图 8 暂态控制策略流程框图

Fig. 8 Block diagram of the transient control strategy flow

表 2 不同暂态控制方法对比

Table 2 Comparison of different transient control methods

控制方法	暂态功角 是否稳定	故障限流 能力	是否考虑无功 控制回路影响
文献[30]	稳定	弱	否
文献[32]	稳定	弱	是
文献[34-35]	失稳	强	否
文献[36]	稳定	强	否
本文控制方法	稳定	强	是

3 仿真实验与分析

为验证本文理论分析的正确性和暂态控制策略的有效性, 在 Matlab/Simulink 中搭建如图 1 所示的下垂控制型 VSC 并网仿真模型, 主要仿真参数见表 1。

3.1 无功控制回路对暂态稳定性影响仿真验证

初始时刻 VSC 运行在额定工况下, 1 s 时电网突然发生对称短路故障, 电网电压跌落至 0.3 p.u., 故障持续时间为 2 s, 3 s 时故障切除 VSC 恢复正常运行。图 9(a)为考虑无功控制回路影响时 VSC 功角和

电流输出波形，即在电网电压跌落时冻结无功控制回路，此时暂态功角增大为 2.17 p.u.，但是暂态功角仍然能够保持稳定，输出电流增大为 1.98 p.u.。图 9(b)为不考虑无功控制回路的影响时 VSC 功角和电流输出波形，故障时暂态功角发生周期性振荡，暂态功角失去稳定性，同时 VSC 的输出电流也发生周期性振荡且幅值大于额定运行时电流安全阈值。通过以上分析可得，无功控制回路会进一步恶化 VSC 暂态稳定性，仿真结果与理论分析一致。

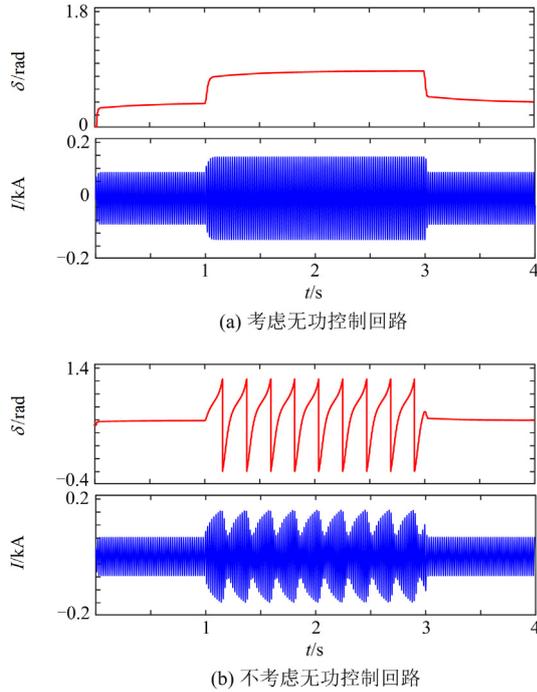


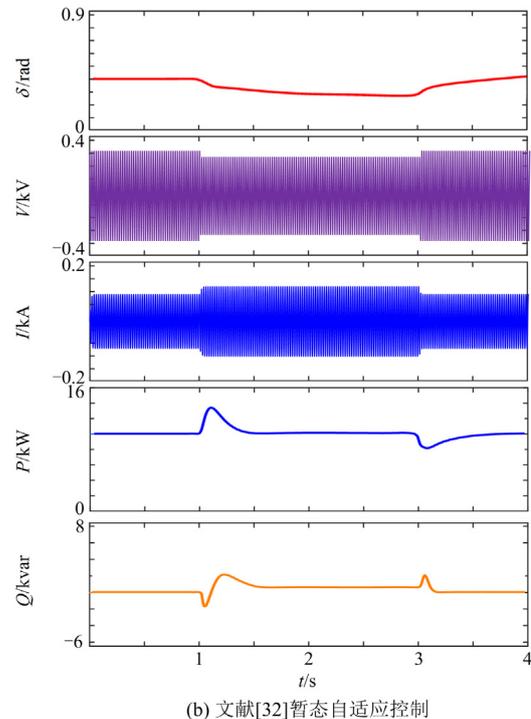
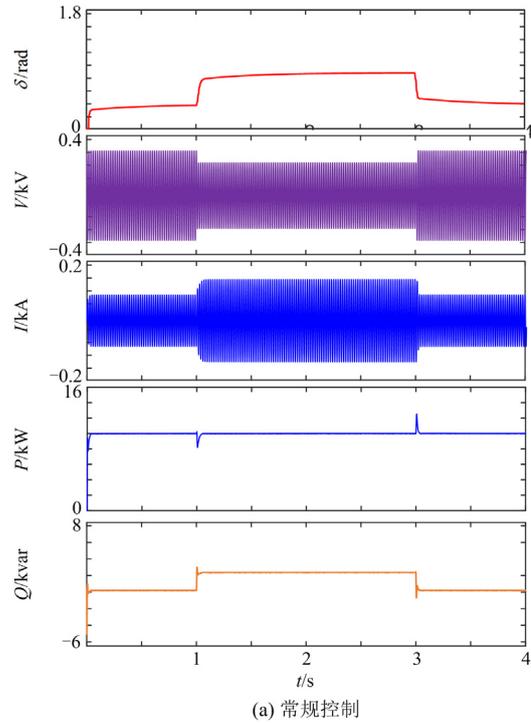
图 9 不同无功控制策略下的下垂控制逆变器仿真波形
Fig. 9 Simulation waveform of droop control inverter with different reactive power control strategies

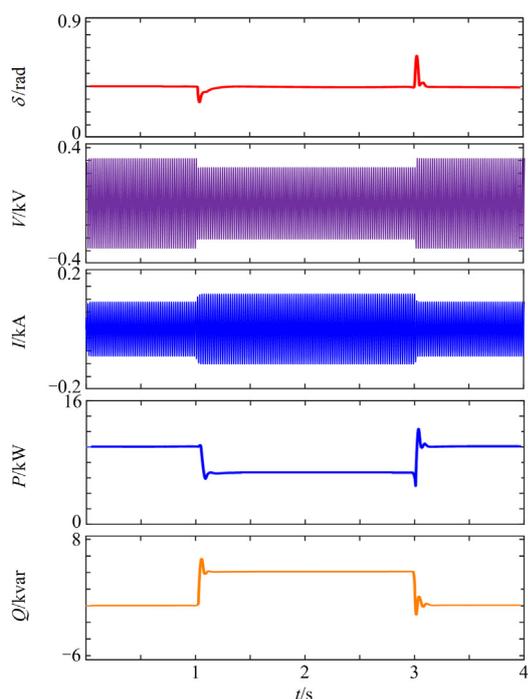
3.2 暂态控制策略仿真验证

初始时刻 VSC 运行在额定工况下，1 s 时电网突然发生对称短路故障，故障持续时间为 2 s，3 s 时故障切除，VSC 恢复正常运行。下面分两种工况：即电网电压跌落至 0.4 p.u.与 0.2 p.u.，对常规控制、文献[32]暂态自适应控制、本文控制策略下的下垂控制型逆变器进行仿真验证和对比分析。

电网电压跌落至 0.4 p.u.时的下垂控制型逆变器波形如图 10 所示。3 种控制策略仿真结果对比如表 3 所示。图 10(a)为常规控制下输出波形，图中常规下垂控制型逆变器暂态稳定，故障期间功角维持在 2.15 p.u.，但故障期间电流增加至 2.02 p.u.，超过电流安全阈值，不利于逆变器的安全运行；此外，逆变器输出电压受无功电压控制回路影响降至

0.77 p.u.。图 10(b)为加入暂态自适应控制后的下垂控制型逆变器波形，下垂控制型逆变器暂态功角维持在 0.78 p.u.附近，故障电流减小至 1.28 p.u.，不超出安全范围，能够安全稳定运行，但是暂态功角无法控制在额定值附近。图 10(c)为加入暂态功角补偿和故障限流综合控制后的下垂控制型逆变器波形，





(c) 暂态功角补偿和故障限流综合控制

图 10 电网电压 0.4 p.u.时下垂控制逆变器仿真波形
Fig. 10 Simulation waveform of droop control inverter when the grid voltage is 0.4 p.u.

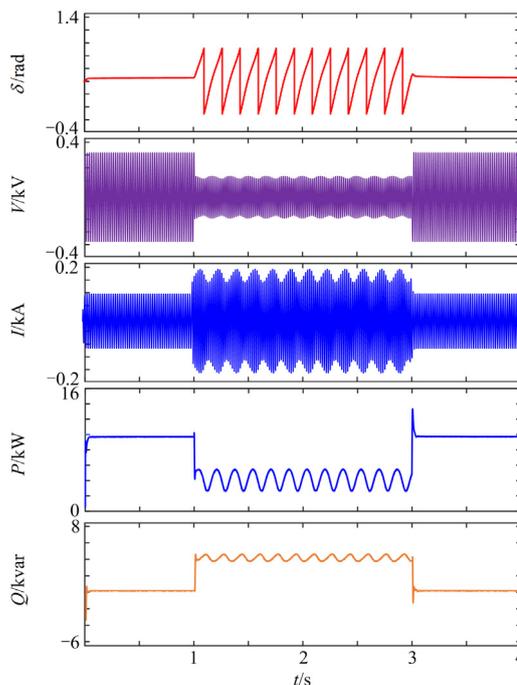
表 3 电网电压 0.4 p.u.时不同暂态控制方法对比
Table 3 Comparison of different transient control methods when the grid voltage is 0.4 p.u.

控制方法	暂态功角是否稳定	暂态功角超调量/p.u.	故障电流是否超过安全阈值	电流超调量/p.u.
常规控制方法	稳定	1.15	是	1.02
文献[32]	稳定	-0.22	否	0.28
本文控制方法	稳定	0	否	0.3

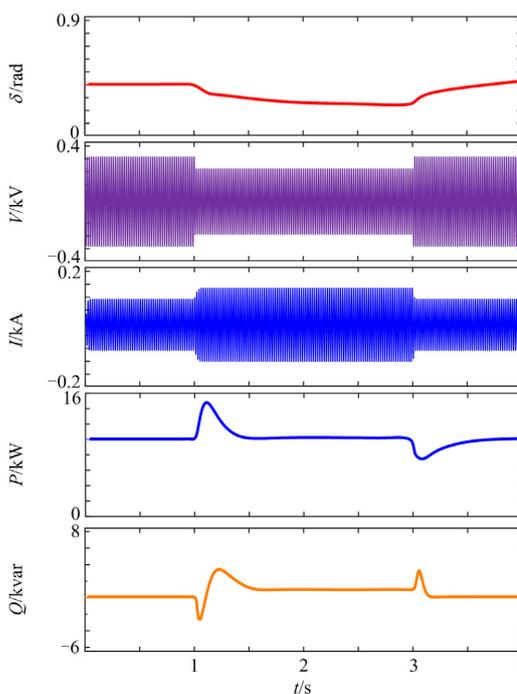
图中下垂控制型逆变器暂态功角维持在额定值附近, 故障电流被限制在 1.3 p.u., 满足安全运行条件。此外, 下垂控制型逆变器输出电压被控制在 0.82 p.u., 故障期间下垂控制型逆变器输出无功功率增加, 有利于故障点电压恢复。

电网电压跌落至 0.2 p.u.时的下垂控制型逆变器波形如图 11 所示。3 种控制策略仿真结果对比如表 4 所示。图 11(a)为常规控制下输出波形, 图中传统下垂控制型逆变器在故障期间失去稳定性, 功角、电流等电气量周期性振荡。图 11(b)为加入暂态自适应控制后的下垂控制型逆变器波形, 图中暂态功角在故障期间维持在 0.75 p.u.附近, 下垂控制型逆变器暂态稳定, 但故障电流达到 1.76 p.u., 超过电流

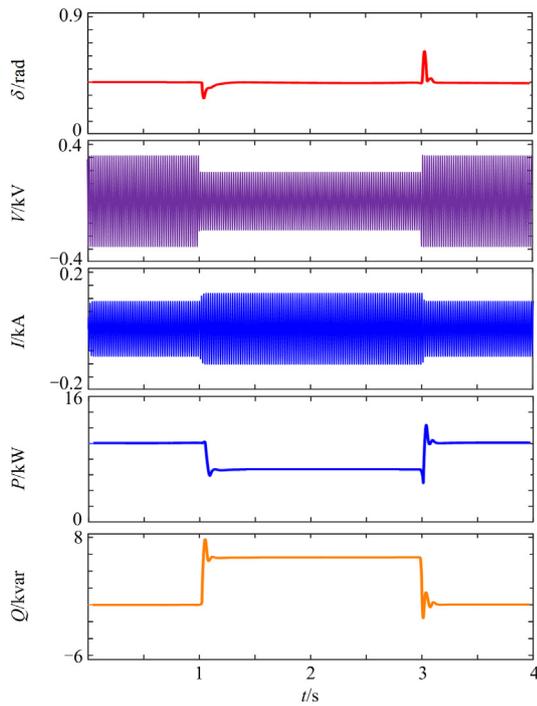
安全阈值。图 11(c)为加入暂态功角补偿和故障限流综合控制后下垂控制型逆变器波形, 图中下垂控制型逆变器暂态功角维持在额定值附近, 故障电流被限制在 1.3 p.u., 满足安全运行需求。通过对比分析可知, 当故障深度较大时, 暂态自适应控制方法可以实现暂态功角稳定但无法抑制故障过电流, 限流能力具有一定的局限性。而本文提出控制方法无论



(a) 常规控制



(b) 文献[32]暂态自适应控制



(c) 暂态功角补偿和故障限流综合控制

图 11 电网电压 0.2 p.u.时下垂控制逆变器仿真波形

Fig. 11 Simulation waveform of droop control inverter when the grid voltage is 0.2 p.u.

表 4 电网电压 0.2 p.u.时不同暂态控制方法对比

Table 4 Comparison of different transient control methods when the grid voltage is 0.2 p.u.

控制方法	暂态功角是		故障电流是否超	
	否稳定	暂态功角超调量/p.u.	过安全阈值	电流超调量/p.u.
常规控制方法	失稳	—	是	—
文献[32]	稳定	-0.25	是	0.76
本文控制方法	稳定	0	否	0.3

故障深度多大，都能够实现暂态功角稳定和故障限流，适用范围较广。

4 结论

为了提高电网故障时下垂控制型逆变器暂态稳定性和故障限流能力，本文通过分析下垂控制型逆变器暂态功角特性和故障电流特性，以暂态功角稳定和故障限流控制为目标，提出一种兼顾功角稳定与故障限流控制的暂态控制策略。通过理论分析和仿真验证得到以下结论。

1) 暂态过程中不平衡功率是造成暂态功角持续增大的原因，若不平衡功率存在过零点，暂态功角稳定，否则暂态功角失稳。考虑无功控制回路的影响，会增大暂态过程中不平衡功率，进一步恶化

暂态稳定性。故障电流大小与逆变器输出电压和暂态功角有关，在暂态功角不变和电网电压一定时，故障电流大小与输出电压呈负相关。

2) 通过在有功控制回路中引入暂态功角动态补偿控制 VSC 额定运行时有功功率参考指令值，实现对暂态过程中不平衡功率的动态补偿，抑制暂态功角的增大，使暂态功角维持在稳态值附近。在无功控制回路中根据故障工况自适应调整电压参考指令值，使得故障电流在安全阈值范围内。

3) 本文所提控制策略一定程度上增加了故障期间无功功率输出量，有利于故障电压恢复，从而实现下垂控制型逆变器在电网故障时的安全稳定运行。

4) 本文主要研究了电网对称故障时下垂控制型逆变器暂态功角和故障电流综合调控的暂态控制策略，未来将针对电网发生不对称故障时暂态功角和故障电流综合调控的暂态控制策略进行研究。

参考文献

[1] 刘永奇, 陈龙翔, 韩小琪. 能源转型下我国新能源替代的关键问题分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 515-523.
LIU Yongqi, CHEN Longxiang, HAN Xiaoqi. The key problem analysis on the alternative new energy under the energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 515-523.

[2] 索之闻, 李晖, 张锋, 等. 高比例新能源直流送端系统分布式调相机优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 50(23): 133-141.
SUO Zhiwen, LI Hui, ZHANG Feng, et al. Optimal configuration of a distributed synchronous condenser for an HVDC sending-end system with a high-proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2023, 50(23): 133-141.

[3] 李晖, 刘栋, 姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6259.
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6259.

[4] 马喜平, 贾嵘, 梁琛, 等. 高比例新能源接入下电力系统降损研究综述[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4305-4315.
MA Xiping, JIA Rong, LIANG Chen, et al. Review of researches on loss reduction in context of high penetration of renewable power generation[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4305-4315.

[5] ROBERTO R, WANG Xiongfei, MARCO L, 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.
- [6] 何瑞, 谢振刚, 程昱舒. 具有主动故障穿越能力的光伏逆变器自治控制方法研究[J]. *高压电器*, 2022, 58(7): 101-110.
HE Rui, XIE Zhengang, CHENG Yushu. Research on autonomous control method of photovoltaic inverter with active fault ride-through capability[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(7): 101-110.
- [7] 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 Changchun, ZHAO Shang, YANG Hongcheng, 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.
- [8] 刘俊志, 黄景涛, 杨清, 等. 虚拟空间矢量调制的NPC型三电平并网逆变器预测控制[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(6): 114-120.
LIU Junzhi, HUANG Jingtao, YANG Qing, et al. Predictive control of NPC-type three-level grid-connected inverters with virtual space vector modulation[J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)*, 2022, 50(6): 114-120.
- [9] 黄鹏, 戴威, 张莹, 等. 兼具有源电力滤波器功能的多功能并网逆变器控制[J]. *电力工程技术*, 2021, 40(1): 107-114.
HUANG Peng, DAI Wei, ZHANG Ying, et al. Multi-function grid-connected inverter control with APF function[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2021, 40(1): 107-114.
- [10] ZHANG Wei, ZHENG Zhong, LIU Hongpeng. Droop control method to achieve maximum power output of photovoltaic for parallel inverter system[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2022, 8(6): 1636-1645.
- [11] SUN Yao, LI Lang, SHI Guangze, et al. Power factor angle droop control—a general decentralized control of cascaded inverters[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021, 36(1): 465-468.
- [12] 董存, 陶以彬, 张牟发, 等. 基于虚拟同步发电机的逆变器类电源频率特性及重塑技术[J]. *电力建设*, 2022, 43(2): 109-116.
DONG Cun, TAO Yibin, ZHANG Moufa, et al. Frequency characteristics and reshaping technology for inverter-based generators based on virtual synchronous generator[J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(2): 109-116.
- [13] 刘鸿鹏, 刘佳耕, 张伟, 等. 下垂并网逆变器网络的慢同调与聚合方法[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(3): 96-104.
LIU Hongpeng, LIU Jiageng, ZHANG Wei, et al. Slow coherency and aggregation method for droop-controlled grid-connected inverter networks[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(3): 96-104.
- [14] 马临超, 齐山成, 刘毅. 分布式逆变器并联运行系统的简化控制策略[J]. *电网与清洁能源*, 2022, 38(3): 129-138.
MA Linchao, QI Shancheng, LIU Yi. Simplified control strategy of parallel operation for distributed inverters system[J]. *Power System and Clean Energy*, 2022, 38(3): 129-138.
- [15] 查雨欣, 林健, 王悦, 等. 基于广义下垂控制的光伏发电系统的惯量特性分析[J]. *智慧电力*, 2021, 49(2): 54-59, 68.
ZHA Yuxin, LIN Jian, WANG Yue, et al. Analysis of inertia characteristics of photovoltaic power generation system based on generalized droop control[J]. *Smart Power*, 2021, 49(2): 54-59, 68.
- [16] 王书征, 李先允, 许峰. 不对称电网故障下级联型光伏并网逆变器的低电压穿越控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(13): 84-91.
WANG Shuzheng, LI Xianyun, XU Feng. Low voltage ride-through controlling of cascaded inverter for grid-connected photovoltaic systems under asymmetric grid fault[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(13): 84-91.
- [17] 李红, 粟时平, 唐铭泽, 等. 不对称故障下考虑电压跌落程度的新能源逆变器控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(1): 21-32.
LI Hong, SU Shiping, TANG Mingze, et al. Control strategy of renewable energy inverter considering voltage sag degree under asymmetric faults[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(1): 21-32.
- [18] FU Xikun, SUN Jianjun, HUANG Meng, et al. Large-signal stability of grid-forming and grid-following controls in voltage source converter: a comparative study[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(7): 7832-7840.
- [19] LIAO Yicheng, WANG Xiongfei. Controller design-oriented analysis of grid-forming converters for stability robustness enhancement[J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2021, 7(4): 37-47.
- [20] FAN Bo, WANG Xiongfei. Equivalent circuit model of grid-forming converters with circular current limiter for transient stability analysis[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(4): 3141-3144.
- [21] 冯夏云, 汪飞, 李玉菲, 等. 下垂控制逆变器输出阻抗外特性建模及参数敏感性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(21): 7012-7020.

- FENG Xiayun, WANG Fei, LI Yufei, et al. Modelling and sensitivity analysis for the output impedance profile of droop controlled inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 7012-7020.
- [22] 陈建新, 张旭, 孟浩杰, 等. 基于下垂控制的单台换流器-无穷大系统数学模型及直流系统稳定的解析条件[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 60-67.
- CHEN Jianxin, ZHANG Xu, MENG Haojie, et al. Mathematical model and analytical stabilizing condition of a droop-based single converter-infinite DC system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 60-67.
- [23] LEI Jintao, XIANG Xin, LI Wuhua, et al. The analysis and calculation of power angle dynamics in grid forming converter under large disturbances based on KBM asymptotic method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(2): 1494-1508.
- [24] AHMED L, MOHAMMED E A, HATEM H Z, et al. Assessing the impact of reactive power droop on inverter based microgrid stability[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 2380-2392.
- [25] LIU Teng, WANG Xiongfei. Transient stability of single-loop voltage-magnitude controlled grid-forming converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(6): 6158-6162.
- [26] 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.
- [27] WU Heng, WANG Xiongfei. Design-oriented transient stability analysis of grid-connected converters with power synchronization control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 6473-6482.
- [28] MADS G T, WANG Xiongfei, POOYA D, 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.
- [29] YU Moduo, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. Transient stability mechanism of grid-connected inverter-interfaced distributed generators using droop control strategy[J]. Applied Energy, 2018, 210: 737-747.
- [30] 章雷其, 黄林彬, 黄伟, 等. 提高下垂控制逆变器虚拟功角暂态稳定性的控制方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 56-62, 99.
- ZHANG Leiqi, HUANG Linbin, HUANG Wei, et al. Control methods for improving virtual power angle transient stability of droop-controlled inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 56-62, 99.
- [31] PAN Donghua, WANG Xiongfei, LIU Fangcheng, et al. Transient stability impact of reactive power control on grid-connected converters[C]//2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), September 29-October 3, 2019, Baltimore, MD, USA.
- [32] 余墨多, 黄文焘, 邰能灵, 等. 基于光伏电站暂态特性的自适应暂稳控制方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(增刊 2): 512-522.
- YU Moduo, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. Transient stability enhancement with an adaptive control scheme for photovoltaic plants[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S2): 512-522.
- [33] OUREILIDIS K O, DEMOULIAS C S. A fault clearing method in converter-dominated microgrids with conventional protection means[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(6): 4628-4640.
- [34] PAQUETTE A D, DIVAN D M. Virtual impedance current limiting for inverters in microgrids with synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 51(2): 1630-1638.
- [35] XIN Huanhai, HUANG Linbin, ZHANG Leiqi. 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.
- [36] 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.

收稿日期: 2023-03-29; 修回日期: 2023-06-13

作者简介:

杨欢红(1965—), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为电力系统优化调度与控制、综合能源系统优化研究; E-mail: yanghuanhong0907@163.com

焦伟(1994—), 男, 硕士, 研究方向为并网逆变器控制与稳定性研究。E-mail: 1099808370@qq.com

(编辑 魏小丽)