

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.226418

不对称电压跌落下分布式新能源多目标主动控制策略研究

季亮¹, 郭佳龙¹, 李博通², 洪启腾³, 李振坤¹, 米阳¹, 杨兴武¹

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072;
3. 英国思克莱德大学, 英国 格拉斯哥 G1 1RD)

摘要: 在电网电压不平衡跌落下, 分布式新能源面临多控制目标缺乏协调、控制策略复杂等问题, 严重情况下导致切机, 影响电网稳定运行。对此, 充分考虑电压跌落场景, 提出了一种不对称电压跌落下新能源多目标主动控制策略。首先, 充分考虑电网阻抗对于电压的影响, 建立了不对称电压跌落下的逆变器正负序电压支撑方程, 实现了对相电压的灵活控制。其次, 提出了不对称电压跌落下多个新能源控制目标, 并建立了基于正负序有功和无功电流的控制目标方程。在此基础上, 深入分析多控制目标相互制约机理, 并根据电压跌落程度优化控制目标, 构建不同场景下的目标函数与约束条件。最后, 利用 Fmincon 优化算法, 实现并网逆变器在不对称电压跌落下的多目标优化控制。利用 Matlab/Simulink 仿真平台, 验证了该方法在不同电压跌落场景下的有效性。

关键词: 不对称电压跌落; 多目标控制策略; 电流参考值; 主动电压支撑; 有功功率控制

A multi-objective active control strategy for distributed generation under asymmetric voltage sag

Ji Liang¹, Guo Jialong¹, Li Botong², Hong Qiteng³, Li Zhenkun¹, Mi Yang¹, Yang Xingwu¹

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. School of Electrical Automation and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. University of Strathclyde, Glasgow G1 1RD, United Kingdom)

Abstract: Under asymmetric voltage sag, distributed generation faces problems such as lack of coordination of multiple control objectives and high complexity of control strategies. These can lead to disconnection in serious cases and affect the stable operation of the power grid. Thus, a multi-objective active control strategy for DG is proposed considering voltage sags. First, the influence of grid impedance on voltage is fully considered, and the positive and negative sequence voltage supporting equation under asymmetric voltage sag is established to realize flexible control of phase voltage. Second, several control targets under asymmetric voltage sag based on positive and negative sequence active power and reactive current are established. The mutual restraint mechanism of multiple control objectives is analyzed, and the control objectives are optimized according to the voltage sag scenarios, and the objective function and constraint conditions in different scenarios are constructed. Finally, the Fmincon optimization algorithm is used to realize multi-objective optimal control of a grid-connected inverter under asymmetric voltage sag. Matlab/Simulink is used to verify the effectiveness of the proposed method in different voltage sag scenarios.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61873159).

Key words: asymmetric voltages sag; multi-objective control strategy; current reference; active voltage support; active power control

0 引言

随着风能、太阳能等分布式新能源大量接入电

网, 发展以高比例可再生能源渗透为核心的低碳可持续能源系统已成为世界各国的重要战略目标^[1]。在故障暂态下, 电力电子接口的新能源面临因电压支撑能力弱、电流越限、有功功率振荡等问题而切机的风险, 大规模新能源发电单元接入对电力系统的可靠性和稳定性影响不断增大。当新能源发电单元并网点发生不对称电压跌落时, 一方面电力电子

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61873159); 上海绿色能源并网工程技术研究中心项目资助(13DZ2251900); 上海市电站自动化技术重点实验室项目资助

接口耐受能力差，往往导致风电和光伏脱网，而另一方面电力电子装置的高可控性也为高比例新能源接入电力系统提供了有力的解决方案^[2]。因此，根据电力系统相关并网标准设定控制目标电气量，通过主动改变新能源的控制策略，为电压不平衡跌落下的新能源发电单元提供较强的故障穿越能力，对提升高比例新能源系统的运行稳定性具有重要意义。

目前，基于对称分量法提取序分量实现不对称电压跌落下不同控制目标的改进控制策略已有大量研究^[3]。文献[4-5]基于新能源并网系统的控制和故障特性分析，提出了保证风机、光伏逆变器能稳定可靠穿越电网故障的控制策略。随着新能源渗透率的提高，电网准则要求其注入无功功率以主动支撑电网电压。文献[6-7]提出一种参考电流指令算法，通过选取不同正负序无功电流比例系数可实现在不同电压跌落场景下灵活电压支撑控制，但未对该比例系数的计算方法加以讨论。文献[8-9]在满足最大电流限制条件下灵活控制逆变器的正负序有功和无功功率，并分析了合理选择功率指令对电网电压支撑的作用，但其有功、无功功率指令难以直接确定。文献[10]提出一种将撬棒保护电路与鲁棒反演控制策略结合的方法，使得风力发电机在故障下能提供较大无功功率以提升系统电压水平。以上研究提出的电压支撑控制只适用于电网阻抗呈感性且没有实现具体电压支撑目标的高压输电网络，基于此，文献[11]根据电网并网准则提出一种计及电网阻抗特性的最大正序支撑控制策略，但该控制策略无法在较大不对称故障下有效支撑公共并网点电压，文献[12]将文献[11]推广到更一般的情况，对正负序电压进行同时控制。更进一步地，文献[13-15]以相电压幅值上下限为约束，将并网点相电压支撑到并网运行电压标准范围内，实现最大电压支撑。然而，上述控制策略虽然避免了过电流跳闸，但不具备有功输出能力，并且均未考虑功率振荡对逆变器的影响，而这可能导致新能源脱网。随着研究的深入，考虑多目标和具体场景下的协调控制策略被提出。文献[16]提出基于灵活的电流注入以实现最大有功功率输出目标的控制策略，将注入电流始终控制在设定最大值的同时避免了有功功率振荡。文献[17]通过比较电流指令将不同电压跌落分为不同场景，在不同场景下注入相应电流指令，同时实现了多个控制目标。文献[18]提出一种多目标的优化控制策略，首先考虑了正负序电压下的相电压支撑控制，且兼顾了有功振荡约束和有功输出多个目标之间的协调，但所提控制策略过于复杂、受限于逆变器的容量大小，将难以实现。

总结上述研究可知，不平衡电压跌落下新能源控制策略多针对某一两个控制目标进行研究，并网逆变器仍面临一定的切机风险。而考虑多目标的控制策略对并网逆变器容量有较大要求，因逆变器容量不足导致控制目标无法实现的情况时有发生。因此，有必要通过充分考虑电压跌落场景，在不同电压跌落场景下选取合适的控制目标，保证在充分利用逆变器容量下实现多目标协调控制。

基于以上研究，为了实现不平衡电压跌落下电压支撑、电流限幅、有功功率振荡约束和有功输出4个控制目标，本文分析推导了计及线路阻抗特性的正负序电压支撑方程，在此基础上提出了一种基于正负序电流幅值表示的多目标控制方程，通过充分考虑电压跌落场景，构建不同电压跌落场景下控制目标，利用 Fmincon 优化算法求解实现并网逆变器在不同电压跌落场景下安全可靠并网。最后，基于 Matlab/Simulink 搭建仿真模型，算例结果验证了所提控制策略的有效性。

1 不对称电压跌落下逆变器的控制结构和数学模型

1.1 分布式新能源的控制结构

图1展示了以光伏为例的分布式新能源的并网拓扑结构。整个系统由光伏发电单元、升压变换器、三相并网逆变器和大电网组成。首先，光伏经DC/DC升压变换器向逆变器直流侧输出最大有功功率，不对称故障下也可以调整为非最大有功功率控制；交流侧逆变器控制系统利用实时量测的并网点电压 v 、电流信号 i ，输出控制逆变器的脉冲信号S1—S6实现传统的PQ控制和本文提出的多目标控制策略，LC滤波使网侧电流有较小的谐波分量。最后，通过送出线路接入大电网。

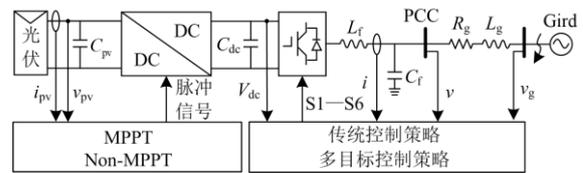


图1 分布式新能源并网拓扑图

Fig. 1 Topology of grid-connected distributed generation

本文主要研究不平衡电压跌落下的逆变器控制策略，其控制结构如图2所示。逆变器控制器需要输入实时量测的电压电流信号 v_g 、 i_{abc} ，通过dq旋转坐标变换和正负序分量提取将电压信号分解为 v_g^+ 、 v_g^- ，将电流分解为 I_d^+ 、 I_d^- 、 I_q^+ 、 I_q^- 。正负序电压支撑方程表示了网侧电压与并网点电压之间的关

系。直流电压外环控制逆变器输出有功功率, 在故障期间需要进行有功功率削减, 从而使输入功率和输出功率保持平衡。基于控制目标方程求解计算电流参考值, 将电流参考值与量测值比较通过 PI 控制器实现电流环控制。电流环提供给 PWM 驱动信号, 最终输出控制逆变器桥式电路的开关信号 S1—S6。下文主要针对该控制系统图展开说明。

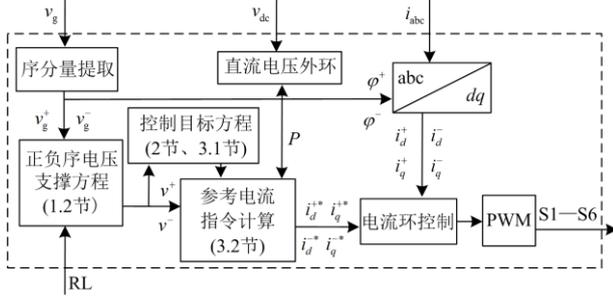


图2 提出的故障下控制系统

Fig. 2 Proposed control system under grid fault

1.2 不对称电压跌落下的并网逆变器数学模型

在不对称电压跌落下, 为了实现电流控制策略的多个控制目标, 可以通过灵活注入不同大小的正负序有功、无功电流满足低压穿越要求。在电压不对称情况下, 交流系统中任何一点正负序电压矢量在 \$\alpha\beta\$ 坐标系下表示为^[19]

$$v_k = v_k^+ + v_k^- = \begin{bmatrix} v_{k\alpha}^+ \\ v_{k\beta}^+ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{k\alpha}^- \\ v_{k\beta}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_k^+ \cos(\omega t + \delta^+) + V_k^- \cos(-\omega t + \delta^-) \\ V_k^+ \sin(\omega t + \delta^+) + V_k^- \sin(-\omega t + \delta^-) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: \$v_k^+\$ 和 \$v_k^-\$ 表示交流系统任意一点 \$k\$ 的正负序电压; \$V_k^+\$ 和 \$V_k^-\$ 表示正负序电压的幅值; \$\delta^+\$ 和 \$\delta^-\$ 分别为正负序电压对应的初相角。同理可知, 在基于电压矢量定向的直接电流控制策略下^[9], 任一点的注入电流矢量 \$i\$ 可在同步旋转 \$dq\$ 坐标系下表示为

$$i = i_d^+ + i_q^+ + i_d^- + i_q^- = \begin{bmatrix} I_d^+ \cos(\omega t + \delta^+) - I_q^+ \sin(\omega t + \delta^+) \\ I_d^+ \sin(\omega t + \delta^+) + I_q^+ \cos(\omega t + \delta^+) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_d^- \cos(-\omega t + \delta^-) - I_q^- \sin(-\omega t + \delta^-) \\ I_d^- \sin(-\omega t + \delta^-) + I_q^- \cos(-\omega t + \delta^-) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: 角标“+”、“-”代表电流的正负序分量; 角标“d”、“q”代表电流的 \$d\$、\$q\$ 轴分量。根据图1的拓扑结构和对称分量法, 这些电流分量可以在一定程度上提升公共并网点 (point of common coupling, PCC) 的电压, 根据基尔霍夫电压定律得到逆变器出口侧电压的数学表达式为

$$v^+ = v_g^+ + L_g \frac{di^+}{dt} + R_g i^+ \quad (3)$$

$$v^- = v_g^- + L_g \frac{di^-}{dt} + R_g i^- \quad (4)$$

式中: \$v^+\$ 和 \$v^-\$ 代表 PCC 处电压; \$v_g^+\$、\$v_g^-\$ 代表电网侧母线电压; \$L_g\$、\$R_g\$ 为线路等效电感和电抗。逆变器的主动电压支撑控制策略即通过主动注入正负序电流提升 PCC 点的正序电压、降低负序电压, 故利用上式可推导需注入的参考电流。将式(1)和式(2)代入式(3)和式(4)中, 可以得到以幅值表示的 \$dq\$ 旋转坐标系下的逆变器电压支撑方程, 具体推导见图3。式(5)一式(8)是各控制目标实现的基础。

$$V^+ = \sqrt{(V_g^+)^2 - (\omega L_p^+ - R_l^+)^2} + \omega L_l^+ + R_l^+ \quad (5)$$

$$V^- = \sqrt{(V_g^-)^2 - (\omega L_p^- + R_l^-)^2} - \omega L_l^- + R_l^- \quad (6)$$

$$\delta^+ = \delta_g^+ - \arcsin\left(\frac{\omega L_p^+ - R_l^+}{V_g^+}\right) \quad (7)$$

$$\delta^- = \delta_g^- - \arcsin\left(\frac{\omega L_p^- + R_l^-}{V_g^-}\right) \quad (8)$$

式中: \$V^+\$、\$V^-\$ 为 PCC 正负序电压幅值; \$V_g^+\$、\$V_g^-\$ 为网侧电压正负序电压幅值; \$\delta^+\$、\$\delta^-\$ 为 PCC 点正负序电压初始相角; \$\delta_g^+\$、\$\delta_g^-\$ 为网侧电压正负序电压相角。从式(5)一式(8)可以看出, 通过设置 4 个电流指令幅值, 可以实现支撑正序电压、降低负序电压从而控制相电压的目标, 同时电压支撑效果取决于送出线阻抗参数^[20]。

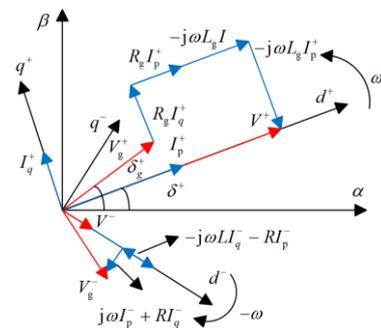


图3 电压支撑矢量图

Fig. 3 Vector diagram of voltage support

2 不对称电压跌落下逆变器的目标方程

为保证不对称电压跌落下的逆变器能够安全稳定并网, 改进控制策略需要逆变器具备以下几种能力:

1) 支撑正序电压、降低负序电压以尽可能满足相电压约束以提升低压穿越能力;

2) 逆变器输出电流不超过最大允许电流限制;
3) 减少不对称故障下由正负序电流电压引起的有功振荡;

4) 在满足逆变器不脱网前提下充分利用其容量, 尽可能输出有功功率, 减少瞬时有功功率不平衡。

因此, 新能源并网逆变器需要满足以上的控制目标, 并建立所提目标的数学表达式。

2.1 相电压支撑方程

新能源电站在故障暂态情况下应具有一定的主动电压支撑能力, 控制逆变器向系统释放大无功避免电压跌落^[21]。为了最大程度地提升逆变器的低压穿越能力, 我国规定光伏发电系统并网处电压偏差应满足电能质量国家标准, 并网准则对并网点电压的上下限提出要求^[14]。PCC 的相电压幅值与不平衡电压下的正负序电压幅值之间的表达式为

$$\begin{cases} V_a = \sqrt{(V^+)^2 + (V^-)^2 + 2V^+V^- \cos(\phi)} \\ V_b = \sqrt{(V^+)^2 + (V^-)^2 + 2V^+V^- \cos(\phi - \frac{2}{3}\pi)} \\ V_c = \sqrt{(V^+)^2 + (V^-)^2 + 2V^+V^- \cos(\phi + \frac{2}{3}\pi)} \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$\phi = \delta^+ + \delta^- \quad (10)$$

式中: V_a 、 V_b 、 V_c 为逆变器出口侧三相电压幅值; ϕ 为 a 相正负序电压之间的相角。从式(9)可以看出, 当正负序电压相角一定时, 相电压的幅值取决于正负序电压幅值, 通过提升正序电压可以同时提升三相电压, 降低负序电压可以使三相电压均衡。不难看出, 基于 1.2 节推导的正负序电压支撑方程, 可以通过控制 PCC 处的正负序电压, 从而达到限制 abc 三相电压在合理范围内的目的, 充分满足新能源持续并网的电压偏差要求。

根据电网运行电压偏差相关标准, 需要将 PCC 电压提升到额定电压的 0.85~1.1 倍, 即相电压约束方程为

$$\begin{cases} V_{\min} \geq V_{\min}^{\text{set}} = 0.85 \text{ p.u.} \\ V_{\max} \leq V_{\max}^{\text{set}} = 1.1 \text{ p.u.} \end{cases} \quad (11)$$

在电压跌落严重情况下, 以上相电压的约束要求难以满足, 此时的约束条件为

$$V_{\max} \leq V_{\max}^{\text{set}} = 1.1 \text{ p.u.} \quad (12)$$

2.2 电流限幅

为保证在低压穿越过程中改进的控制策略不会因为过流导致逆变器切机, 需要设计合理的限流控制算法将逆变器三相电流控制在最大允许输出电流范围内。因此, 需对三相电流的幅值表达式进行推

导, 由式(2)可得, 逆变器三相电流幅值表达式转化为

$$I_{\text{abc}} = \sqrt{(I_{dL} \cos \gamma + I_{qL} \sin \gamma)^2 + (-I_{qS} \cos \gamma + I_{dS} \sin \gamma)^2} \quad (13)$$

其中

$$\begin{cases} I_{dL} = I_d^+ + I_d^- \\ I_{dS} = I_d^+ - I_d^- \\ I_{qL} = I_q^+ + I_q^- \\ I_{qS} = I_q^+ - I_q^- \\ \gamma = (\delta, \delta + \pi/3, \delta - \pi/3) \end{cases} \quad (14)$$

式中: I_{abc} 为逆变器出口侧 abc 三相的电流幅值; γ 为三相电压向量分别对应的相角。

逆变器输出电流一般为额定电流 1.2~1.5 倍, 为了充分利用逆变器容量, 本文将电流限幅转化为等式约束, 故障情况下逆变器输出最大相电流恒为 1.2 倍额定电流。

$$\max \{I_a, I_b, I_c\} = 1.2 \text{ p.u.} \quad (15)$$

2.3 有功功率振荡

在不对称电压跌落下, 逆变器输出的有功、无功功率不仅含有直流分量, 还含有正余弦振荡分量, 且会导致直流母线电压存在二次纹波, 严重时影响变流器的稳定运行。当采用正负序电压矢量定向的控制策略时, 同步旋转坐标系的 d 轴与电网电压矢量重合, q 轴分量均为 0, d 轴分量分别与正负序电压幅值相等。展开可得到以幅值形式表达的有功功率振荡分量表达式^[22], 如式(16)所示。

$$\hat{P} = \sqrt{(V^+I_d^- + V^-I_d^+)^2 + (V^+I_q^- - V^-I_q^+)^2} \quad (16)$$

式中, \hat{P} 表示有功功率振荡幅值。

直接消除有功功率振荡不利于系统有功功率的输出, 本文考虑将有功振荡约束在一个合理范围内, 而有功功率的二倍频振荡会引起直流链路电压纹波, 因此可以根据直流电容电压纹波要求间接约束有功振荡, 如式(17)所示。

$$\hat{P}_{\text{peak}} \leq \omega C V_{\text{dc}} \hat{V}_{\text{dc_peak}} \quad (17)$$

式中: \hat{P}_{peak} 为最大有功功率振荡幅值; C 为直流侧电容的电容值; V_{dc} 、 $\hat{V}_{\text{dc_peak}}$ 分别为直流侧母线额定电压和电容电压振荡幅值。根据相关电容器参数要求, 此处取 $\hat{V}_{\text{dc_peak}} = 0.1V_{\text{dc}}$ 。

2.4 有功功率输出

在电压跌落期间, 为了保证逆变器不脱网, 需要提升无功电流大小以支撑 PCC 电压, 所以通常需要进行有功功率削减。本文提出的电压支撑目标是以相电压为目标的, 以相电压为控制目标需要无功电流分量较大将难以实现, 且此时无功功率输出限

制了有功功率输出, 有功功率输出减少会导致瞬时功率不平衡进而影响电网的稳定运行, 因此在考虑电压支撑控制和电流限幅控制的基础上, 还应充分利用逆变器容量输出有功功率。根据瞬时功率理论, 电网电压不平衡下, 逆变器输出的有功功率可以表示为

$$\bar{P} = V^+ I_d^+ + V^- I_d^- \quad (18)$$

3 不对称电压跌落下逆变器的多目标控制策略

第2节提出的4个目标均可以通过设置合适的4个参考电流值实现, 但这些控制目标相互冲突, 提升一个控制目标往往导致另外目标性能恶化, 且单个控制目标的电流参考值也难以直接确定。因此, 有必要设计一种控制策略根据不同场景在多目标之间进行协调, 通过对电流指令进行优化, 得到一种兼顾多目标的控制策略。

3.1 不同电压跌落情况下的控制目标

当电网发生不对称电压跌落时, 多个控制目标相互影响, 并且不同故障类型下故障电流复杂多变, 因此多目标控制下的电流参考值很难直接求解。因此, 为了协调多个控制目标, 本文将电流参考值求解转化为多约束非线性目标函数求解, 同时根据电压跌落情况设置不同优化控制目标。

基于我国新能源发电并网标准, 本文设定了一种电压跌落场景划分标准, 并提出各电压跌落场景下的控制目标。当在新能源并网点发生严重电压跌落时, 应优先发出无功尽可能动态支撑并网点电压, 为系统提供较大的电压支撑。而当发生轻微电压跌落时, 应保证向系统输送最大有功功率的同时对系统提供电压支撑。因此, 将以有功输出为目标同时满足相电压约束有解(具体求解方法见3.2节)定义为轻微电压跌落。反之定义为较大电压跌落; 同时, 当电压跌落较大时需考虑电压不平衡度问题, 当电压不平衡度较小时无需注入负序功率, 本文基于不平衡电压跌落下相电压最大差值判定电压不平衡程度:

$$\Delta V = V_{\max} - V_{\min} \leq V_{\max}^{\text{set}} - V_{\min}^{\text{set}} = 0.25 \text{ p.u.} \quad (19)$$

根据电压偏差标准的相电压差值定义电压不平衡度大小, 当 $\Delta V < 0.25 \text{ p.u.}$ 场景定义为电压不平衡度较小, 反之定义为电压不平衡度较大。根据以上场景定义标准, 可以得到图4所示的场景定义及结果。

基于图4定义的场景情况, 分别提出对应场景下的控制目标。

1) 电压轻微跌落下的控制目标

根据第2节介绍的不平衡电压跌落下的多个控制目标, 其中电压支撑、电流限幅及有功功率振荡

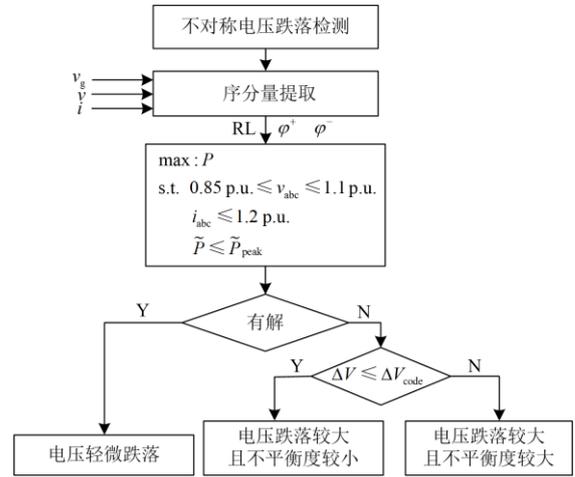


图4 电压跌落场景定义

Fig. 4 Definition of voltage sag scenario

必须满足一定的约束要求, 有功输出在这3个目标的基础上尽可能多地注入, 在定义的轻微电压跌落场景下, 不对称电压跌落下的多目标控制策略可以转化为以最优有功输出为目标, 以相电压、相电流和有功振荡为约束下的多变量优化求解问题, 此时, 不对称电压跌落下的控制目标为

$$\max P = V^+ I_d^+ + V^- I_d^- \quad (20)$$

2) 电压跌落较大且不平衡度较小的控制目标

以有功为目标无解时定义为电压跌落较大, 且电压不平衡水平低于设定的电压不平衡度指标, 应充分提升相电压改善低压穿越能力, 减少逆变器脱网风险。此时, 正序电压对三相电压的提升效果最为明显, 且电压不平衡度较小时, 很少会出现较大相电压越限情况, 因此无需降低负序电压, 且仅注入正序电流可以使得输出三相电流平衡。在此场景下, 应以最大正序电压支撑 $\max V^+$ 为目标。

3) 较大电压跌落且电压不平衡度大的控制目标

在电压跌落程度较大且不平衡度较大的情况下, 仅提升正序电压不能有效支撑相电压, 为了最大程度地提升并网点电压水平, 应尽可能提升正序电压、降低负序电压, 在最大相电压约束、最大相电流及功率振荡约束下实现最优电压支撑效果, 提升在电压不平衡度较大情况下的低压穿越能力, 此时控制目标转化为最大化正负序电压差值, 如式(21)所示。

$$\max \Delta V = V^+ - V^- \quad (21)$$

3.2 基于 Fmincon 函数求解的参考电流计算

由3.1节可以看出, 针对不同电压跌落类型与电压跌落程度, 首先根据电压跌落场景划分结果确定控制目标, 然后在不同控制目标场景下确定电压、电流及功率振荡约束要求。不难理解, 多目标控制

可以通过多约束下求目标函数极值问题求解实现。本文采用 Matlab 中的 Fmincon 优化算法, Fmincon 函数使用内点法对有约束问题进行求解, 可以求解带约束的非线性多变量函数的最小值。通过求解多约束下目标函数极值, 即可得到电流参考指令, 具体流程如图 5 所示。

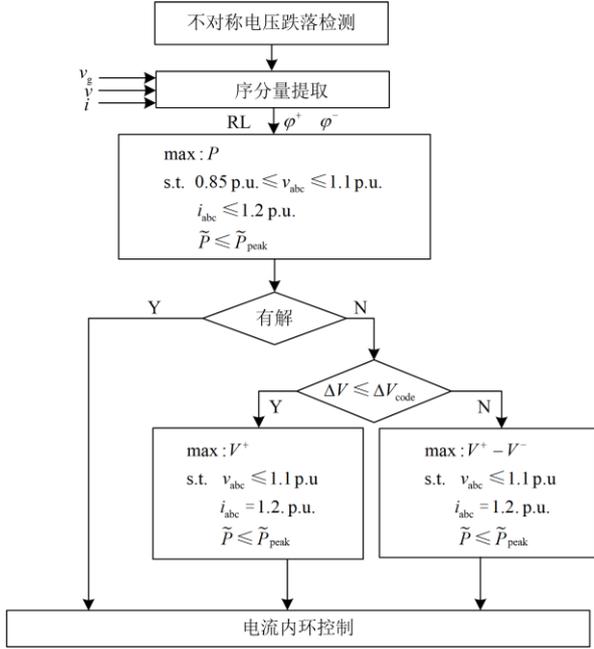


图 5 电流参考值计算流程图

Fig. 5 Flow chart of reference current calculation

采用 Fmincon 函数求解得到实现多控制目标的电流参考值, 具体函数的定义为

$$x = F_{\mincon}(fun, x_0, l_b, u_b, nonlcon) \quad (22)$$

式中: x 的返回值即需求解的 4 个电流指令值的优化结果; fun 是用 M 文件定义的非线性目标函数; x_0 为初始值; l_b 和 u_b 为变量 x 的上界和下界; $nonlcon$ 是用 M 文件定义的非线性向量函数约束。

具体到本文的内容, 式(15)一式(17)为需优化的非线性目标函数, I_d^+ 、 I_d^- 、 I_q^+ 、 I_q^- 表示正负序有功无功电流指令, 根据实际情况, 可将解约束在 0~2 内, 初始值可随机设置为 0~1 的数值, 最后的结果均收敛, 且计算时间约为 0.2 s, 说明该优化算法求解此问题有效。

4 实验验证

为验证在不同电压跌落场景下所提多目标控制策略均能实现协调多个控制目标的优化效果, 基于 Matlab/Simulink 建立如图 1 所示的逆变型新能源并网仿真系统。系统参数设置如表 1 所示。

算例设置在 $t = 0.1 \text{ s}$ 网侧发生不对称电压跌落,

在 0~0.2 s 并网逆变器采用单位功率因数控制, 在 0.2~0.35 s 将逆变器控制策略切换为本文提出的多目标控制策略。为验证本文的多目标控制策略在不同电压跌落场景下的有效性, 设置了表 2 的 3 个仿真算例。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameter setting

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|-------------|------|---------------------|------|
| 逆变器额定容量/kVA | 20 | 额定线电压/V | 400 |
| 额定电流/A | 29 A | 直流电压/V | 1200 |
| 正序比例系数 | 100 | 滤波电感/mH | 10 |
| 正序积分系数 | 0.1 | 滤波电容/ μF | 20 |
| 负序比例系数 | 100 | 线路电感/mH | 4 |
| 负序积分系数 | 0.1 | 线路电阻/ Ω | 0.05 |

表 2 仿真算例设置

Table 2 Simulation scenario setting

| 算例 | $V_g^+ / \text{p.u.}$ | $V_g^- / \text{p.u.}$ | $(\delta_g^+ + \delta_g^-) / (^\circ)$ | 控制目标 |
|----|-----------------------|-----------------------|--|-----------|
| 1 | 0.84 | 0.16 | 3.4 | 最大有功功率输出 |
| 2 | 0.69 | 0.1 | 2.9 | 最大正序电压 |
| 3 | 0.75 | 0.4 | 160 | 最大正负序电压差值 |

4.1 仿真算例设置

当网侧电压发生不对称电压跌落时, 通过将实时量测到的正负序电压幅值和相角代入以有功功率输出控制为目标求解。若有解, 此时设置为算例 1; 若无解, 且正负序电压幅值差低于设定值, 判定电压不平衡度较小, 此时以最大正序电压支撑为目标进行求解, 将此时电压跌落场景设置为算例 2; 以有功输出为目标方程无解, 且正负序电压差值大于设定值, 此时判定电压跌落场景为电压跌落较大且电压不平衡度较大设置为算例 3, 此时以最大化正负序电压差值为控制目标。

从表 2 可以看出: 算例 1 中电压跌落程度相对较小且电压不平衡度较低, 此时三相电压约束在逆变器容量约束下能够满足, 根据上文提出的最大有功功率控制目标方程可以求解电流参考值, 而在算例 2 中电压跌落较深且电压不平衡度较小, 以最大有功输出为控制目标方程无解, 此时控制目标转化为最大电压支撑。在算例 3 中电压跌落程度较大且电压不平衡度较大, 此场景下以最大化正负序电压差为控制目标。基于 Fmincon 函数求解下电流参考值如表 3 所示。

4.2 算例 1: 电压轻微跌落

在 $t = 0.1 \text{ s}$, 网侧母线电压发生轻微不对称电压跌落, a 相电压保持不变, b 相和 c 相跌落至 0.75 p.u.。0.2 s 切换为本文控制策略。

表 3 多目标下求解的电流参考值

Table 3 Reference value of current for multi objectives

| 算例 | I_p^+ | I_p^- | I_q^+ | I_q^- |
|----|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 23.4 | -9.3 | 27.4 | 0.7 |
| 2 | 1.4 | 0 | 35.4 | 0 |
| 3 | 2.3 | -1.7 | 14.9 | 22.3 |

从图 6(a)和图 6(b)可以看出, 在 0.1~0.2 s, 因为仍采用恒功率控制策略, 此时逆变器无电压支撑能力且电流会超过电流限幅要求, 0.2 s 之后可以实现对并网电压的主动支撑, 将三相电压均限制在 0.85~1.1 p.u., 满足设定的电压约束, 同时切换控制策略之后, 满足了电流低于 1.2 p.u. 的约束。从图 6(c)可知, 功率振荡值为 0.18 p.u., 低于约束设定的 0.38 p.u., 在满足所有约束的同时, 此场景下实现了最大有功功率输出为 0.72 p.u.。

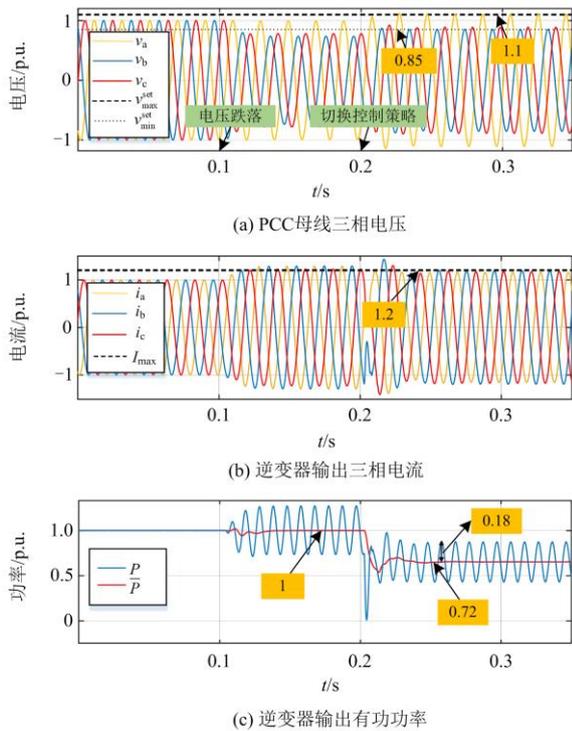


图 6 算例 1 的多目标控制效果

Fig. 6 Multi-objective control effect of Example 1

4.3 算例 2: 电压跌落较大且不平衡度较小

$t = 0.1 \sim 0.35$ s, 电网电压发生较小不平衡电压跌落, 此时 a 相电压跌落至 0.78 p.u., c 相电压跌落至 0.65 p.u. ($V_g^+ = 0.69$ p.u., $V_g^- = 0.1$ p.u.), 将以最大正序电压支撑为目标求解的电流指令输入到电流内环进行控制, 所得到的仿真结果如图 7 所示。

由图 7(a)和图 7(b)可知, 切换为本文提出控制

策略之后, 实现了对正序电压最大化的控制, 其中正序电压从 0.69 p.u. 提升到 0.85 p.u., 负序电压保持不变, 此时电网电压不平衡度从 0.15 降低到 0.12, 三相电压同时提升, a 相电压提升至 0.95 p.u., b、c 相电压从 0.65 p.u. 提升到 0.8 p.u.。从图 7(c)和图 7(d)可知, 在提升电压的同时, 逆变器满足了电流限幅和功率振荡的约束要求, 此时逆变器容量全部用来支撑正序电压, 有功功率的平均值为 0, 与理论分析一致。

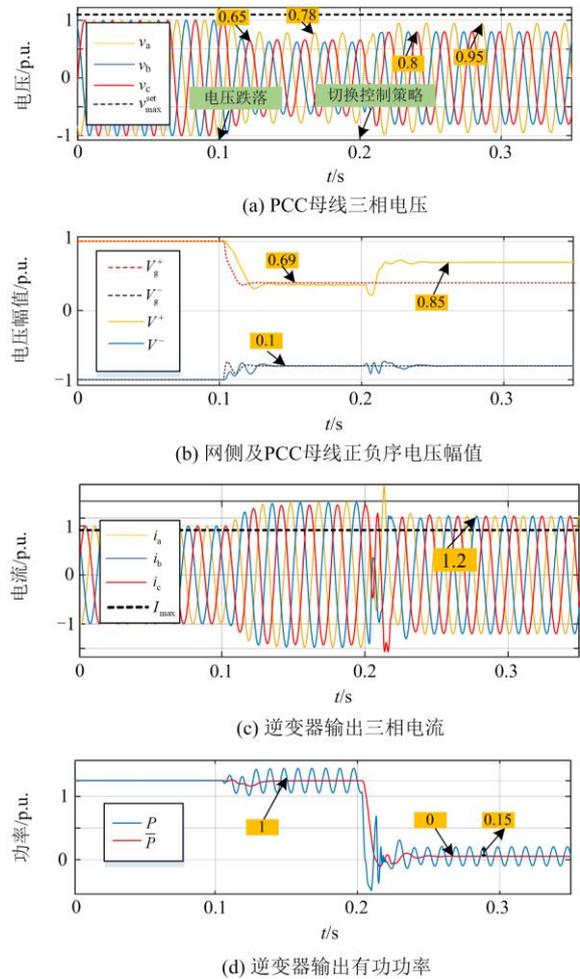


图 7 算例 2 的多目标控制效果

Fig. 7 Multi-objective control effect of Example 2

4.4 算例 3: 电压跌落较大且不平衡度较大

$t = 0.1 \sim 0.35$ s, 电网电压发生较大不平衡电压跌落, 此时 a、b 相电压不变, c 相电压跌落至 0.37 p.u., ($V_g^+ = 0.75$ p.u., $V_g^- = 0.4$ p.u.), 将以最大化正负序电压差为目标求解的电流指令输入到电流内环进行控制, 所得到的仿真结果如图 8 所示。

由图 8(a)和图 8(b)可知, 切换为本文提出控制策略之后, 实现了对正负序电压差值最大化的控制,

其中正序电压从 0.75 p.u. 提升到 0.83 p.u., 负序电压从 0.4 p.u. 降低到 0.28 p.u., 将电网电压不平衡度从 0.53 降低到 0.33, 而此时 a、b 相电压维持在 0.85~1.1 p.u., c 相电压从 0.37 p.u. 提升到 0.58 p.u.。从图 8(c) 和图 8(d) 可知, 在提升电压的同时, 逆变器满足了电流限幅和功率振荡的约束要求, 此时逆变器容量全部用来支撑电压, 有功功率的平均值为 0, 与理论分析一致。

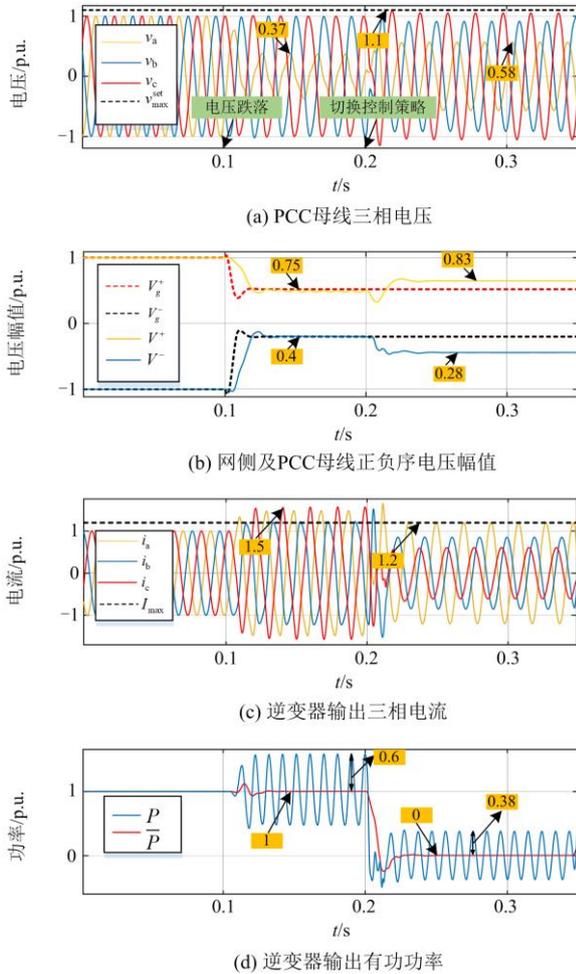


图 8 算例 3 的多目标控制效果

Fig. 8 Multi-objective control effect of Example 3

5 结论

并网逆变器在电网电压不平衡跌落下要考虑有功功率输出、电压支撑控制目标, 且满足电流限幅、有功功率振荡等约束, 但多个目标之间相互制约、缺乏协调。本文基于对多个控制目标进行量化推导, 提出一种考虑电压跌落场景的改进控制策略, 有效地协调了多个控制目标, 提升了逆变器在不平衡电压跌落下的运行稳定性。具体而言, 本文提出方法有以下优点:

1) 所提出的正负序电压控制方程考虑了电网阻抗特性, 实现了在不同线路参数下对正负序电压的最优支撑, 保证了对相电压的灵活控制。

2) 利用 Fmincon 函数求解, 确定了在不同电压跌落场景下的优化控制目标, 充分利用逆变器容量实现最大有功功率输出和最优电压支撑的控制目标。

3) 本文的控制策略实现了多目标下地快速协调, 在不同电压跌落情况下, 均满足电流限幅和有功功率振荡约束要求, 有效降低了并网逆变器的切机风险。

参考文献

[1] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
 ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.

[2] 熊浩, 杜雄, 孙鹏菊, 等. 三相并网变流器在电网不对称故障时的有功功率安全运行区域[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(20): 6110-6118.
 XIONG Hao, DU Xiong, SUN Pengju, et al. Active power safe operation region of three-phase grid-connected voltage source converter under unbalanced grid faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(20): 6110-6118.

[3] EHSAN A, GHOLAM R M, RAMIN R, et al. Control strategy for three-phase grid-connected PV inverters enabling current limitation under unbalanced faults[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(11): 8908-8918.

[4] 谭爱国, 吴颖颖, 王传启, 等. 基于保障低压穿越能力的风电机组撬棒自适应投切策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 98-109.
 TAN Aiguo, WU Yingying, WANG Chuanqi, et al. Adaptive switching strategy for a wind turbine crowbar based on the guarantee of low voltage ride-through capability[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 98-109.

[5] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于限流器与断路器协调的混合直流输电系统故障隔离方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 119-127.
 CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Fault isolation method of a hybrid HVDC system based on the coordination of a fault current limiter and a DC circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 119-127.

[6] CAMACHO A, CASTILLA M, MIRET J, et al. Flexible voltage support control for three-phase distributed generation inverters under grid fault[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1429-1441.

- [7] 欧阳森, 马文杰. 考虑电压故障类型的光伏逆变器低电压穿越控制策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 21-26.
OUYANG Sen, MA Wenjie. Low voltage ride through control strategy of photovoltaic inverter considering voltage fault type[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 21-26.
- [8] CAMACHO A, CASTILLA M, MIRET J, et al. Active and reactive power strategies with peak current limitation for distributed generation inverters during unbalanced grid faults[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(3): 1515-1525.
- [9] 陈琪蕾, 范忻蓉, 张沛超, 等. 逆变型分布式电源的灵活正负序电流控制方法与等值序网模型[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 57-62.
CHEN Qilei, FAN Xinrong, ZHANG Peichao, et al. Flexible positive and negative sequence current control method and equivalent sequence network model for inverting distributed power supply[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 57-62.
- [10] MOHAMED N, AHMED E, TAMOUS N. Improving low-voltage ride-through capability of a multimegawatt DFIG based wind turbine under grid faults[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(4): 370-382.
- [11] CAMACHO A, CASTILLA M, MIRET J, et al. Maximizing positive sequence voltage support in inductive-resistive grids for distributed generation inverters during voltage sags[C] // IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 23-26, 2016, Florence, Italy: 2343-2348.
- [12] CAMACHO A, CASTILLA M, MIRET J, et al. Positive and negative sequence control strategies to maximize the voltage support in resistive-inductive grids during grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(6): 5362-5373.
- [13] SHABESTARY M M, MOHAMED Y A I. Asymmetrical ride-through and grid support in converter-interfaced DG units under unbalanced conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1130-1141.
- [14] 李智轩, 何晋, 李维希, 等. 不对称故障下的 IIDG 改进功率控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(3): 83-90, 99.
LI Zhixuan, HE Jin, LI Weixi, et al. Improved power control strategy for IIDG under asymmetric faults[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(3): 83-90, 99.
- [15] CAMACHO A, CASTILLA M, MIRET J, et al. Reactive power control for distributed generation power plants to comply with voltage limits during grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 6224-6234.
- [16] SOSA J L, CASTILLA M, MIRET J, et al. Control strategy to maximize the power capability of PV three-phase inverters during voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(4): 3314-3323.
- [17] LÓPEZ M A G, DE VICUÑA J L G, MIRET J, et al. Control strategy for grid-connected three-phase inverters during voltage sags to meet grid codes and to maximize power delivery capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9360-9374.
- [18] SHABESTARY M M, MOHAMED Y A I. Advanced voltage support and active power flow control in grid-connected converters under unbalanced conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 1855-1864.
- [19] MIRET J, CAMACHO A, CASTILLA M, et al. Control scheme with voltage support capability for distributed generation inverters under voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(11): 5252-5262.
- [20] 李欣悦, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 1-8.
LI Xinyue, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Transient overvoltage calculation method of HVDC sending-end system under DC bipolar blocking[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 1-8.
- [21] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 63-72.
ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.
- [22] CHEN H C, LEE C T, CHENG P T, et al. A low-voltage ride-through technique for grid-connected converters with reduced power transistors stress[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(12): 8562-8571.

收稿日期: 2021-12-05; 修回日期: 2022-04-24

作者简介:

季亮(1985—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: jihome2002@sina.cn

郭佳龙(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为逆变型分布式电源故障控制; E-mail: 18800206539@163.com.

李博通(1981—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护、高压直流输电控制保护技术。E-mail: libotong@tju.edu.cn

(编辑 姜新丽)