

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.04.003

# 基于改进负序电压外环的 SOP 不对称故障电压支撑方案

王旭泽<sup>1</sup>, 陈武<sup>1</sup>, 赵海熙<sup>1</sup>, 陈实<sup>2</sup>

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:** 柔性软开关 (soft open point, SOP) 能够实现配电网的柔性互联与潮流的动态调节, 从而优化配电资源的配置与调度。换流器可以在故障时输出正负序电流来提供电压支撑并提高自身的故障穿越能力, 从而改善不对称接地故障的负序电压。然而采用开环计算的方案易受实际工况影响, 采用传统负序电压闭环的支撑效果较差。因此文中在传统负序电压外环的基础上进行改进, 控制负序电流的幅值以抑制负序电压, 控制负序电流的相位以优化抑制效果。为提高逆变器容量利用率并限制有功波动, 文中提出正负序电流限幅的综合方案, 并通过 PSCAD 仿真软件依据实际配电网参数搭建短路工况进行仿真。结果验证该控制策略可以有效改善故障时的电压表现, 提高逆变器低压穿越能力, 具有更高的实际可应用性。

**关键词:** 不对称接地故障; 柔性软开关 (SOP); 正负序电压支撑; 电压外环; 线路阻抗比; 有功波动限制

**中图分类号:** TM464

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2025)04-0023-10

## 0 引言

在“双碳”背景下, 风能、太阳能等可再生能源比重快速提高<sup>[1-2]</sup>。虽然分布式能源接入可以节省成本、降低损耗, 但其自身的随机性和波动性会给系统运行、电网规划以及设备设计带来巨大挑战<sup>[3-5]</sup>。以背靠背电压源换流器 (back to back voltage source converter, BTB-VSC) 为主<sup>[6-7]</sup>的柔性软开关 (soft open point, SOP) 可实现配电网柔性互联和潮流灵活调节, 在更大范围内实现可调资源的优化配置, 提高新能源渗透率<sup>[8-10]</sup>。SOP 取代配电网末端节点之间传统的机械开关, 不仅可以实现传统机械开关通断的功能, 还可以在故障阶段发出无功功率以实现公共连接点 (point of common coupling, PCC) 电压的支撑<sup>[11-13]</sup>。

针对换流器的支撑能力, 文献<sup>[14-15]</sup>基于瞬时无功功率理论对不平衡电网电压下的逆变器常用控制方式进行分析。基于正负序控制技术的电压支撑策略能提升电网正序电压, 同时降低负序电压。文献<sup>[16-17]</sup>为实现故障工况下对电网正序电压的支撑以及负序电压的抑制, 通过优化计算引入电流调节系数, 从而控制逆变器注入无功电流的正序分量与负序分量, 但未考虑该策略带来的有功波动问题。逆变器交流侧有功功率波动过高将会直接体现在母线电容上, 导致电容电压越限, 最终降低交

流侧电能质量。因此, 文献<sup>[18-21]</sup>考虑将有功波动限制在一定范围内, 以电压幅值为优化目标, 统筹考虑各种约束条件, 更加灵活地分配无功电流的负序分量与正序分量, 从而使电网电压得到更为有效与安全的支撑, 但是负序电压较高时仍存在缺陷。文献<sup>[22-23]</sup>针对不同类型的电网接地故障分别进行优化计算, 得到各种故障下的最优电流分配。上述文献为简化优化过程, 均考虑纯无功的支撑电流, 但柔性互联装置一般处于中低压配电网末端, 线路阻抗较大, 此时纯无功的补偿效果较差, 因此文献<sup>[24]</sup>在计及线路阻抗比的基础上进行正负序电流优化, 改善补偿效果。

已有文献的电压支撑策略普遍通过检测故障母线电压配合线路阻抗开环计算正负序无功电流的大小<sup>[18-26]</sup>, 再对电流进行闭环控制, 开环优化过程冗杂, 优化结果容易受实际工况影响。因此, 文献<sup>[27]</sup>使用正负序电压电流迭代的控制方式实现故障时的最优支撑效果, 与电压闭环效果类似, 在故障恢复后依然可以稳定运行, 负序电流经过求解网络方程迭代可以衰减至 0, 但未考虑直流电压波动。而负序电压闭环控制<sup>[28]</sup>多用于均衡不平衡负载<sup>[29]</sup>与均衡发电分区不平衡发电<sup>[30]</sup>等可以完全补偿负序电压的场景。配电网短路故障时, 传统负序电压闭环由于容量限制无法完全补偿故障电压, 最终电流稳定在比例积分器饱和点, 电压改善效果差, 所以一般不用于故障电压支撑。

针对传统负序电压闭环的缺点, 文中基于改善支撑效果, 首先介绍中高压配电网换流器对正负序

收稿日期: 2025-01-02; 修回日期: 2025-04-10

基金项目: 国家重点研发计划资助项目“配电网高功率密度柔性互联技术和装备”(2023YFB2407400)

电压的支撑原理,分析传统负序电压闭环不适用于故障电压支撑的原因;然后提出改进电压闭环,并配备对应的正序支撑方案,同时根据容量限制与功率波动限制设计电流限幅策略;最后以实际配电网系统与 SOP 工程为例进行仿真与实验,验证所提控制策略下 SOP 对并网点电压的支撑效果。

## 1 不对称故障时电压支撑原理分析

### 1.1 不对称故障电压等效电路

图 1 为含 SOP 的配电网馈线故障示意。图 1(a)中馈线 1 与馈线 2 通过 BTB-VSC 在末端互联,馈线 1 的  $f$  点处发生不对称故障时,BTB-VSC 在故障穿越的同时发出无功功率支撑 PCC 电压。

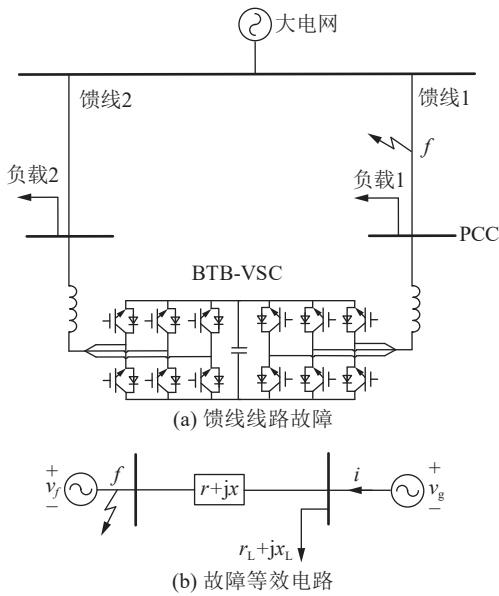


图 1 含 SOP 配电网馈线故障分析  
Fig.1 Fault analysis of distribution network feeder with SOP

如图 1(b)所示,当馈线 1 发生短路故障时,记  $f$  点的故障电压为  $v_f$ ;PCC 电压为  $v_g$ ;VSC 等效为电流源,其输出电流为  $i$ ;  $r+jx$  为 SOP 与短路点间的等效阻抗;  $r_L+jx_L$  为线路负荷等效阻抗。

$r_L+jx_L \gg r+jx$ , 因此 PCC 电压满足:

$$v_g \approx v_f + (r+jx)i \quad (1)$$

若线路阻抗满足电阻  $r$  远小于电抗  $x$ ,且此时 SOP 输出纯无功电流,则输出电流满足:

$$i = jI_Q \quad (2)$$

式中:  $I_Q$  为 SOP 输出电流中无功分量的大小。

则式(1)可以简化为:

$$V_g \approx V_f + jx(jI_Q) = V_f - xI_Q \quad (3)$$

式中:  $V_g$ 、 $V_f$  分别为 PCC 与故障点电压幅值。

当  $f$  点发生不对称故障时,使用对称分量法将电路等效为正序和负序电路叠加。其中正、负序电

抗  $x^+$ 、 $x^-$  满足:

$$x^+ = x^- = x \quad (4)$$

所以式(3)变为:

$$\begin{cases} V_g^+ \approx V_f^+ - xI_Q^+ \\ V_g^- \approx V_f^- - xI_Q^- \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $V_g^+$ 、 $V_g^-$  分别为 PCC 正、负序电压幅值;  $V_f^+$ 、 $V_f^-$  分别为故障点正、负序电压幅值;  $I_Q^+$ 、 $I_Q^-$  分别为正、负序无功电流的大小。

由式(5)可知,  $V_f^+$  标幺值小于 1 时,若 VSC 输出正序无功功率,即  $I_Q^+ < 0$ ,则可以对 PCC 正序电压  $V_g^+$  进行支撑;  $V_f^-$  标幺值大于 0 时,其存在会导致单相电压过高或过低,若此时 VSC 吸收负序无功功率,即  $I_Q^- > 0$ ,则可以对 PCC 负序电压  $V_g^-$  进行抑制。

但上述分析只建立在高感性的电网环境中(须满足  $r \ll x$ ),而 VSC 装置多安装在馈线末端,在中低压配电网与新能源电网中,由于线路的阻抗比较大,纯无功功率对于高阻性线路的电压支撑效果较差。

为了在高阻性配电网中一定的电流容量  $I$  下实现最优的支撑效果,基于此优化问题进行分析,设置以下约束条件:

$$\begin{cases} i = I_p + jI_Q \\ I^2 = I_p^2 + I_Q^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $I_p$  为 SOP 输出电流中有功分量的大小;  $I$  为 SOP 输出电流幅值。

此时  $v_g$  与  $v_f$  之间满足以下关系,即优化目标:

$$\begin{cases} v_g = v_f + (r+jx)(I_p + jI_Q) \\ |v_g|^2 = (V_f + rI_p - xI_Q)^2 + (xI_p + rI_Q)^2 \end{cases} \quad (7)$$

使用拉格朗日乘数法解决此最优问题:

$$\begin{cases} f(|v_g|^2, \lambda) = (V_f + rI_p - xI_Q)^2 + (xI_p + rI_Q)^2 + \lambda(I^2 - I_p^2 - I_Q^2) \\ \frac{\partial f}{\partial \lambda} = I^2 - I_p^2 - I_Q^2 = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial I_p} = 2I_p(r^2 + x^2 - \lambda) + 2rV_f = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial I_Q} = 2I_Q(r^2 + x^2 - \lambda) - 2xV_f = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\lambda$  为拉格朗日乘子。

由式(8)得到 VSC 输出的正负序有功电流与无功电流,当其满足式(9)所示关系时,正序电流对正序电压的支撑能力最强,负序电流对负序电压的抑制能力也最强。

$$\begin{cases} i_d^+ = -\frac{r}{x}i_q^+ = -k_{r/x}i_q^+ > 0 \\ i_p^- = -\frac{r}{x}i_q^- = -k_{r/x}i_q^- < 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $i_d^+$  为正序有功电流;  $i_q^+$  为正序无功电流;  $i_p^-$  为负序有功电流;  $i_q^-$  为负序无功电流;  $k_{r/x}$  为线路阻抗比。

因此下文提出的支撑方案需要满足式(9)以优化故障电压的支撑效果。

## 1.2 不对称故障时负序电压外环控制分析

图2为正负序电压电流控制。其中,  $L_g$  为滤波电感;  $i_g$  为 PCC 电流;  $v_{abc}^+$ 、 $v_{abc}^-$  分别为正序、负序调制电压;  $\omega$  为角频率; PI 为比例积分调节器; PWM 为脉冲宽度调制。首先采用基于双二阶广义积分器的三相锁相环(double second-order general integrator-phase locked loop, DSOGI-PLL)对正序电压锁相得到相位  $\theta$ , 由于最终需要抑制负序电压, 采用负序电压锁相并不可靠, 所以控制中负序电压的相位采用  $-\theta$ 。然后经过正负序  $dq$  轴变化得到电压电流  $dq$  轴分量  $v_{gdq}^+$ 、 $v_{gdq}^-$ 、 $i_{gdq}^+$ 、 $i_{gdq}^-$ , 通过正序电压/功率外环得到正序电流的参考值  $i_{dqref}^+$ , 从而实现对正序电压的支撑, 通过负序电压外环得到负序电流的参考值  $i_{dqref}^-$ , 从而实现对负序电压的抑制。

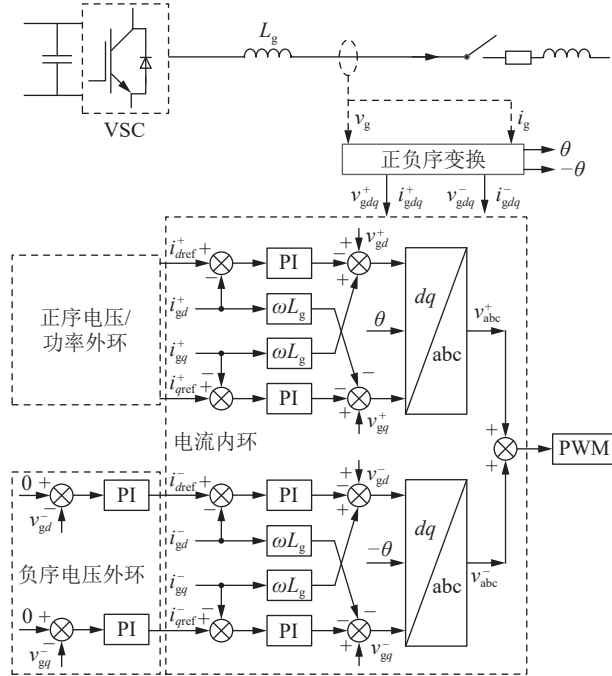


图2 正负序电压电流控制

Fig.2 Positive and negative sequence voltage and current control

图3为传统负序电压外环。虽然该控制方式可以抑制负序电压, 但故障工况下由于 SOP 容量限制, 无法完全抑制, 电压外环的输出值为电压环 PI 调节器的饱和值或限幅值。一方面该控制由于正序和负序电流相位差不确定难以根据器件容量与正序电流幅值对负序电流进行限幅; 另一方面  $i_{gd}^-$ 、 $i_{gq}^-$  并非负序有功与无功电流, 经积分器饱和值

限幅时, 负序有功/无功电流相位难以满足式(9), 因此可在负序电压控制中对负序电流相位进行独立控制。

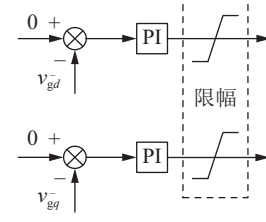


图3 传统负序电压外环

Fig.3 Traditional negative sequence voltage outer loop

## 2 不对称故障时电压支撑方案

### 2.1 负序电压抑制

文中提出的负序电压抑制控制如图4所示。其中,  $i_m^-$ 、 $\varphi$  分别为 SOP 输出负序电流的参考幅值和相位;  $P_{max}^-$  为负序电压抑制可以利用的最大有功功率;  $P_{ref}^-$  为 SOP 输出负序参考有功功率;  $P^-$ 、 $Q^-$  分别为 SOP 输出负序有功和无功功率。

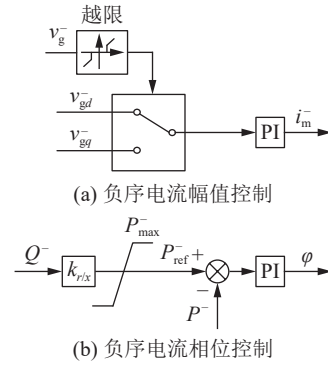


图4 负序电压抑制控制

Fig.4 Negative sequence voltage suppression control

将传统的负序电压外环变为负序电流的相位控制与幅值控制。其中相位控制调整负序电流的相位, 根据线路阻抗比分配负序平均有功与无功功率, 幅值控制增加负序电流的幅值以抑制负序电压。

对于正序电压幅值  $V_g^+$  来说, 正序电压环需要控制其稳定在 1 p.u., 所以其直接使用  $V_g^+$  作为幅值控制的输入。

而负序电压幅值  $V_g^-$  需要被抑制, 所以希望的稳定点在 0 p.u., 而  $V_g^-$  作为幅值始终大于等于 0 p.u., 导致负序电流幅值始终增大,  $V_g^-$  反向增大, 同时导致相位控制反向, 最后  $V_g^-$  在 0 p.u. 发生振荡, 同时振荡加剧直至失稳。

图4(a)中, 检测到线路故障(负序电压  $v_g^-$  越限)时, 比较负序电压的  $dq$  轴分量大小, 选择  $v_{gd}^-$  和  $v_{gq}^-$  中绝对值较大的那一项作为幅值控制的输入, 经过

PI 调节器得到负序电流参考幅值  $i_m^-$ 。图 5 为负序控制分析, 其中  $\varphi^+$  为正序电流参考相位。如图 5(a) 所示, 根据  $v_{gd}^-$  和  $v_{gq}^-$  比较结果将负序坐标系分为 4 个区域, 负序电压  $v_g^-$  在 I / III 区时, 幅值控制 PI 调节器的输入为  $v_{gq}^-$ ; 负序电压  $v_g^-$  在 II / IV 区时, 幅值控制 PI 调节器的输入为  $v_{gd}^-$ 。

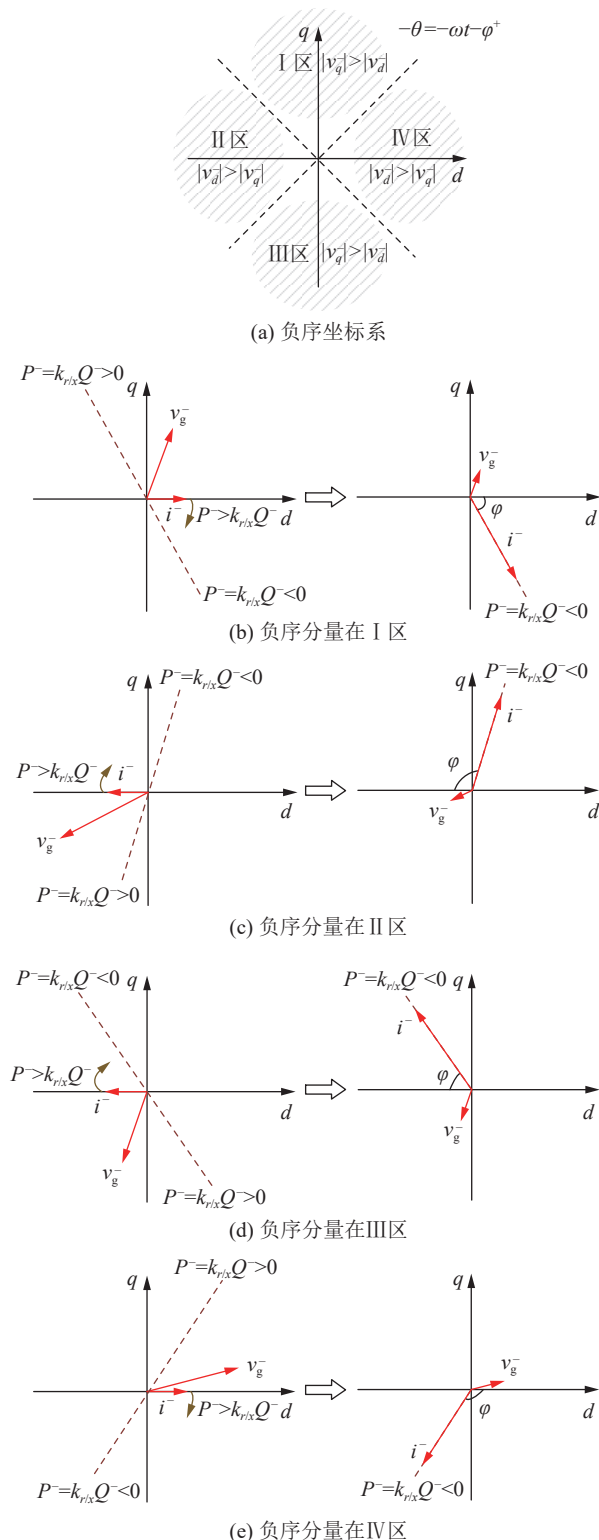


图 5 负序控制分析

Fig.5 Negative sequence control analysis

图 4(b) 中, 相位控制的目标是负序参考有功功率  $P_{ref}^-$  与无功功率  $Q^-$  满足以下关系:

$$P_{ref}^- = \begin{cases} k_{r/x} Q^- & k_{r/x} Q^- \leq P_{max}^- \\ P_{max}^- & k_{r/x} Q^- > P_{max}^- \end{cases} \quad (10)$$

若  $P^- < k_{r/x} Q^-$ , SOP 的输出负序电流  $i^-$  逆时针旋转直至  $P^- = k_{r/x} Q^-$ ; 若  $P^- > k_{r/x} Q^-$ ,  $i^-$  顺时针旋转直至  $P^- = k_{r/x} Q^-$ 。

如图 5(b) 所示, 负序电压  $v_g^-$  在 I 区时, “负序电流幅值控制”使用  $q$  轴分量  $v_{gq}^-$  (正值) 作为输入量, 所以电流参考幅值  $i_m^-$  为正值 (初始位置在  $d$  轴正方向) 且幅值增加; 由于  $P^- > k_{r/x} Q^-$ , “负序电流相位控制”为分配有功无功, 使负序电流  $i^-$  顺时针旋转, 直至  $P^- = k_{r/x} Q^- < 0$ , 最终实现对负序电压的抑制功能。

如图 5(c) 所示, 负序电压  $v_g^-$  在 II 区时, “负序电流幅值控制”使用  $d$  轴分量  $v_{gd}^-$  (负值) 作为输入量, 电流参考幅值  $i_m^-$  为负值 (初始位置在  $d$  轴负方向) 且幅值增加; 由于  $P^- > k_{r/x} Q^-$ , “负序电流相位控制”为分配有功无功, 使负序电流  $i^-$  顺时针旋转, 直至  $P^- = k_{r/x} Q^- < 0$ , 最终实现对负序电压的抑制功能。

如图 5(d) 所示, 负序电压  $v_g^-$  在 III 区时, “负序电流幅值控制”使用  $q$  轴分量  $v_{gq}^-$  (负值) 作为输入量, 电流参考幅值  $i_m^-$  为负值 (初始位置在  $d$  轴负方向) 且幅值增加; 由于  $P^- > k_{r/x} Q^-$ , “负序电流相位控制”为分配有功无功, 使负序电流  $i^-$  顺时针旋转, 直至  $P^- = k_{r/x} Q^- < 0$ , 最终实现对负序电压的抑制功能。

如图 5(e) 所示, 负序电压  $v_g^-$  在 IV 区时, “负序电流幅值控制”使用  $d$  轴分量  $v_{gd}^-$  (正值) 作为输入量, 电流参考幅值  $i_m^-$  为正值 (初始位置在  $d$  轴负方向) 且幅值增加; 由于  $P^- > k_{r/x} Q^-$ , “负序电流相位控制”为分配有功无功使负序电流  $i^-$  顺时针旋转, 直至  $P^- = k_{r/x} Q^- < 0$ , 最终实现对负序电压的抑制功能。

## 2.2 正序电压支撑

传统控制中一般通过控制正序无功电流来支撑电压, 文中沿用此方案, 并输出一定的有功功率来优化其支撑效果。图 6 为正序电压支撑方案。其中,  $P_{max}$  为 SOP 故障侧可以利用的最大有功功率;  $v_{gabc,max}$  为交流侧三相电压有效值的最大值;  $P_{ref}^+$  为 SOP 输出正序参考有功功率;  $P^+$ 、 $Q^+$  分别为 SOP 输出正序有功和无功功率;  $v_{gref}$  为网侧交流电压参考值。

为了不影响非故障侧稳定运行, 正序参考有功功率  $P_{ref}^+$  与无功功率  $Q^+$  满足以下关系:

$$P_{ref}^+ = \begin{cases} k_{r/x} Q^+ & k_{r/x} Q^+ \leq P_{max}^+ \\ P_{max}^+ & k_{r/x} Q^+ > P_{max}^+ \end{cases} \quad (11)$$

为支撑正序电压同时避免单相电压过高, 采用

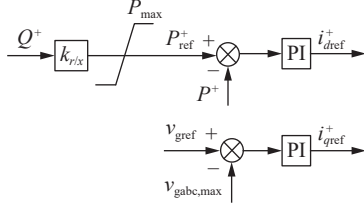


图6 正序电压支撑控制

Fig.6 Positive sequence voltage support control

$v_{gabc,max}$  作为比例积分器输入, 由此输出正序无功参考电流  $i_{qref}^+$ ; 此外为实现正序电压的最优支撑, 分配正序有功与无功功率, 从而得到正序有功参考电流  $i_{dref}^+$ 。

正序电压支撑方案提高三相电压幅值, 同时负序电压抑制方案增加最低相电压, 减小最高相电压, 让三相电压趋于平等。这 2 种控制方式协调的最理想情况为负序电压被完全抑制, 三相电压相等且对称, 正序电压被支撑到额定电压, 电压波形与故障前一致。

考虑到最低相电压支撑到额定电压需要最多的无功相电流, 但由于电流容量的限制, 最低相电压往往无法完全支撑, 此时正序与负序的控制方案需要完全利用设备与线路的容量, 让最低相电压尽可能提高, 为此需要相对应的电流限幅方案。

### 2.3 电流限幅方案

在控制过程中, 电流的限幅主要考虑来自器件容量的限制和有功功率波动导致的直流母线电压波动。

#### 2.3.1 正序电流限幅

正序控制的电流限幅中不考虑此时负序电流的大小, 首先正序电流参考幅值  $i_m^+$  需要小于单相电流限幅值  $I_m$ 。其次由瞬时功率理论可知, 有功功率交流量  $\Delta P$  与正负序电压电流之间的关系为:

$$\Delta P = \frac{3}{2} \sqrt{(V_g^-)^2 (i_m^+)^2 + (V_g^+)^2 (i_m^-)^2} \quad (12)$$

此时不考虑负序电流, 式(12)变为:

$$\Delta P = \frac{3}{2} V_g^- i_m^+ \quad (13)$$

而有功功率波动的限制<sup>[24]</sup>由式(14)决定。

$$\Delta P = 2\omega C_{dc} \Delta U_{dc} U_{dc} \quad (14)$$

式中:  $U_{dc}$  为直流母线电压;  $C_{dc}$  为母线电容;  $\Delta U_{dc}$  为直流侧母线电压波动限制(一般为  $U_{dc}$  的 1%)。

根据式(13)、式(14)得到正序电流限幅值  $I_m^+$  为:

$$I_m^+ = \frac{4\omega C_{dc} \Delta U_{dc} U_{dc}}{3V_g^-} \quad (15)$$

#### 2.3.2 负序电流限幅

首先正序和负序电流叠加而成的三相电流中最高相电流需要小于单相电流限幅值, 此时 VSC 输

出的正序电流参考幅值为  $i_m^+$ , 相位为  $\varphi^+$ , 而输出的负序电流相位为  $\varphi$ , 所以此时正负序电流的相位差  $\phi$  为:

$$\phi = \varphi - \varphi^+ \quad (16)$$

从而可以得到 abc 正负序电流的三相相位差分别为  $\phi$ 、 $\phi+120^\circ$ 、 $\phi-120^\circ$ 。为了正序和负序叠加后三相电流小于单相电流限幅值  $I_m$ , 正负序电流幅值  $i_m^+$ 、 $i_m^-$  需要满足:

$$\begin{cases} (i_m^+)^2 + (i_m^-)^2 + 2i_m^+ i_m^- \cos \phi \leq I_m^2 \\ (i_m^+)^2 + (i_m^-)^2 + 2i_m^+ i_m^- \cos(\phi + 120^\circ) \leq I_m^2 \\ (i_m^+)^2 + (i_m^-)^2 + 2i_m^+ i_m^- \cos(\phi - 120^\circ) \leq I_m^2 \end{cases} \quad (17)$$

为了简化式(17), 记参数  $k$  满足:

$$k = \max \{ \cos \phi, \cos(\phi + 120^\circ), \cos(\phi - 120^\circ) \} \quad (18)$$

所以式(17)变为:

$$(i_m^+)^2 + (i_m^-)^2 + 2ki_m^+ i_m^- \leq I_m^2 \quad (19)$$

从而得到负序电流的容量限幅值  $I_{m1}$ :

$$I_{m1} = \sqrt{I_m^2 - (1-k^2)(i_m^+)^2} - ki_m^+ \quad (20)$$

进一步地, 为了防止故障期间直流电压波动过大, 根据式(12)进行第二次负序电流限幅, 得到负序电流的功率波动限幅值  $I_{m2}$ :

$$I_{m2} = \frac{\sqrt{\left(\frac{2}{3}\Delta P\right)^2 - (v_g^-)^2 (i_m^+)^2}}{v_g^+} \quad (21)$$

经过此两重限幅可得到最终动态限幅值  $I_m^-$ :

$$I_m^- = \min \{ I_{m1}, I_{m2} \} \quad (22)$$

抬升 PCC 正序电压能够显著提升 SOP 的低电压穿越能力<sup>[30]</sup>, 因此文中方案正序电压支撑的优先级大于负序电压抑制, 所以在限幅过程中, 优先对正序电流限幅, 只有在正序控制的最高相电压达到额定值后电流还有剩余容量时, 才会考虑负序电压的抑制。

采用上述限幅策略, 可以在器件容量与功率波动限制内尽可能支撑正序电压, 抑制负序电压, 提升 SOP 的低电压穿越能力, 改善电压波形。

## 3 仿真分析

图7为文中所提故障电压支撑方案的整体控制框图, 通过改进负序电压外环生成负序电流参考值, 通过正序电压外环生成正序电流参考值, 通过限幅环节对正负序电流限幅以充分利用电流容量, 最后通过电流内环控制输出电流。

中压配电网故障时, SOP 故障穿越时间要小于重合闸时间, 防止瞬时性故障电弧重燃。高压配电网(110 kV)故障时, 若为区内故障, 故障穿越时间

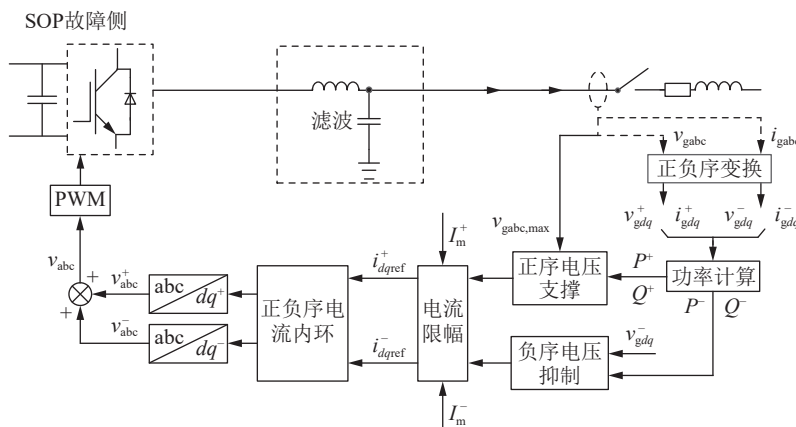


图7 不对称故障电压支撑控制框图

Fig.7 Control block diagram of asymmetrical fault voltage support

仍需要与重合闸时间配合,防止瞬时性故障电弧重燃;永久性故障下,柔性互联装置闭锁;若为区外故障,柔性互联装置首先进行故障穿越,然后转换成  $V_f$  模式。

所以文中方法及仿真时序适用于高压配电网区外故障,在 PSCAD 中搭建图 8 所示配电网中压柔性互联系统,该系统由 110 kV 分区与 10 kV 分区构成,每个分区各有 2 条线路,配电网线路参数如表 1 所示,柔性互联参数如表 2 所示。柔性互联设备位于 10 kV 线路中端,BTB-VSC 通过滤波器与隔离变压器与大电网连接,PCC 电压取隔离变压器星形侧电压,逆变器输出电流  $I_m$  最大允许值取 1.2 p.u.(600 A),10 kV 线路阻抗比为 0.52,控制中正常工况下两线路解列运行,线路 1 带负载 2 MW,线路 2 带负载 5 MW,线路 1 通过 SOP 向线路 2 转供 2 MW。

仿真中不对称工况主要考虑高压配电网区外故障,即 110 kV 线路 A 相接地短路和 BC 相间短路。

### 3.1 110 kV 线路单相短路故障工况仿真波形

2 s 时,图 8 中 110 kV 线路 1 中点  $f_1$  处发生 A 相短路故障,经过 5 个周期(0.1 s)后切换至  $V_f$  模式。在故障穿越期间使用 VSC 进行电压支撑,分析 PCC 电压波形改善情况,如图 9 所示。

图 9(a)为 VSC 不参与故障支撑时 PCC 的电压电流波形。在 2 s 前为 PQ 控制,在 2 s 时线路故障,PCC 三相电压均发生不同程度跌落,其中 A 相跌落最为严重。在 2.1 s 时快速转供,SOP 切换至  $V_f$  模式。

图 9(b)为使用文中电压支撑策略的电压电流波形,在 2 s 前为 PQ 控制,2 s—2.1 s 使用文中电压支撑策略,SOP 输出正负序电流,抬升最高相电压(C 相)至 1 p.u.。

图 9(c)为使用传统负序电压闭环的电压电流波形,在 2 s 前为 PQ 控制,在 2 s—2.1 s 使用传统负序电压闭环,此时负序电流难以根据正序电流幅值动态限幅,故根据  $I_m = I_m - I_m$  限幅,抬升最高相电压

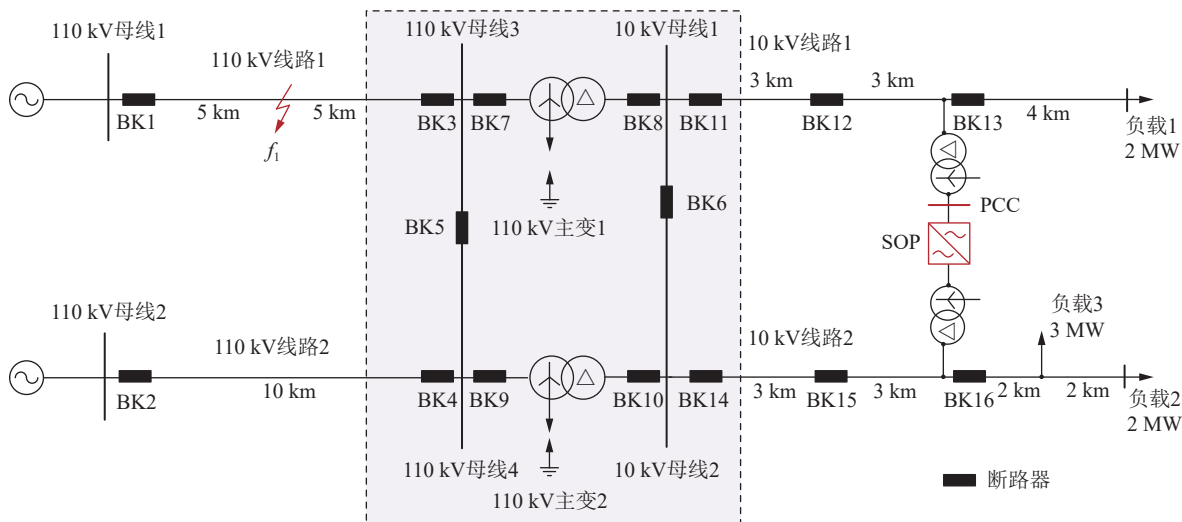


图8 配电网中压柔性互联系统拓扑

Fig.8 Topology of the medium voltage flexible interconnection system in the distribution network

表 1 110 kV 与 10 kV 线路参数  
Table 1 Parameters of 110 kV and 10 kV lines

| 参数                                     | 110 kV线路    | 10 kV线路      |
|----------------------------------------|-------------|--------------|
| 正序阻抗/( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ ) | 0.342+j0.81 | 0.344+j0.65  |
| 正序电容/(nF·km <sup>-1</sup> )            | 7.96        | 7.92         |
| 零序阻抗/( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ ) | 0.51+j1.207 | 0.322+j1.147 |
| 零序电容/(nF·km <sup>-1</sup> )            | 11.35       | 12.68        |

表 2 柔性互联设备仿真参数  
Table 2 Simulation parameters of flexible interconnection system

| 参数         | 数值 | 参数                  | 数值 |
|------------|----|---------------------|----|
| 交流侧额定电压/kV | 10 | 滤波电容/ $\mu\text{F}$ | 8  |
| 额定功率/MW    | 6  | 直流侧电压/kV            | 20 |
| 滤波电感/mH    | 6  | 直流电容/mF             | 5  |

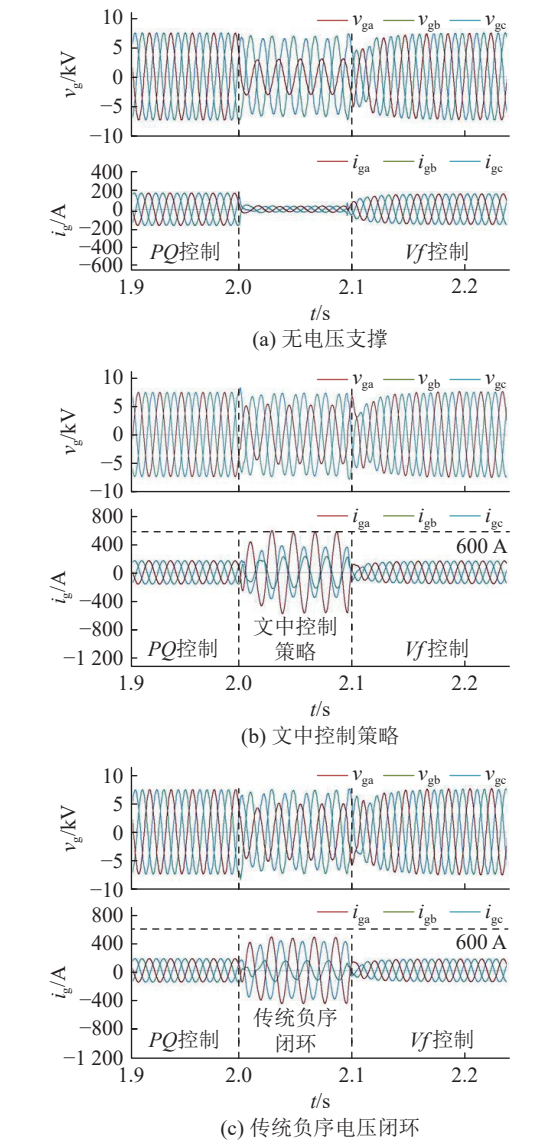


图 9 110 kV 单相短路 PCC 电压电流波形  
Fig.9 PCC voltage and current waveforms under 110 kV single-phase short-circuit  
(B 相)至 1 p.u.。

图 10 为使用文中控制方案的直流电压与 VSC 输出电流各分量波形。可以看到该工况下直流电压波动未达到限幅值,电压支撑能力主要取决于单相电流限幅,如图 9(b)所示,2 s—2.1 s 间最高相电流(C 相)被限制在 600 A 以内,文中控制的动态限幅方案可以有效限制电流幅值与直流电压波动。此外,图 10 中在 2 s—2.1 s 之间正负序的有功无功电流都满足所设阻抗比的关系,验证了文中控制策略可以根据阻抗比分配电流的效果。

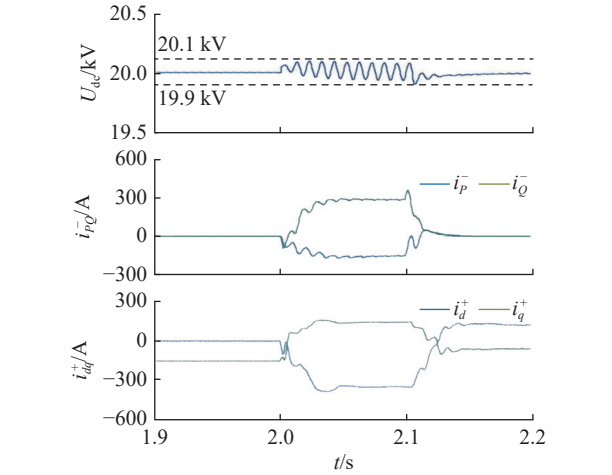


图 10 直流电压与电流各分量波形  
Fig.10 DC voltage and current component waveforms

3.2 110 kV 线路相间短路故障工况仿真波形

2 s 时,图 8 中 110 kV 线路 1 中点  $f_1$  处发生 BC 相短路故障,经过 5 个周期(0.1 s)后切换至  $I/f$  模式。在故障穿越期间使用 VSC 进行电压支撑,分析 PCC 电压波形改善情况,如图 11 所示。

图 11(a)为 VSC 不参与故障支撑时 PCC 的电压电流波形。在 2 s 前为  $PQ$  控制,2 s 时线路故障,PCC 处 B、C 相电压均发生严重跌落,2.1 s 时快速转供,SOP 切换至  $I/f$  模式。

图 11(b)和图 11(c)分别为该工况下使用文中控制策略与传统负序电压闭环的波形。

3.3 案例结果分析

表 3 为不同故障下各种控制策略的各相电压。如表 3 所示,使用文中控制策略在不对称故障时可以有效支撑三相电压,可以将最高相电压支撑至 1 p.u.;同时三相电压不平衡度被显著降低,其中单相短路时由 65% 下降至 27%,相间短路时由 74% 下降至 63%。

若采用传统负序电压闭环,一方面无法充分利用电流容量,另一方面被限幅的负序电流对于负序电压的抑制效果差,导致电压改善效果明显差于文中控制策略。

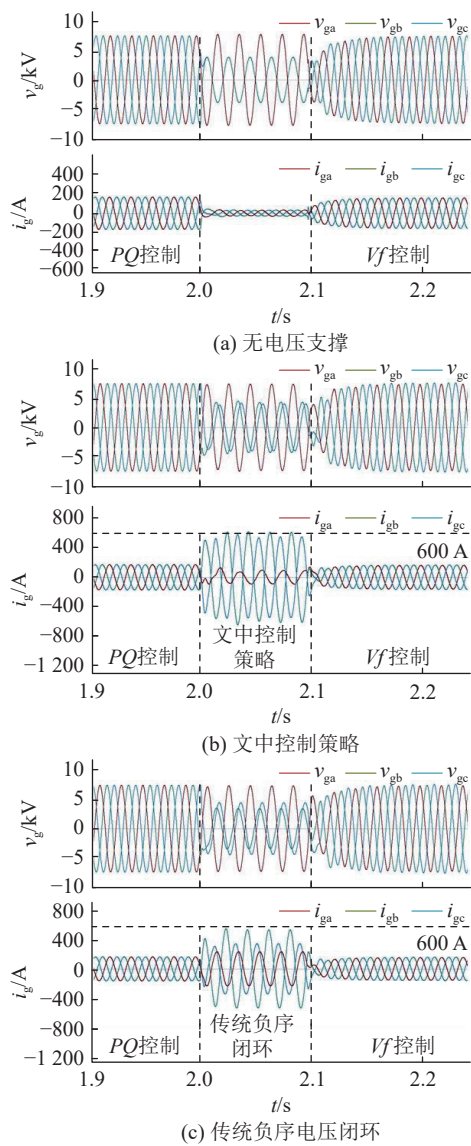


图 11 110 kV 两相相间短路 PCC 电压电流波形  
Fig.11 PCC voltage and current waveforms under 110 kV inter-phase short-circuit

表 3 不对称故障仿真结果

| Table 3 Asymmetric fault simulation results |           |          |          |
|---------------------------------------------|-----------|----------|----------|
| 控制策略                                        | 参数        | 单相短路电压结果 | 相间短路电压结果 |
| 无电压支撑                                       | A相电压/p.u. | 0.43     | 1.03     |
|                                             | B相电压/p.u. | 0.88     | 0.52     |
|                                             | C相电压/p.u. | 0.91     | 0.52     |
|                                             | 不平衡度/%    | 65       | 74       |
| 文中控制策略                                      | A相电压/p.u. | 0.76     | 1        |
|                                             | B相电压/p.u. | 0.91     | 0.58     |
|                                             | C相电压/p.u. | 1        | 0.55     |
|                                             | 不平衡度/%    | 27       | 63       |
| 传统负序闭环                                      | A相电压/p.u. | 0.66     | 1        |
|                                             | B相电压/p.u. | 1        | 0.49     |
|                                             | C相电压/p.u. | 0.90     | 0.62     |
|                                             | 不平衡度/%    | 40       | 73       |

3.4 线路阻抗比扰动评估

文中控制策略的支撑效果依赖于线路阻抗比,而实际电网网架结构变化会对线路阻抗产生一定影响,此时控制策略有效性会受到影响,无法实现最优的效果,以下就阻抗比扰动对文中策略影响进行评估。

在 Simulink 中以 3.1 节参数根据图 1 搭建简易的 SOP 配电网单相短路仿真,线路等效为可变阻抗,改变线路的实际阻抗角  $\alpha$ 。

$$\alpha = \arctan k_{r/x} \tag{23}$$

分别以  $k_{r/x}=0$ (纯无功)与  $k_{r/x}=1$ (控制使用阻抗角  $\alpha_0=45^\circ$ )使用文中的电压支撑策略,观察文中控制相比于纯无功控制的改善效果。表 4 为将最低相电压值抬升标么值作为支撑程度的评估标准。

表 4  $\alpha$  扰动时最低相电压值抬升标么值  
Table 4 The lowest phase voltage rising value with perturbed  $\alpha$

| 线路阻抗角 $\alpha/(^\circ)$ | 最低相电压抬升值/p.u. |             |
|-------------------------|---------------|-------------|
|                         | $k_{r/x}=0$   | $k_{r/x}=1$ |
| 0                       | 0.33          | 0.27        |
| 22.5                    | 0.31          | 0.31        |
| 45                      | 0.27          | 0.33        |
| 60                      | 0.23          | 0.32        |
| 75                      | 0.17          | 0.30        |

当线路实际阻抗角  $\alpha$  因为扰动偏离控制使用阻抗角  $\alpha_0$  时,会导致支撑效果变差,达不到最优,文中样例中最严重会导致支撑效果下降 18%。

表 4 中,线路实际阻抗角  $\alpha$  只要大于控制使用阻抗角  $\alpha_0$  的一半,计及线路阻抗比的功率支撑相比于纯无功的功率支撑( $k_{r/x}=0$ )就有一个更优的支撑效果,所以在设计控制参数时可以将线路阻抗波动考虑在内。

4 结论

文中提出电网不对称接地故障下并网 SOP 的电压支撑策略,并进行仿真验证,结论如下:

(1) 所提电压支撑策略以提高逆变器并网点正序电压与降低负序电压为目标,以有功功率波动、并网点相电压幅值、逆变器输出电流幅值为约束条件,充分利用逆变器容量实现对并网点电压的最大化支撑,改善故障电压的三相不平衡度,并保障逆变器在安全域内运行。

(2) 在高阻抗特性的配电网中,相比于无功支撑方案,所提计及电网阻抗的故障电压支撑方案可以显著提高柔性互联设备对故障电压的支撑能力。

(3) 所提电压支撑策略的限幅方案可以优先支撑正序电压, 提高逆变器的低压穿越能力。

#### 参考文献:

- [1] 张兴, 战祥对, 吴孟泽, 等. 高渗透率新能源发电并网变流器跟网/构网混合模式控制综述[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(21): 1-15.  
ZHANG Xing, ZHAN Xiangdui, WU Mengze, et al. Review on grid-following/grid-forming hybrid mode control for grid-connected converter in high penetration rate of renewable energy generation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(21): 1-15.
- [2] 罗国敏, 赵祎薇, 吴梦宇, 等. 适应高比例新能源接入的配电网改进型自适应电流保护方法[J]. *供用电*, 2024, 41(9): 12-23.  
LUO Guomin, ZHAO Yiwei, WU Mengyu, et al. Improved adaptive current protection method suitable for distribution network adapted to high proportion of new energy source accessed[J]. *Distribution & Utilization*, 2024, 41(9): 12-23.
- [3] 钟雅珊, 杨韵, 左剑, 等. 高比例新能源电网的运行经济性评估研究与应用[J]. *供用电*, 2024, 41(3): 78-87.  
ZHONG Yashan, YANG Yun, ZUO Jian, et al. Research and application on economic evaluation of high ratio new energy grid operation[J]. *Distribution & Utilization*, 2024, 41(3): 78-87.
- [4] 海涛, 刘昱麟, 王钧, 等. 基于模型预测控制的光伏混合储能系统控制策略[J/OL]. *电源学报*: 1-12. (2024-04-08) [2024-07-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20240407.1045.002.html>.  
HAI Tao, LIU Yulin, WANG Jun, et al. Control strategy of photovoltaic hybrid energy storage system based on model predictive control[J/OL]. *Journal of Power Supply*: 1-12. (2024-04-08) [2024-07-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20240407.1045.002.html>.
- [5] 徐旖旎, 刘海涛, 熊雄, 等. 低压配电台区柔性互联关键技术与发展模式[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(11): 3986-4001.  
XU Yini, LIU Haitao, XIONG Xiong, et al. Key technologies and development modes of flexible interconnection of low-voltage distribution station area[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(11): 3986-4001.
- [6] 王皓靖, 郭佩乾, 时珊珊, 等. 中压配电网多台区柔性互联技术应用现状与展望[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(5): 13-23.  
WANG Haojing, GUO Peiqian, SHI Shanshan, et al. Application status and prospects of flexible interconnection technology for multi-station areas in medium-voltage distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(5): 13-23.
- [7] 陈继明, 于馨玮, 仇志华, 等. 柔性互联配电系统 SNOP 选址与运行优化策略[J/OL]. *电力工程技术*: 1-9. (2024-11-25) [2025-03-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1866.TM.20241122.1514.005.html>.  
CHEN Jiming, YU Xinwei, ZHANG Zhihua, et al. SNOP allocation and operation optimization strategy for flexible interconnectioned distribution systems[J/OL]. *Electric Power Engineering Technology*: 1-9. (2024-11-25) [2025-03-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1866.TM.20241122.1514.005.html>.
- [8] 胡益菲, 钱峰, 李海龙, 等. 基于储能型柔性互联装置的配电网孤岛恢复方法[J]. *供用电*, 2024, 41(2): 21-27.  
HU Yifei, QIAN Feng, LI Hailong, et al. Island fault recovery method of distribution network based on flexible interconnection device with energy storage[J]. *Distribution & Utilization*, 2024, 41(2): 21-27.
- [9] 王正齐, 盛柳森, 郝思鹏. 三端口柔性多状态开关有限集模型预测控制[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2023, 44(2): 88-98.  
WANG Zhengqi, SHENG Liusen, HAO Sipeng. A finite control set model predictive control for three-port[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2023, 44(2): 88-98.
- [10] 李志勇, 黄缙华, 赵伟, 等. 面向配电网弹性提升的多端口 E-SOP 分布鲁棒优化配置[J]. *全球能源互联网*, 2024, 7(5): 541-549.  
LI Zhiyong, HUANG Jinhua, ZHAO Wei, et al. Distributionally robust allocation of multi-terminal E-SOP for enhancing distribution network resilience[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2024, 7(5): 541-549.
- [11] 池源, 郭莹霏, 孟庆昊, 等. 主动配电网储能应用新形态: 虚拟配电变压器与馈线[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(12): 163-175.  
CHI Yuan, GUO Yingfei, MENG Qinghao, et al. New form of energy storage application in active distribution network: virtual distribution transformers and feeders[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(12): 163-175.
- [12] ZHANG Y J, ZHONG K H, DENG W Y, et al. An optimal scheduling of renewable energy in flexible interconnected distribution networks considering extreme scenarios[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2023, 17(10): 2531-2541.
- [13] KE Q P, DONG D, LIU T, et al. Review on development prospect of operation scheduling strategies for flexible interconnected distribution network in renewable energy-penetrated power system[J]. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, 2024, 24(2): 921-933.
- [14] YOU R, LU X N. Voltage unbalance compensation in distribution feeders using soft open points[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2022, 10(4): 1000-1008.
- [15] 刘军, 赵晨聪, 谢宙桦, 等. 不平衡电网电压下基于量子粒子群并网变流器功率/电流协调控制[J]. *控制与决策*, 2021, 36(4): 901-908.  
LIU Jun, ZHAO Chencong, XIE Zhouhua, et al. Coordinate control of grid-connected converter based on QPSO under unbalanced grid voltage[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(4): 901-908.
- [16] YANG J K, ALAM M R, TUSHAR W, et al. Incentivizing prosumer voltage regulation for unbalanced radial distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2024, 15(1): 81-94.

- [17] 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.
- [18] 刘军, 赵晨聪, 谢宙桦, 等. 电网不平衡故障下风电并网逆变器的控制综述[J]. *电气传动*, 2020, 50(8): 65-73.  
LIU Jun, ZHAO Chencong, XIE Zhouhua, et al. An overview on control of wind power grid-connected inverter under unbalanced grid fault[J]. *Electric Drive*, 2020, 50(8): 65-73.
- [19] OGHORADA O J K, ZHANG L, HAN H, et al. Inter-cluster voltage balancing control of a delta connected modular multilevel cascaded converter under unbalanced grid voltage[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2021, 6(1): 23.
- [20] DO NASCIMENTO GOMES L, ABRANTES-FERREIRA A J G, DA SILVA DIAS R F, et al. Synchronverter-based STATCOM with voltage imbalance compensation functionality[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(5): 4836-4844.
- [21] 包正楷, 季亮, 常潇, 等. 不平衡电压跌落下新能源场站的主动电压支撑控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(16): 161-169.  
BAO Zhengkai, JI Liang, CHANG Xiao, et al. Active voltage support control strategy for a renewable generation farm during unbalanced voltage sags[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(16): 161-169.
- [22] 李红, 栗时平, 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.
- [23] 施佳斌, 季亮, 常潇, 等. 不对称电压跌落下考虑场景区分的逆变型分布式电源控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(20): 9-17.  
SHI Jiabin, JI Liang, CHANG Xiao, et al. Control strategy for inverter-interfaced distributed generation during unbalanced voltage sag considering scenario classification[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(20): 9-17.
- [24] 彭星, 姜飞, 涂春鸣, 等. 不对称故障下光伏逆变器的最优电压支撑策略[J]. *电网技术*, 2021, 45(11): 4259-4268.  
PENG Xing, JIANG Fei, TU Chunming, et al. Optimal voltage support strategy for photovoltaic inverters under asymmetric faults[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(11): 4259-4268.
- [25] 陈凌彬, 夏向阳, 李红, 等. 不对称故障下考虑光储出力的最优电压支撑策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(9): 76-87.
- CHEN Lingbin, XIA Xiangyang, LI Hong, et al. An optimal voltage support strategy considering the photovoltaic and storage output under asymmetric faults[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(9): 76-87.
- [26] 郑涛, 宋伟男, 吕文轩. 基于 M3C 的低频输电系统不对称故障穿越控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(8): 107-117.  
ZHENG Tao, SONG Weinan, LÜ Wenxuan. Asymmetric fault ride-through control strategy for a low frequency AC transmission system based on a modular multilevel matrix converter[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(8): 107-117.
- [27] 吴成国, 肖仕武, 朱健. 含负序电压支撑分布式电源的电网分区短路电流计算方法[J]. *电网技术*, 2023, 47(3): 1159-1169.  
WU Chengguo, XIAO Shiwu, ZHU Jian. Calculation of power grid partition short-circuit current with negative sequence voltage-supported distributed generation[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(3): 1159-1169.
- [28] 张家祥, 刘素芳, 海方. 非对称负载下逆变器电压不平衡度抑制策略[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2021, 33(10): 138-144.  
ZHANG Jiaxiang, LIU Sufang, HAI Fang. Suppression strategy for inverter voltage imbalance degree under asymmetric load[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2021, 33(10): 138-144.
- [29] 王军舰. 三相负载不平衡时微网逆变器控制策略研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2023.  
WANG Junjian. Research on control strategy of microgrid inverter under unbalanced three-phase load[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2023.
- [30] WANG Y C, ZHOU G D, LI X Q. A voltage unbalance compensation strategy based on virtual impedance for DGs in island microgrid without sequence component separation[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 127: 106641.

## 作者简介:



王旭泽

王旭泽(2000), 男, 硕士在读, 研究方向为柔性互联控制及其可靠性(E-mail: [1204108729@qq.com](mailto:1204108729@qq.com));

陈武(1981), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 通信作者, 研究方向为大功率电力电子变换及其应用(E-mail: [chenwu@seu.edu.comd](mailto:chenwu@seu.edu.comd));

赵海熙(1995), 男, 博士在读, 研究方向为柔性互联技术。

(下转第 70 页)

## Operation control and mode adaptive switching strategy for low-voltage flexible DC interconnection systems

JIANG Changjun<sup>1,2</sup>, LIU Haitao<sup>1,2</sup>, XIONG Xiong<sup>2</sup>, GUO Changhao<sup>1</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. State Grid Shanghai Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Shanghai 201210, China)

**Abstract:** Low-voltage flexible direct current (LV-FDC) technology represents a vital technical approach to addressing the issues of heavy overloading and power supply reliability in end-user distribution networks. The core technological foundation of LV-FDC systems lies in their efficient operation under steady-state conditions and rapid switching control during transient states. This paper analyzes and summarizes the typical decentralized networking modes of LV-FDC systems, encompassing system topologies, connection schemes, and voltage levels. Aiming at the heavy overloading issue in transformer zones caused by uneven spatial and temporal load distributions, a set of steady-state load balancing control logic is proposed. For the issue of system operation mode switching during fault transients, an adaptive switching control based on local voltage information is proposed, which reduces the system's dependence on communication and achieves seamless switching between operating modes through the design of the slave control unit's control loop. Furthermore, an integrated design for steady-state and transient operation control based on master-slave control is analyzed in the context of multi-terminal flexible interconnection applications, ensuring efficient coordination and reliable operation of the system under both steady and transient conditions. Finally, the correctness of all control logic strategies is verified through PSCAD time-domain simulations and RT-LAB hardware-in-the-loop experiments.

**Keywords:** low-voltage direct current; flexible interconnection; decentralized network; load sharing operation; transient control; adaptive switching logic; seamless switching

(编辑 陆海霞)

(上接第 32 页)

## Asymmetric fault voltage support scheme for soft open points based on improved negative sequence voltage outer loop

WANG Xuze<sup>1</sup>, CHEN Wu<sup>1</sup>, ZHAO Haixi<sup>1</sup>, CHEN Shi<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

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

**Abstract:** Flexible interconnection and dynamic power flow regulation in distribution networks are achieved by soft open point (SOP), optimizing the configuration and scheduling of distribution resources. To improve the load voltage during asymmetric ground faults, it is proposed that positive and negative sequence currents are output by the converter during faults. This provides voltage support and enhances fault ride-through capability. However, actual operating conditions make open-loop optimization schemes susceptible. Poor performance is shown by traditional negative sequence voltage-based closed-loop support. In this paper, the conventional negative sequence voltage outer loop is improved by controlling the amplitude of negative sequence current to suppress the negative sequence voltage. The phase of the negative sequence current is adjusted to optimize the suppression effect. To enhance the inverter's capacity utilization and limit active power fluctuations, a comprehensive scheme is proposed for limiting the positive and negative sequence current amplitudes. A short-circuit fault simulation is constructed using PSCAD simulation software, based on the actual parameters of the distribution network. The simulation results show that the proposed control strategy significantly enhances voltage performance during fault conditions, improving the low-voltage ride-through capability.

**Keywords:** asymmetric ground fault; soft open point (SOP); positive and negative sequence voltage support; voltage outer loop; line impedance ratio; limit active power fluctuations

(编辑 方晶)