

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241514

基于电能路由器的新型配电系统接地故障柔性降压消弧

江浪¹, 窦真兰², 尹项根¹, 陈卫¹, 赖锦木³, 陈俊宏³, 文明浩¹, 韩霄¹

(1. 华中科技大学电气与电子工程学院强电磁技术全国重点实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 国网上海市电力公司, 上海 200023; 3. 郑州大学电气与信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 配电网电缆化程度越来越高, 导致线路单相接地故障消弧困难。为此, 针对含电能路由器(power router, PR)并入的新型配电网, 提出了基于 PR 的配电网单相接地故障柔性降压消弧新方法。首先, 提出高压级直流侧接地的模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)型 PR 拓扑。在 $dq0$ 同步旋转坐标系下, 采用比例积分谐振(proportional integral resonance, PIR)控制器无静差跟踪零轴矢量, 实时调控系统零序电压与故障相电源电动势幅值相等、相位相反, 抑制故障相电压使其降至故障点重燃弧电压以下, 实现接地故障主动降压消弧。然后, 通过控制系统零序电压线性减小, 观测系统零序电流随零序电压线性变化与否, 判定是否为瞬时故障。考虑了多种故障工况, 在 MATLAB/Simulink 仿真中, 故障相电压可降到约 10 V。进一步开展了实物系统平台实验, 验证了基于 PR 的柔性降压消弧方法的有效性和可靠性。

关键词: 消弧; 配电网; 接地故障; 电能路由器; 新型电力系统

Flexible voltage arc suppression for single line-to-ground fault in distribution systems based on power routers

JIANG Lang¹, DOU Zhenlan², YIN Xianggen¹, CHEN Wei¹, LAI Jinmu³, CHEN Junhong³, WEN Minghao¹, HAN Xiao¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200023, China; 3. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: With the increasing use of cables in distribution networks, it has become more difficult to extinguish arcs in single line-to-ground (SLG) faults. To address this, a novel and flexible voltage arc suppression technique for SLG faults in distribution networks based on power routers (PR) is proposed. First, a modular multilevel converter (MMC)-based PR topology with a grounded high-voltage DC is introduced. A proportional integral resonance (PIR) controller in the $dq0$ synchronous rotating frame (SFR) is applied to track the zero-axis vector without steady-state error. This enables real-time regulation of the system zero-sequence voltage so that it matches the magnitude but opposes the phase of the power source electromotive force of the faulty phase. As a result, the fault phase voltage is suppressed below the arc reignition voltage at the fault point, achieving active voltage arc suppression for grounding faults. Then, by precisely controlling the linear reduction of the system zero-sequence voltage and observing whether the zero-sequence current varies linearly with it, the method can determine whether the fault is transient. Considering various fault conditions, MATLAB/Simulink simulations show that the fault phase voltage can be reduced to about 10 V. Further experiments on a physical system platform verify the effectiveness and reliability of the proposed PR-based flexible voltage arc suppression method.

This work is supported by the Key Project of National Natural Science Foundation of China (No. 52337006).

Key words: arc suppression; distribution network; grounding fault; power router; new type power system

0 引言

配电网点多面广、结构复杂, 深入供用多端, 所处环境恶劣, 馈线故障率居高不下, 严重影响了配电网安全稳定运行^[13]。其中, 配电网故障中约 80% 为单相接地故障, 若不及时消除或抑制, 会导致故

障迅速蔓延, 引发设备损毁、电气火灾、人畜触电等事故^[4-5], 或大面积长时间停电, 威胁生命财产安全^[6], 尤其在森林、草原、城市、厂矿、燃气等区域。近年来, 随着新型电力系统的快速发展, 配电网安全遇到了新挑战。我国电力系统十分重视配电网接地故障的安全处置, 为了避免接地故障降低供电可靠性^[7]、破坏用电持续性, 亟需对适用于新型配电网的单相接地故障消弧技术进行深入研究开发

基金项目: 国家自然科学基金(重点项目)资助(52337006)

和广泛推行应用。

目前配电网接地故障消弧机理分为电流补偿消弧与电压抑制消弧^[8]。自 1916 年德国学者彼得生发明传统消弧线圈(arc suppression coil, ASC)(美国又称为接地故障补偿装置)以来,因其成本较低、技术简单,得到了广泛应用^[9]。但由于实际配电网中故障点除了含无功工频分量外,还存在有功分量和谐波分量,ASC 的效果有限^[10]。而城市、煤矿等电网中的对地参数多变,有研究人员又先后提出了应对配电网电容电流水平复杂多变的线路阻抗和中性点接地阻抗自动跟踪调节^[11]方法等,但对故障电流中的有功分量和谐波分量补偿程度仍不够。

为解决故障电流中有功分量和谐波分量补偿不足的难题,国内外专家学者进一步提出了无源工频电流全补偿和有源全电流补偿。文献[12]提出了中性点电阻接地超前相接电感、中性点电抗接地滞后相接电容或超前相接电感的方法,但该方法需同时调节中性点接地阻抗和偏置元件阻抗,操作稍显复杂。有源全电流补偿即利用有源逆变器从中性点注入全电流实现接地故障零残流^[13],文献[14]提出了基于单相有源滤波技术的新型主从式消弧线圈、瑞典 Swedish Neutral 公司开发了残流全补偿装置^[15],但对配电网零序电流或对地参数的在线测量精度有较高的要求^[16]。

因当前电流消弧的效果有限,专家学者们进而研究了电压消弧^[17]。文献[18]通过电力电子电压源调控中性点电压,抑制故障相电压降至接近零,该方法无需实时测量线路对地参数。文献[8]也提出了一种有源消弧装置,用全桥模块构造中性点,在传统的中性点注入降压消弧的基础上增加了残压补偿,可减小线路阻抗的影响。文献[19]中介绍了故障相转移技术,操作较容易,在因某些不可预知因素造成选相错误时,单相接地故障会变为两相接地故障。接地变分挡调压干预的消弧方法须研发特种变压器,通过分级短接所特制的接地变的分接触头,可灵活调控故障相电压^[20]。

随着以新能源为主体的新型电力系统的发展,利用新型配电网中的电力电子设备实现对电网故障的安全快速处理^[21],为配电网单相接地故障消弧提供了新的可能。文献[22]将电能路由器(power router, PR)应用于配电网故障自愈,以增强韧性。文献[23-24]提出基于三相级联 H 桥(cascaded H-bridge, CHB)接地的配电网接地故障分相柔性消弧方法。文献[25]利用 3 个单相消弧变流器分别直连配电网线路,在两个非故障相之间轮换消弧,该方法专门挂设补偿变流器并测量对地参数。文献[26]分析了有源交直流

混联配电网中发生单相接地故障时的电压特性和零序电流传输路径,阻止零序电流在各换流器间的流通,减小对基于零序故障电流的差动保护的影响。

城市配电系统电缆化程度越来越高,使得其电容电流水平也显著升高,且变化范围更大,导致消弧容量不足或调节范围不够等问题,而城市电网的安全要求却愈加严格,因此,对该问题的解决需求迫切。与此同时,电能路由器等电力电子装置在城市配电系统中的应用愈来愈广泛。那么,研究利用电能路由器等功率传输装置进行故障消弧,不仅可发挥其容量优势,还能快速柔性可调,既实现单相接地故障消弧,又提升设备利用价值。

本文针对含 PR 并入的新型配电网,提出了基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)型电能路由器(MMC-PR)高压级零轴调控的柔性降压消弧方法。通过对馈线上含三级结构 PR 并入的配电网进行零序分析,论述了 MMC-PR 柔性降压消弧原理。在 dq0 同步旋转坐标系下进行多变量解耦控制,采用比例积分谐振(proportional integral resonance, PIR)控制器无静差跟踪零轴矢量,实时调控系统零序电压,实现了单相接地故障柔性降压消弧,并对故障性质进行了辨识。本文考虑多种工况,在 MATLAB/Simulink 中进行建模仿真后,进一步开展了实物系统平台实验,并对结果进行了深入分析,验证了所提消弧原理的有效性和可靠性。

1 含电能路由器的新型配电网

含电能路由器的配电网是新型配电网的主要形态之一。配电网通常含多条馈线,于本文的研究而言,选用双馈线即可,对研究结果无影响。如图 1 所示, \dot{E}_A 、 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C 为电源电动势; \dot{U}_A 、 \dot{U}_B 、 \dot{U}_C 为线路电压; R_{Ai} 、 R_{Bi} 、 R_{Ci} 为第 $i(i=1,2)$ 条馈线上的泄漏电阻; C_{Ai} 、 C_{Bi} 、 C_{Ci} 为第 $i(i=1,2)$ 条馈线上对地电容;F1、F2 是接地故障点; R_f 为故障过渡电阻; \dot{U}_0 为发生单相接地故障时的配电网零序电压;负荷 i 表示第 $i(i=1,2)$ 条馈线上的负载; K_0 为 PR 本体直流侧接地的开关。

1.1 新型配电网故障处置需求与 PR 功能

配电网的安全稳定运行,是持续可靠供电的重要保障,新型配电网的故障抑制与隔离等处理方法更加丰富^[27]。电能路由器作为支撑新型配电网核心装备之一,应可实现故障自愈。在图 1 所示的配电网中,对其包含的 PR 设计了极间中点接地,且高压侧出口无联结变,它与馈线 1 末端直接相连以构成故障时的零序电流通路。

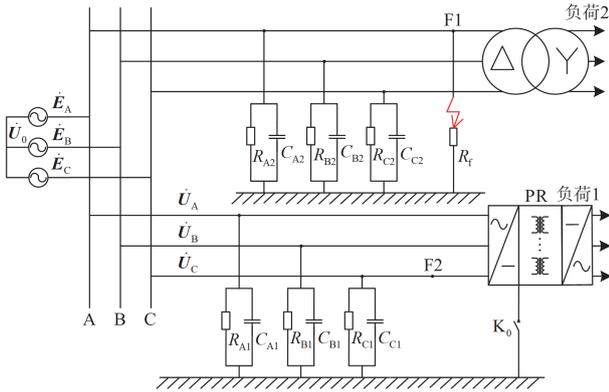


图 1 含电能路由器的新型配电网

Fig. 1 New distribution network with PR

图 1 所示的 10 kV 配电网中, 馈线 2 末端的 Δ/Y 降压变压器带有负荷 2。如图 2 所示, 为了便于分析, 将正常时 10 kV 侧三相对地电压分别记为 \dot{U}_{AO} 、 \dot{U}_{BO} 、 \dot{U}_{CO} , 3 个线电压分别为 \dot{U}_{AB} 、 \dot{U}_{BC} 、 \dot{U}_{CA} 。不接地配电网的 A 相发生单相接地故障时, 虚拟中性点将沿 A 相右侧轨迹偏移。由图 2 易看出, 无论偏移程度如何, 3 个线电压始终保持对称。若发生金属性接地, 图 2 中 A 点与 O'' 点重合, A 相对地电压降为 0, 健全相对地电压升高至线电压, 3 个线电压保持对称。因 Δ/Y 型降压变压器原边的 3 个绕组电压对称, 则 380 V 副边也对称, 即单相接地故障时供电不受故障影响。PR 所载有的 380 V 负荷 1, 因高压级 MMC 采取了稳直流电压控制、隔离级有 DC/DC 环节以及高频变压器的存在, 能有效进行故障隔离, 当 10 kV 交流侧单相接地故障或消弧时, 380 V 低压交流侧负载供电不受影响。

1.2 直流侧接地的 MMC 型 PR 拓扑结构

PR 接地方式的选择, 与其主电路拓扑形式密切

相关。具备高低压交直流端口的 MMC-PR 符合未来交直流电网的发展, 且模块化结构具有良好的灵活性和可拓展性, 适合于中高压交直流配电网的大功率应用^[28]。PR 的主电路拓扑是从固态变压器发展而来, 文献[29]对固态变压器从开关损耗、开关数量、控制特性和功能特性等进行了比较分析, 得出三级变换结构的 PR 拥有最大控制灵活度和功能可拓展性的结论。如图 3 所示, 本文所提 PR 采用 MMC 型高压级、变压隔离级和低压级的三级变换结构, 具备 HVAC、HVDC、LVDC 和 LVAC 多个端口; L_{ac} 和 L_{dc} 分别为高压交流侧和直流侧桥臂电感。

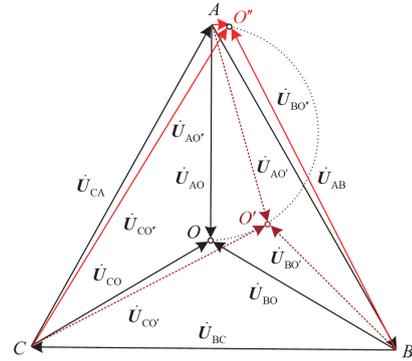


图 2 A 相接地故障时电压相量关系

Fig. 2 Voltage phasor relationship during A-phase ground fault

本文在 MMC 型高压直流侧设计了接地点, 使 PR 与发生接地故障时的配电网可构成零序回路。与图 1 中 PR 直流侧接地的简化表示相对应, 图 3 中详细给出了 PR 输入级高压直流侧所设置的极间电容接地, K_2 、 K_3 分别是直流侧电容接地的控制开关。通过对系统零序分量的抑制, 确保了本研究中配电网中性点不接地的性质不发生变化, 单相接地故障特征不变。

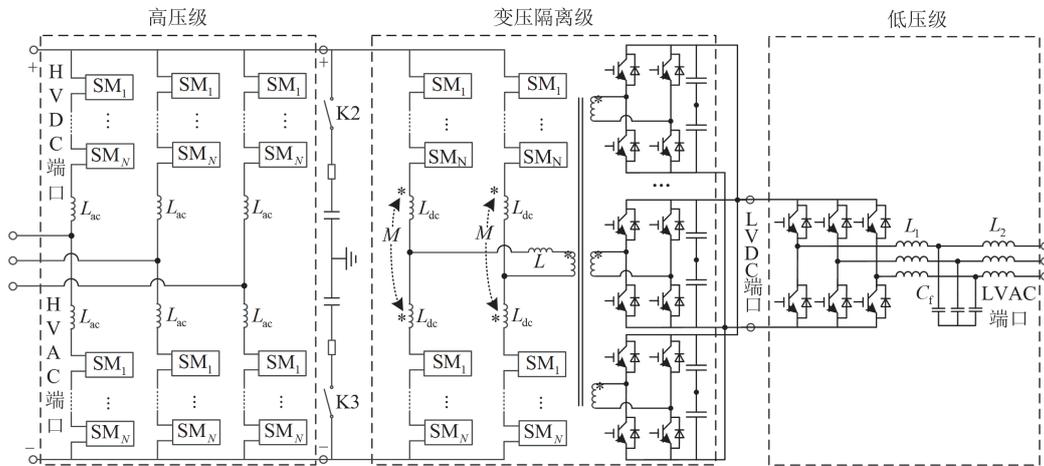


图 3 直流侧接地的 MMC 型电能路由器拓扑结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of topological structure of MMC-PR with DC side grounding

2 基于 PR 的柔性降压消弧原理

2.1 单相接地故障时的零序分析

当图 1 所示配电网中发生 A 相接地故障, 根据戴维南定理和诺顿定理, 可对 PR 高压级与高压直流侧接地部分的电路进行简化。在本文的研究中, 因配电网线路阻抗本身较小, 对所提方法的分析影响较小, 在分析过程中可忽略。如图 4(a) 所示, 将 PR 高压级 MMC 等效为对地电流源, 各相桥臂阻抗分别简化为内阻抗 Z_{MA} 、 Z_{MB} 、 Z_{MC} , 对地电流源向 10 kV 配电网注入的电流分别为 \dot{I}_{MA} 、 \dot{I}_{MB} 、 \dot{I}_{MC} , 内阻抗之和为 Z_M , 注入电流之和为 \dot{I}_{M0} 。若系统参数对称, 则各相注入电流幅值相等。

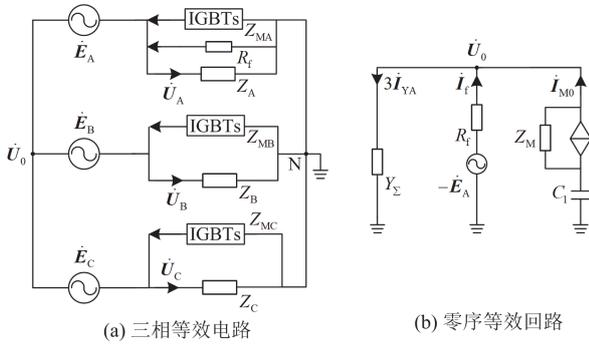


图 4 A 相接地时配电网等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit diagram of distribution network during A-phase ground fault

由图 4(a), 可得节点 N 的 KCL 方程为

$$-(Y_A \dot{U}_A + Y_B \dot{U}_B + Y_C \dot{U}_C) = \dot{I}_{MA} + \dot{I}_{MB} + \dot{I}_{MC} + \dot{I}_f \quad (1)$$

$$-\dot{I}_{M0} = (Y_A \dot{E}_A + Y_B \dot{E}_B + Y_C \dot{E}_C) + (Y_A + Y_B + Y_C) \dot{U}_0 + \dot{I}_f \quad (2)$$

式中: Y_A 、 Y_B 、 Y_C 分别为配电网各相对地导纳, $Y_A = 1/Z_A$ 、 $Y_B = 1/Z_B$ 、 $Y_C = 1/Z_C$, Z_A 、 Z_B 、 Z_C 分别为配电网各相对地阻抗; \dot{I}_f 为故障电流。

设 $Y_A = Y_B = Y_C$, 则 $Y_A \dot{E}_A + Y_B \dot{E}_B + Y_C \dot{E}_C = 0$, 代入式(2), 可得

$$-\dot{I}_{M0} = (Y_A + Y_B + Y_C) \dot{U}_0 + \dot{I}_f \quad (3)$$

根据以上推导, 图 4(a) 可进一步简化。从 PR 高压级交流出口看进去, 单相接地故障零序等效回路可等效为如图 4(b) 所示电路, 其中 Y_Σ 为线路对地总导纳, $Y_\Sigma = Y_A + Y_B + Y_C$; $-\dot{E}_A$ 等于 A 相故障时故障点虚拟电压; \dot{I}_{YA} 为未消弧时故障相对地电流, 由图 4 可知

$$-\dot{I}_{YA} = Y_A \dot{U}_0 = Y_\Sigma \dot{U}_0 / 3 \quad (4)$$

此时, PR 向电网注入的电流 \dot{I}_{M0} 柔性可控。结

合式(3)可知, 调控 \dot{I}_{M0} 既能避免配电网发生单相接地故障时故障电流突增, 又能实现有效消弧。

2.2 调控零序电压的降压方法

本文的理论熄弧条件是, 当线路单相接地故障时的故障点电压 $\dot{U}_A = \dot{E}_A + \dot{U}_0 = 0$, 即 $\dot{U}_0 = -\dot{E}_A$ 时, 接地电弧熄灭, 故障点电流降为 0, 即 $\dot{I}_f = 0$ 。

将 $\dot{I}_f = 0$ 代入式(3), 可得

$$-\dot{I}_{M0} = (Y_A + Y_B + Y_C) \dot{U}_0 \quad (5)$$

再将式(4)代入式(5), 可知:

$$-Y_\Sigma \dot{U}_0 = 3\dot{I}_{YA} = \dot{I}_{M0} \quad (6)$$

即当 $\dot{U}_A = \dot{E}_A + \dot{U}_0 = 0$, 即 $\dot{U}_0 = -\dot{E}_A$ 时, 有

$$\dot{I}_{M0} = -Y_\Sigma \dot{E}_A \quad (7)$$

尽管当满足式(7)时, 故障点电压 \dot{U}_A 也同样可被降至 0, 但由于准确测量配电网对地参数困难, 故障时更难。所以本文通过 MMC 型电能路由器调控电网零序量, 使得配电网零序电压与电源电动势大小相等、相位相反, 故障点电压抑制到燃弧电压以下, 即可使得故障点绝缘最薄弱点电场强度持续低于绝缘击穿强度, 既达到电弧熄灭的目标, 又有效阻止电弧重燃, 无需测量对地参数。

3 柔性降压消弧控制

3.1 基于 dq0 的柔性降压消弧控制

零序电压的精准控制是安全快速消弧的保障。为实现对三相正弦交流信号的无静差控制, 本文采用 PIR 控制对正弦信号进行跟踪。可在原有控制模式的基础上增加零序分量控制策略, 实现单相接地故障柔性降压消弧。

为了便于调控零序分量, 满足对零序分量的变换需求, 需要在传统 $\alpha\beta$ 变换的基础上, 进一步开展 dq 变换。同时在 $\alpha\beta$ 静止坐标系中抽出一个与 $\alpha\beta$ 平面正交的零轴, 即在 Clarke 变换矩阵下增加一常数行; 继而在 Park 变换矩阵下增加全为 1 的行, 即可实现将三相坐标系中的零序分量变换至含零轴的 dq0 同步旋转坐标系中, 满足在 dq0 中调控零序分量的需求。容易得到, 变换矩阵的第 3 行与其他行线性无关, 说明对零序分量的调控与正、负分量互不影响。那么, 设 PR 在 10 kV 配电网侧的端口三相交流电压瞬时值为 u_A 、 u_B 、 u_C , 三相交流电流瞬时值为 i_A 、 i_B 、 i_C 。将三相电压瞬时值经恒幅值 Clarke 变换后, 进一步开展 Park 变换, 得到 dq0 坐标系下 PR 端口处电压瞬时值 u_d 、 u_q 、 u_0 , 其中 u_0 为零轴电压, 即零序分量。

A 相故障时, 令 u_0 的控制指令值为 u_0^* , ε_A 为 A 相电源电动势 \dot{E}_A 对应的瞬时值, 则有

$$u_0^* = -\varepsilon_A \quad (8)$$

定直流电压和无功功率($V_{dc}Q$)控制是换流装置常用的控制模式。图 5 中给出了改进后的含零轴调控的改进 $V_{dc}Q$ 柔性降压消弧控制图, 在本文 PR 高压级所采用的改进后的控制方法中, 实现了对 d 轴、 q 轴、0 轴的解耦调控。

u_{0_ref} 即为无静差跟踪得到的零轴电压参考值, 经 PR 高压级调制后, 输出补偿电压, 调控系统零序电压, 使之满足 $u_0 = -\varepsilon_A$, 实现配电网单相接地故障相降压。由图 5 可知, 本文所提基于 PR 高压级零轴的消弧控制不需要额外的通信支持, 且配电网的供电半径不大、线路阻抗小, A 相电源电动势瞬时值 ε_A 可由 PR 端口电压直接测算得到, 零轴参考值 i_{0M} 通过 PIR 控制器调控 $u_0 + \varepsilon_A = 0$ 得到, 并生成 0 轴电压参考值 u_{0_ref} , 经 $dq0$ 到 abc 坐标系的反变换后, 将故障相电压抑制到重燃弧电压以下。

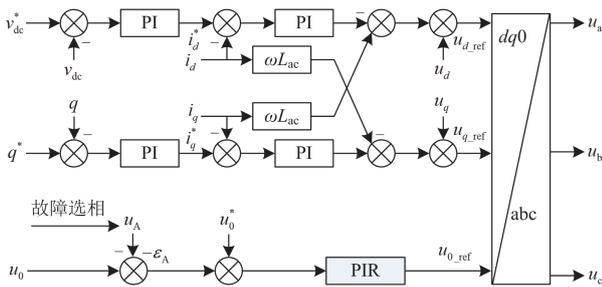


图 5 含零轴调控的改进 $V_{dc}Q$ 柔性降压消弧控制图

Fig. 5 Control diagram of arc suppression for grounding phase voltage flexibly reduced based on improved $V_{dc}Q$ controller with zero axis control

3.2 零轴控制器的选择

在 $dq0$ 同步旋转坐标系中, 对三相坐标系的三相电压进行三序解耦控制后, 零轴存在工频量。由于 PI 控制器对交流信号的跟踪效果有限, 会导致对零序电压的调控误差较大, 影响消弧效果。因此, 为实现对零轴分量的无静差跟踪, 保障零序电压调控精度, 本文对零轴矢量的控制采用了 PIR 控制器。同时, 因零轴上其他分量通常较小, 控制器积分环节的参数可设为 0, 将 PIR 控制器简化为比例谐振控制器。比例谐振控制器因其对交流信号良好的无稳态误差跟踪而被广泛应用, 适合于本文所提的零轴调控。

本文中所采用的比例谐振控制器传递函数 $G(s)$ 表达式为

$$G(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + \frac{2k_r\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (9)$$

式中: k_p 为比例系数; k_i 为积分系数; k_r 为谐振系数; s 为复频域算子; ω_0 为谐振频率; ω_c 为截止频率。在本文所搭建的仿真模型中, 取 $k_i = 0$, $k_p = 200$, $k_r = 1500$, $\omega_c = 1500$ rad/s, $\omega_0 = 2\pi f_0$, 其中 $f_0 = 50$ Hz, 零轴调控所用 PIR 控制器的伯德图如图 6 所示。

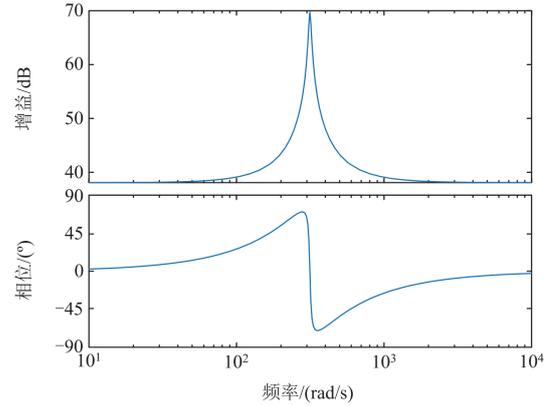


图 6 零轴 PIR 控制器的伯德图

Fig. 6 Bode diagram of the zero axis PIR controller

由图 6 可以看出, 零轴 PIR 控制器在 ω_0 处时增益最大; 在 ω_0 处邻域内相位有明显的突变, 相频特性较为陡峭, 此处谐振效果良好。因此, 该控制器能零稳态误差跟踪工频量, 可适用于配电网接地故障柔性降压消弧控制。

3.3 单相接地故障的消弧实现

含 MMC-PR 的配电网柔性降压消弧实现流程如图 7 所示, 根据既有故障检测和选相结果, 若控制目标是将故障相电压 u_a 降到 0, 则根据式(8)可得, 零序电压调控指令值 $u_0^* = u_a - \varepsilon_A = -\varepsilon_A$ 。再根据 PR 所输出零序电压的指令值 u_0^* , 投入基于 $dq0$ 的消弧控制, 调控系统零序电压将故障相电压抑制到燃弧电压以下。去游离后, 线性改变零序电压指令值, PR 线性抬升故障相电压, 检测系统零序电流是否随所控指令值线性变化。若系统零序电流随指令值线性变化, 则判为瞬时性单相接地故障, PR 退出柔性消弧控制; 反之, 则判为永久性单相接地故障, 须进一步确定故障位置并隔离故障。

4 建模仿真验证分析

4.1 仿真模型及参数

在 MATLAB/Simulink 仿真环境中搭建图 1、图 3 所示的模型, 并仿真多种单相接地故障工况。模

型中包含两条馈线，一台高压直流侧极间中点接地的 MMC 型电能路由器，详细参数如表 1 所示。

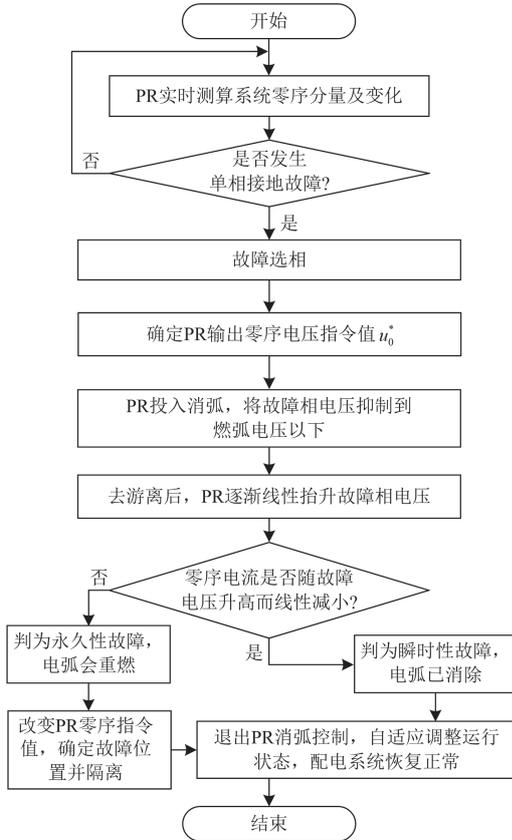


图 7 基于 PR 高压级改进 $V_{dc}Q$ 控制的柔性降压消弧流程
Fig. 7 Flow chart of voltage flexibly reduced arc suppression based on high voltage of PR with improved $V_{dc}Q$ controller

表 1 含 PR 的典型 10 kV 配电网仿真模型参数

Table 1 Simulation model parameters of typical 10 kV distribution network with PR

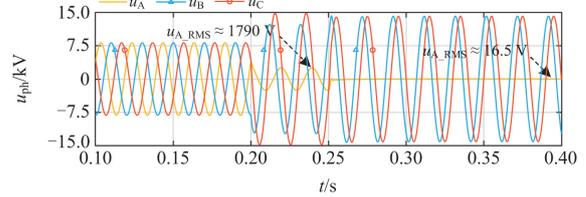
参数	数值
系统额定电压 U_N	10 kV
馈线数量 n	2 条
三相线路总对地电导 G_{Σ}	2.0×10^{-4} S
三相线路总对地电容 C_{Σ}	21 μ F
线路阻尼率 d	3.5%
MMC 型电能路由器容量	2.5 MVA
MMC 桥臂电感 L_{ac}	50 mH
MMC 直流侧接地电容 C_1	1000 μ F
故障过渡电阻 R_f	50、200、500、1500、3000 Ω
故障点位置	F1、F2

参考实际电网工程，并考虑到消弧的容量需求，将 PR 的容量设计为 2.5 MVA。

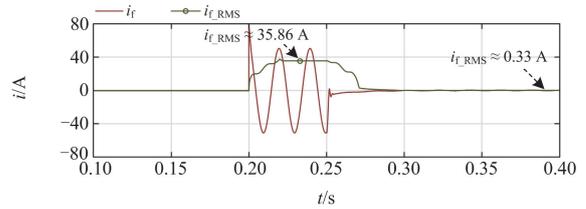
4.2 PR 柔性降压消弧仿真验证

在配电网中性点不接地的情况下，分别设置不

同过渡电阻的单相接地故障，对所提故障消弧方法进行仿真验证。若 0.2 s 起在 F1 处发生 A 相单相接地故障，0.25 s 起 PR 自适应投入柔性消弧控制，所得仿真结果如图 8—图 12 所示，其中 u_{ph} 表示相电压。



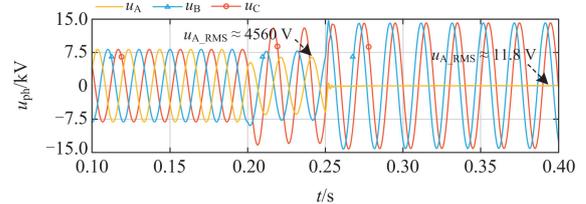
(a) 三相电压波形



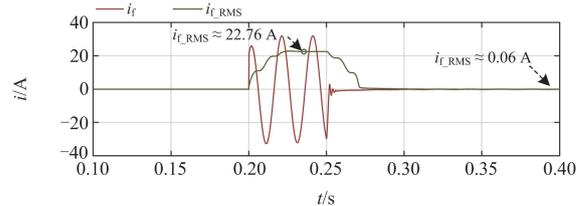
(b) 故障电流波形及其RMS

图 8 F1 处故障过渡电阻为 50 Ω 时仿真波形

Fig. 8 Simulation waveform with a 50 Ω fault transition resistance at F1



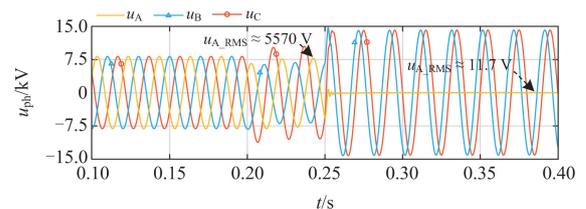
(a) 三相电压波形



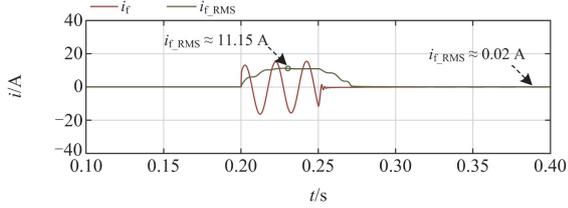
(b) 故障电流波形及其RMS

图 9 F1 处故障过渡电阻为 200 Ω 时仿真波形

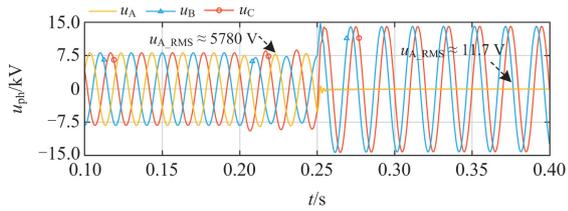
Fig. 9 Simulation waveform with a 200 Ω fault transition resistance at F1



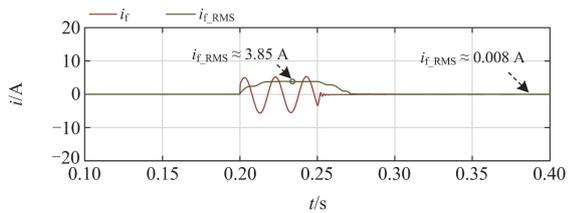
(a) 三相电压波形



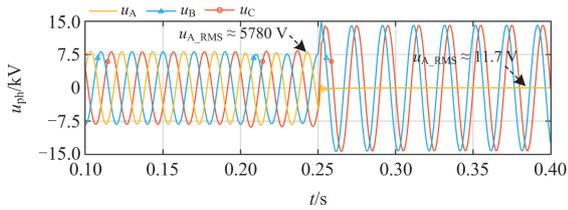
(b) 故障电流波形及其RMS

图 10 F1 处故障过渡电阻为 500 Ω 时仿真波形Fig. 10 Simulation waveform with a 500 Ω fault transition resistance at F1

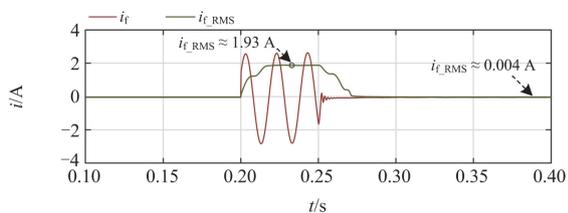
(a) 三相电压波形



(b) 故障电流波形及其RMS

图 11 F1 处故障过渡电阻为 1500 Ω 时仿真波形Fig. 11 Simulation waveform with a 1500 Ω fault transition resistance at F1

(a) 三相电压波形



(b) 故障电流波形及其RMS

图 12 F1 处故障过渡电阻为 3000 Ω 时仿真波形Fig. 12 Simulation waveform with a 3000 Ω fault transition resistance at F1

由图 8 可知, 当 A 相 0.2 s 发生 50 Ω 低阻单相接地故障时, 故障相电压突变后迅速降至约 180 V。0.25 s 起 PR 投入消弧控制, 故障相电压降至 20 V 以下; 故障电流得到有效抑制, 故障点残流有效值被抑制到约 0.3 A。如图 9 和图 10 所示, 接地故障过渡电阻分别为 200 Ω 和 500 Ω 时, PR 消弧控制快速将故障相电压抑制到重燃弧电压以下, 且故障点残流远低于 1 A, 此时接地故障电弧可有效熄灭。

结合图 11、图 12 和表 2 分析可知, 当过渡电阻为 1500 Ω 甚至 3000 Ω 时, 虽故障后故障相电压本身下降幅度较小, 所提 PR 消弧控制仍然可将故障相电压抑制到重燃弧电压以下; 虽此时故障点电流本身较小, 所提消弧方法仍能将故障点残流进一步抑制到 10 mA 以下。

表 2 消弧前后 F1 处不同过渡电阻时电压与电流的有效值
Table 2 Voltage and circuit RMS values of different transition resistances at F1 before and after fault arc suppression

故障点	过渡电阻/ Ω	故障相电压/kV		故障点残流/A	
		消弧前	消弧后	消弧前	消弧后
F1	50	1.79	0.0165	35.86	0.330
	200	4.56	0.0118	22.79	0.059
	500	5.57	0.0117	11.15	0.023
	1500	5.78	0.0117	3.853	0.008
	3000	5.78	0.0117	1.927	0.004

当单相接地故障发生在馈线 1 的 C 相 F2 处时, 故障时刻为 0.2 s 起, 过渡电阻为 500 Ω , 0.25 s 起 PR 投入柔性消弧控制, 仿真结果如图 13 所示。由于仅改变了故障点位置和相线, 未改变系统阻尼率, 消弧投入前后, 接地故障支路上的残流与 F1 处发生相同故障时接近, 无明显变化, 具体通过对比仿真结果图 10 与图 13 可得。

在与图 13 相同故障的仿真条件下, 仅改变过渡电阻, 进行 50、500、200、1500、3000 Ω 多组仿真实验, 结果如表 3 所示。由表 3 可知, 故障后在消弧控制投入前, F2 处故障相电压与同阻尼率下 F1 处基本相同, 故障点电流大小相差无几; 消弧控制投入后, 该工况下故障相电压均被抑制降低到重燃弧电压以下, 故障点残流均接近零, 残流大小与 F1 时基本相等; 并且, 与 F1 处故障类似, 随着故障过渡电阻的增大, 故障点电流虽有所减小但不至于自熄弧, 投入消弧控制后, 均能有效降至重燃弧电压和熄弧电流以下。这表明故障点在 F2 时, 故障电压、电流规律和大小与 F1 处故障时基本相同, 在本文中低阻和高阻故障下, 因模型已忽略线路阻抗, 所提基于 PR 控制的柔性降压消弧方法, 对不同故障电阻和故障点位置, 均可有效消弧。

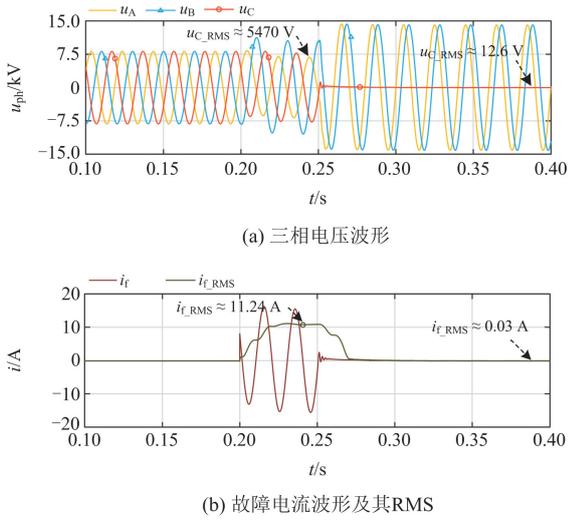


图 13 F2 处故障过渡电阻为 500 Ω 时仿真波形
Fig. 13 Simulation waveform with a 500 Ω fault transition resistance at F2

表 3 消弧前后 F2 处不同过渡电阻时电压与电流的有效值
Table 3 Voltage and circuit RMS values of different transition resistances at F2 before and after fault arc suppression

故障点	过渡电阻/Ω	故障相电压/kV		故障点残流/A	
		投入前	投入后	投入前	投入后
F2	50	1.79	0.0117	35.86	0.235
	200	4.60	0.0137	22.98	0.069
	500	5.47	0.0126	11.24	0.025
	1500	5.79	0.0119	3.859	0.008
	3000	5.78	0.0118	1.923	0.004

在含 PR 并入的 10 kV 配电网，基于改进 $V_{dc}Q$ 控制的柔性降压消弧投入前后，以故障过渡电阻为 500 Ω 时的情况为例，其 3 组线电压情况如图 14 所示，0.2 s 起发生单相接地故障后，虽故障相电压有所下降，但三相相间电压保持对称；0.25 s 起投入消弧控制，将故障相电压抑制进一步降到重燃弧电压以下后，线电压依然保持对称。即 PR 柔性降压消弧方法不改变系统线电压，不影响配电网正常供电。

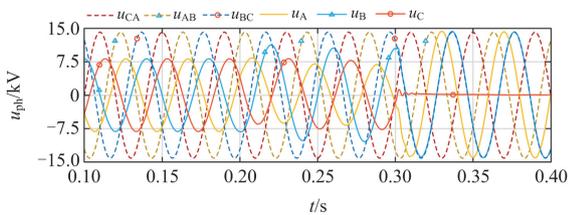


图 14 过渡电阻为 500 Ω 时相电压与线电压波形
Fig. 14 Phase and line voltages with a 500 Ω transition resistance

在相同故障条件下，相比传统的专用的 CHB 接地消弧装置(arc suppression device, ASD)，PR 消

弧效果良好。如图 15 所示，故障特征与图 9、表 2 中相同，CHB 投入消弧后，经过约 50 ms 进入消弧稳态，故障相电压降至约 102 V，残流降到约 0.51 A，也低于电弧重燃条件。对比图 9、图 15，并依据表 2，说明 PR 消弧控制收敛快，消弧效果较佳，对单相接地故障的抑制能力较强。

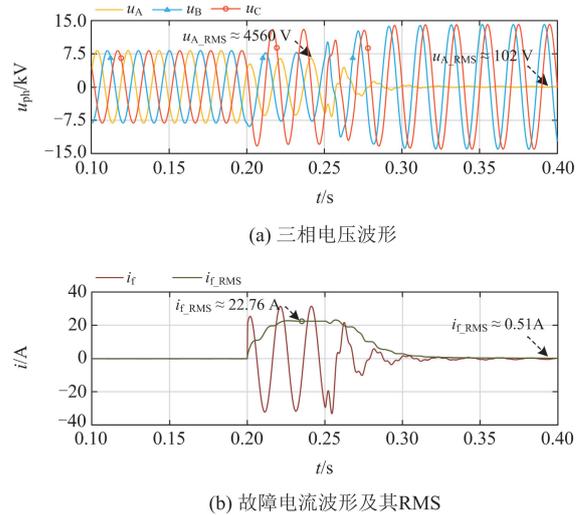


图 15 专用 CHB 接地消弧装置在 F1 处故障过渡电阻为 200 Ω 时仿真波形

Fig. 15 Simulation waveforms when a fault of 200 Ω transition resistance occurs at F1 by CHB grounding ASD

5 实物验证平台及结果

5.1 实物实验平台设计

参考图 1 中所示拓扑搭建了 380 V 实物实验平台，装置及系统的布设分别如图 16 和图 17 所示，含 1 条馈线，1 台高压直流侧极间中点接地的 380 V 的 MMC 型电能路由器样机，实验系统参数如表 4 所示。



图 16 实物实验平台主要组成
Fig. 16 Main components of physical experiment platform

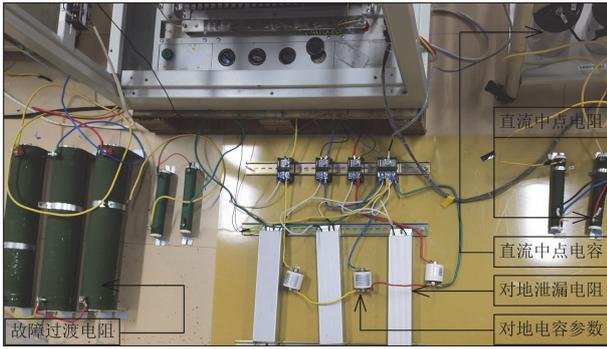


图 17 实物实验系统主要线路连接方式

Fig. 17 Main circuit connection of physical experiment system

表 4 含 PR 的 380 V 配电网实物实验系统平台参数

Table 4 Physical experiment system parameters of 380 V distribution network with PR

参数	数值
系统额定电压 U_N	380 V
馈线数量 n	1 条
三相线路总对地电导 G_2	1.0×10^{-2} S
三相线路总对地电容 C_2	60 μ F
电源侧 Yd 变压器变比	380 V/380 V
高压级 MMC 直流侧接地电容 C_1	1500 μ F
故障过渡电阻 R_f	15、60、140 Ω
故障点位置	F2

实物实验平台主要由交流线路、电能路由器、直流侧接地柜等组成。电源通过 Yd 接线变压器向实验系统供电, 电能路由器接入三相交流线路, 交流线路与直流侧电容中点相连, 用滑动变电阻作为单相接地故障过渡电阻, 改变过渡电阻值, 对多种工况下基于电能路由器的故障柔性降压消弧方法进行验证。

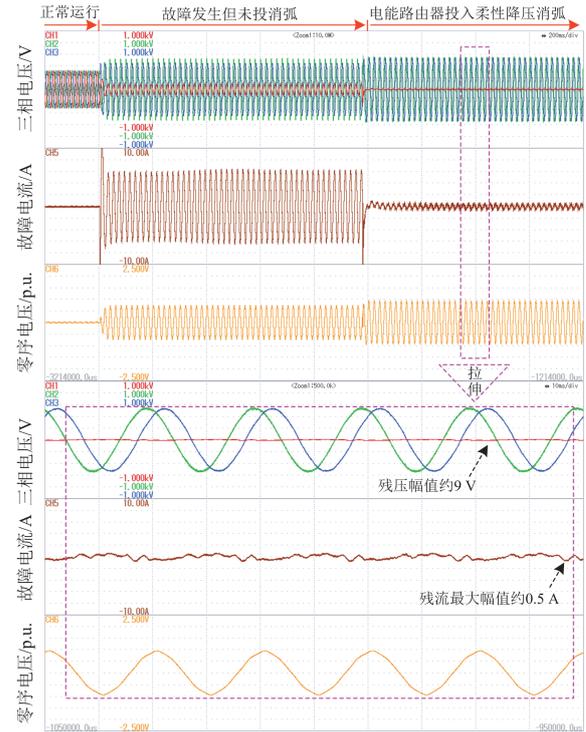
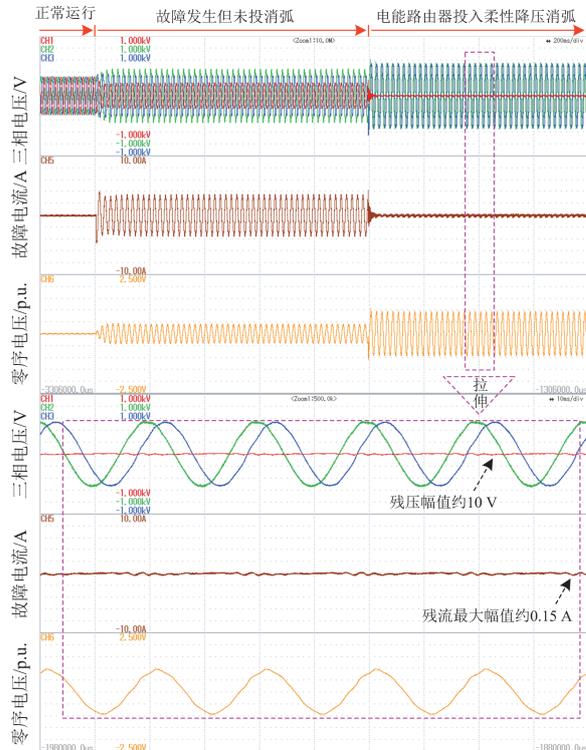
5.2 实物平台实验结果

在本文所设计的 380 V 实物实验平台中, 分别设置过渡电阻为 15、60、140 Ω 的 C 相单相接地故障, 并监测三相电压、故障电流和零序电压。实验所得波形分别如图 18—图 20 所示。

由图 18 可看出, 系统在正常运行状态下, 三相电压对称, 无故障电流, 也无系统零序量, 表明电能路由器接入电网后不影响系统正常稳定运行。

当发生过渡电阻为 15 Ω 的单相接地故障后, 在 PR 柔性降压消弧控制投入之前, 系统出现较大零序电压, 其幅值约为 0.8 p.u., 故障电流幅值约为 6 A; 故障相电压幅值自然降至约 90 V, 同时健全相电压自然升高但不至于高到约 537 V 的系统线电压峰值, 说明含电能路由器接入的配电网故障特征未发生变化。

PR 投入消弧控制后, 零序电压幅值升至 1 p.u.,

图 18 过渡电阻为 15 Ω 的实物实验波形Fig. 18 Physical experimental waveform with a 15 Ω transition resistance图 19 过渡电阻为 60 Ω 的实物实验波形Fig. 19 Physical experimental waveform with a 60 Ω transition resistance

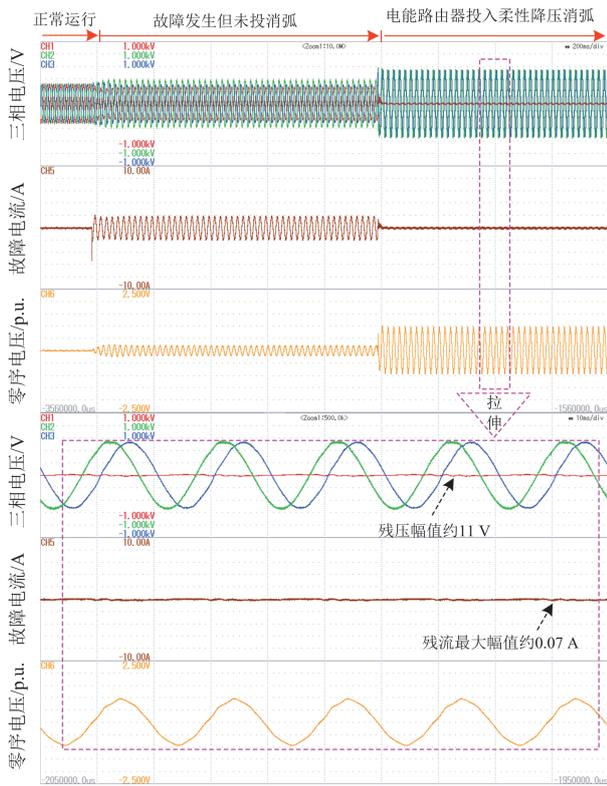


图 20 过渡电阻为 $140\ \Omega$ 的实物实验波形
Fig. 20 Physical experimental waveform with
a $140\ \Omega$ transition resistance

表明 PR 已成功将系统零序电压调控至与该相电源电动势幅值相等, 达到了调控目标; 故障点电流幅值降到约 $0.5\ \text{A}$, 故障相电压幅值降到约 $9\ \text{V}$, 均在重燃条件以下, 表明所提基于 PR 的接地消弧原理的可行性。

当发生接地过渡电阻为 $60\ \Omega$ 的接地故障时, 若未投入消弧, 系统出现幅值约 $0.5\ \text{p.u.}$ 的零序电压, 故障点流过幅值约为 $3\ \text{A}$ 的故障电流; 故障相电压幅值会降到约 $200\ \text{V}$, 未降到接近零, 健全相电压会有所升高但不至于高到线电压峰值, 同样说明含电能路由器接入的配电网故障特征不变。

电能路由器投入所提柔性降压消弧控制后, 系统零序电压升至 $1\ \text{p.u.}$, 故障电流幅值降至约 $0.15\ \text{A}$; 故障相电压幅值降至约 $10\ \text{V}$, 健全相电压幅值升至 $537\ \text{V}$ 。验证了所提基于电能路由器的柔性降压消弧原理的正确性和方法的有效性。

由图 20 同样可看出, 电能路由器投入所提柔性降压消弧控制前后, 系统零序电压幅值由约 $0.25\ \text{p.u.}$ 升至 $1\ \text{p.u.}$, 故障电流幅值由 $2\ \text{A}$ 降至约 $0.07\ \text{A}$; 故障相电压幅值由约 $300\ \text{V}$ 降至幅值约 $11\ \text{V}$, 健全相电压幅值升至线电压约 $537\ \text{V}$ 。同样验证了所提基

于电能路由器的配电网故障柔性降压消弧原理的正确性和方法的有效性。

结合图 18—图 20 亦可看出, 本文所提消弧控制投入时, 所调控的电流电压都在一个周波内达到所期稳态, 说明本文零轴调控所采用的控制器响应时间快, 跟踪精度高。同时, 通过对比分析图 18—图 20 亦可得, 对不同过渡电阻的接地故障, 本文所提原理和方法均能有效消弧。

6 结论

本文针对含 MMC 型电能路由器并入的新型配电网, 提出了基于电能路由器高压级零轴调控的配电网柔性降压消弧方法, 采用 PIR 调控零轴分量。该方法在各工况下均能有效可靠熄弧。其消弧能量的直接来源是电能路由器高压级直流母线, 消弧容量大且可控, 无需额外再配置消弧电源。该方法可使用既有故障检测和选相装置的结果, 且避免了在线精确跟踪补偿对地电流和测量配电网对地参数的困难, 解决了有功电流补偿的难题。同时, 因电能路由器具有即插即用、桥相解耦等优势, 本文所提消弧方法操作较易, 消弧时既不影响正、负序等控制, 又不影响 PR 各端口的正常运行和供电, 具有良好的操作性和适应性, 利于促进配网供电品质, 工程应用前景广阔。

参考文献

- [1] 彭沙沙, 曾祥君, 喻琨, 等. 基于二次注入的配电网接地故障有源电压消弧方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 142-149.
PENG Shasha, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. Active arc-suppression method of grounding fault for distribution network based on secondary injection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 142-149.
- [2] 霍建彬, 李巍, 周歧林, 等. 基于零序导纳的消弧线圈接地系统馈线单相断线故障保护方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(5): 117-124.
HUO Jianbin, LI Wei, ZHOU Qilin, et al. Feeder single-phase disconnection fault protection method of arc suppression coil grounding system based on zero sequence admittance[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(5): 117-124.
- [3] 韩兆儒, 石访, 张恒旭, 等. 考虑电容投切扰动的配电网高阻接地故障检测方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(21): 180-191.
HAN Zhaoru, SHI Fang, ZHANG Hengxu, et al. High-impedance grounding fault detection method for distribution network considering capacitor switching disturbance[J].

- Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(21): 180-191.
- [4] 刘健, 张薛鸿, 张小庆, 等. 预防电缆沟起火的小电流接地系统单相接地故障处理[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 21-29.
LIU Jian, ZHANG Xuehong, ZHANG Xiaoqing, et al. Treatment of a single-phase grounding fault in a small current grounding system to prevent fire in a cable trench[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 21-29.
- [5] 郭亮, 屈新宇, 王晓卫, 等. 基于改进 Hough 变换的消弧线圈接地配电网故障选线新方法[J]. 中国电力, 2024, 57(7): 132-142.
GUO Liang, QU Xinyu, WANG Xiaowei, et al. A novel fault feeder selection method for resonant grounding distribution networks based on improved Hough transform[J]. Electric Power, 2024, 57(7): 132-142.
- [6] 尹项根, 王义凯, 谭力铭, 等. 基于双频有源调控的大型机组定子接地故障电弧抑制及自适应保护[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 1-9.
YIN Xianggen, WANG Yikai, TAN Liming, et al. Dual-frequency active regulation-based arc suppression and adaptive protection for a stator ground fault in large generators[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 1-9.
- [7] 喻锬, 倪聪, 曾祥君, 等. 中性点柔性接地配电网故障相恢复电压暂态时域特征分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(3): 992-1007.
YU Kun, NI Cong, ZENG Xiangjun, et al. Analysis of transient time domain characteristics of fault phase recovery voltage in neutral flexible grounding distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(3): 992-1007.
- [8] HOU Yuchao, GUO Qi, TU Chunming, et al. Adaptive active voltage-type arc suppression strategy considering the influence of line parameters in active distribution network[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(5): 4799-4808.
- [9] 李广, 薛永端, 徐丙垠, 等. 小电流接地系统接地故障电弧重燃暂态特征分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 189-196.
LI Guang, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. Analysis on arc re-ignition transient characteristics for grounding fault in non-solidly grounding system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 189-196.
- [10] WANG Yikai, YIN Xianggen, XU Wen, et al. Active arc suppression algorithm for generator stator winding ground fault in the floating nuclear power plant[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(6): 5356-5365.
- [11] 周兴达, 陆帅. 一种基于消弧线圈和静止同步补偿器协同作用的配电网消弧结构与方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1251-1262.
ZHOU Xingda, LU Shuai. An arc-suppression method based on the coordinated operation of the Petersen coil and the static synchronous compensator in distribution networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1251-1262.
- [12] 唐轶, 陈奎, 陈庆, 等. 单相接地故障全电流补偿的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(5): 558-562.
TANG Yi, CHEN Kui, CHEN Qing, et al. Research on the full current compensation of one-phase-to-ground fault[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(5): 558-562.
- [13] 郭谋发, 张伟骏, 高伟, 等. 基于级联 H 桥变流器和 dq 变换的配电网故障柔性消弧方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(24): 240-251.
GUO Moufa, ZHANG Weijun, GAO Wei, et al. Fault flexible arc suppression approach based on cascaded H-bridge converters and dq coordinate transformation for distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(24): 240-251.
- [14] 曲铁龙, 董一脉, 谭伟璞, 等. 基于单相有源滤波技术的新型消弧线圈的研究[J]. 继电器, 2007, 35(3): 29-33.
QU Yilong, DONG Yimai, TAN Weipu, et al. Research on new type arc-suppression coil based on single-phase active power filter technology[J]. Relay, 2007, 35(3): 29-33.
- [15] 王宇波, WINTER K. 接地故障中和器全补偿技术及应用[J]. 供用电, 2015, 32(6): 24-29.
WANG Yubo, WINTER K. Introduction and application of ground fault neutralizer full-compensation technology[J]. Distribution & Utilization, 2015, 32(6): 24-29.
- [16] 薛永端, 李广, 徐丙垠. 利用熄弧后暂态信息测量谐振接地系统的对地电容[J]. 电工技术学报, 2020, 35(7): 1521-1528.
XUE Yongduan, LI Guang, XU Bingyin. Measuring method of capacitance to ground in resonant grounding system based on transient information after arc extinguishing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(7): 1521-1528.
- [17] 李理, 喻锬, 曾祥君, 等. 基于发电机定子接地燃弧电阻变化特征的主动降压熄弧机理与抑制方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(17): 5379-5393.
LI Li, YU Kun, ZENG Xiangjun, et al. Mechanism and suppression method of active arc extinguishing based on the variation characteristics of arc resistance of stator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024,

- 39(17): 5379-5393.
- [18] 陈锐, 陈朵红, 张健, 等. 配电网柔性接地装置电压控制方法研究[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(2): 3-10.
CHEN Rui, CHEN Duohong, ZHANG Jian, et al. Research on voltage control method of flexible grounding device in distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(2): 3-10.
- [19] 刘健, 田晓卓, 李云阁, 等. 主动转移型熄弧装置长馈线重载应用问题分析[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 1105-1110.
LIU Jian, TIAN Xiaozhuo, LI Yunge, et al. Application analysis of active transfer type arc-extinguishing device under long feeder line and heavy load[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 1105-1110.
- [20] 曾祥君, 卓超, 喻轹, 等. 基于接地变压器绕组分档调压干预的配电网主动降电压消弧与保护新方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1523-1533.
ZENG Xiangjun, ZHUO Chao, YU Kun, et al. A novel method of faults arc extinguishing and feeder protection based on voltage regulating intervention with grounding transformer winding taps for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1523-1533.
- [21] 宋国兵, 王婷, 张晨浩, 等. 利用健全极 MMC 注入特征信号的直流线路故障性质判别方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 994-1003.
SONG Guobing, WANG Ting, ZHANG Chenhao, et al. DC line fault identification based on characteristic signal injection using the MMC of sound pole[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 994-1003.
- [22] JIANG Lang, CHEN Wei, CHEN Yiming, et al. Resilient control strategy based on power router for distribution network with renewable generation[C] // IET Conference Proceedings, October 14-15, 2021, Beijing, China: 1178-1185.
- [23] 郭谋发, 游建章, 张伟骏, 等. 基于三相级联 H 桥变流器的配电网接地故障分相柔性消弧方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 11-22.
GUO Moufa, YOU Jianzhang, ZHANG Weijun, et al. Separate-phase flexible arc-suppression method of earth-fault in distribution systems based on three-phase cascaded H-bridge converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 11-22.
- [24] 郭谋发, 刘鑫斌, 张彬隆, 等. 故障相桥臂转移接地消弧装置直流侧电压控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(19): 1-14.
GUO Moufa, LIU Xinbin, ZHANG Binlong, et al. DC-link voltage control method of a fault phase bridge arm transfer grounding arc suppression device[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(19): 1-14.
- [25] 黄泽钧, 郭祺, 涂春鸣, 等. 基于轮换消弧的配电网单相接地故障柔性调控方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(24): 152-161.
HUANG Zejun, GUO Qi, TU Chunming, et al. Flexible regulation method of single-phase grounding fault in distribution network based on rotating arc suppression[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 152-161.
- [26] LI Yuze, PEI Xuejun, YANG Min, et al. An advanced fault control of transformerless modular multilevel converters in AC/DC hybrid distribution networks under the single-phase grounding fault[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 932-942.
- [27] LI Zhenxing, WAN Jialing, WANG Pengfei, et al. A novel fault section locating method based on distance matching degree in distribution network[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(2): 253-263.
- [28] 赖锦木. 交直流配电网模块化多电平电路由器结构和控制策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
LAI Jinmu. Research on topology and control strategies of modular multilevel electric energy router in AC/DC distribution grids[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [29] FALCONES S, MAO Xiaolin, AYYANAR R. Topology comparison for solid state transformer implementation[C] // IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 25-29, 2010, MN, USA: 1-8.

收稿日期: 2024-11-11; 修回日期: 2025-02-21

作者简介:

江浪(1989—), 男, 工学博士, 当前研究方向为电力系统保护与控制、配电网故障处理与防灾(如安全快速消弧与电气防火减灾等)、电力电子技术与应用等; E-mail: eejiang@hust.edu.cn

尹项根(1954—), 男, 工学博士, 博导, 教授, 中国电机工程学会会士, 研究方向为电力系统及其自动化、电力系统继电保护与安全稳定控制、电力电子与光电技术及其电气应用等; E-mail: xgyin@hust.edu.cn

赖锦木(1990—), 男, 通信作者, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统控制、电力电子技术及其在电力系统中的应用; E-mail: laijinmu@zzu.edu.cn

文明浩(1973—), 男, 工学博士, 教授, 博导, 研究方向为电力系统保护与控制、故障仿真与状态监测和电力电子技术等。E-mail: swenmh@hust.edu.cn

(编辑 周金梅)