

引用格式:唐立军,钱信君,刘红文,等.基于站内资源的新型无功功率支撑与接地故障调控复合装置[J].电力科学与技术学报,2025,40(2):186-195.

Citation: TANG Lijun, QIAN Xinjun, LIU Hongwen, et al. A novel reactive power support and grounding fault control composite device based on station resources[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(2): 186-195.

基于站内资源的新型无功功率支撑与 接地故障调控复合装置

唐立军¹, 钱信君², 刘红文¹, 涂春鸣², 黄泽钧², 郭 祺²

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南昆明 650217; 2. 湖南大学国家电能变换与控制工程技术研究中心, 湖南长沙 410082)

摘要: 凭借兼具无功功率支撑 (reactive power support, RPS) 与接地故障调控 (grounding fault control, GFC) 能力, 复合装置得到广泛关注。但是, 现有复合装置存在容量过高、需要额外附加供电装置的问题。针对上述问题, 基于充分利用既有站内资源的思想, 提出一种基于站内资源的新型无功功率支撑与接地故障调控复合装置 (RPS and GFC composite device, RGCD)。首先, 介绍 RGCD 的拓扑结构与运行原理, RGCD 由站内电容器、站内消弧线圈和多功能变流器 (multi-functional converter, MC) 构成, 当电网正常运行时, 站内电容器补偿负荷所需的大部分无功功率, 剩余部分由 MC 进行补偿; 当发生单相接地故障时, 站内电容器进行无功补偿, 站内消弧线圈和 MC 进行接地故障调控, 在不同运行模式下均实现了 MC 容量降低。其次, 分析接地故障调控期间的能量流动机理, 并提出基于直流侧电压稳定的 P-Q 两相消弧方法, 实现免供电装置下 RGCD 的稳定运行。最后, 通过仿真验证了所提拓扑及运行原理的有效性与可行性。

关键词: 有源消弧; 单相接地故障; 消弧线圈; 站内电容器; 多功能变流器

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.02.020 中图分类号: TM726.1 文章编号: 1673-9140(2025)02-0186-10

A novel reactive power support and grounding fault control composite device based on station resources

TANG Lijun¹, QIAN Xinjun², LIU Hongwen¹, TU Chunming², HUANG Zejun², GUO Qi²

(1. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China; 2. National Electric Power Conversion and Control Engineering Technology Research Center, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Owing to the ability of both reactive power support (RPS) and grounding fault control (GFC), composite devices have attracted extensive attention. However, most existing composite devices have some disadvantages, such as high capacity and the need for additional power supply devices. To address these problems, a novel RPS and GFC composite device (RGCD) is proposed in this paper from the idea of making full use of existing station resources. Firstly, the topology and the operation principle of RGCD are introduced. The RGCD is composed of the capacitor and the arc suppression coil in the station and the multi-functional converter (MC). When the distribution network is in normal operation, most of the reactive power required by the load is compensated by the capacitor in the station, and the remaining reactive power is compensated by the MC. When the single-phase grounding fault occurs, the reactive power can still be compensated by the capacitor in the station, and the grounding fault is controlled by the arc suppression coil in the station and the MC. In brief, the capacity of the MC is decreased under different operating modes. In addition, the energy flow mechanism during GFC is analyzed in detail, and a P-Q two-phase arc suppression method based on DC-side voltage stability is proposed, which realizes the stable operation of RGCD without additional power supply devices.

收稿日期: 2024-01-12; 修回日期: 2024-09-29

基金项目: 中国南方电网公司科技项目 (0562002023030301PD00015); 国家自然科学基金 (52077072)

通信作者: 钱信君 (1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统电力电子装备方面的研究; E-mail: qianxj2021@163.com

The simulation results demonstrate the effectiveness and feasibility of the proposed topology and regulation strategy.

Key words: active arc suppression; single-phase grounding fault; arc-suppression coil; capacitor in station; multi-function converter

配电网是构建新型电力系统的重要组成部分,其结构复杂且接地故障频发,其中单相接地故障占比约80%^[1-4]。随着新型电缆化改造与分布式资源渗透率提升,接地故障电流中的无功、有功和谐波分量呈现复杂交织特性且幅值显著增加^[5-6]。传统无源消弧装置仅能补偿无功分量,导致接地电弧难以自熄,极易引发森林火灾、人身触电等安全事故^[7-8]。因此,新型配电网亟待提升接地故障主动调控能力。

基于电力电子技术的有源消弧装置(active arc suppression device, AASD)可实现对无功、有功及谐波分量的全补偿,从而提升故障调控可靠性。按功能划分,现有装置包括单一功能消弧装置(single-functional arc suppression device, SASD)与多功能复合装置(multi-functional composite device, MFCD)。其中,SASD通过调节中性点电压可实现98%的电弧抑制率^[9-11],但其仅在故障期间投运,设备利用率低下。

为提升设备利用率,兼具无功功率支撑(reactive power support, RPS)与接地故障调控(grounding fault control, GFC)能力的MFCD成为研究热点^[12-18]。以三相级联H桥(Three-Phase Cascaded H-Bridge)为主拓扑的多功能变流器(multi-functional converter, MC)为例,MFCD可在电网故障时调控接地电流,正常运行时支撑无功功率,显著提高设备利用率。文献[13-14]提出了基于隔离开关接地的MFCD方案,但其故障期间MC需耐受线电压(典型值10 kV),导致器件数量与成本剧增。文献[15-16]提出MC经消弧线圈接地的改进方案,利用消弧线圈分压使MC耐受电压降至相电压(5.77 kV),但MC需全额补偿无功功率,容量冗余仍导致成本过高。文献[17-18]进一步提出基于单相级联H桥的紧凑型MFCD方案,虽提升了功率密度,但需附加供电装置以抑制有功分量,且全功率半导体器件推高了成本。综上,现有MFCD方案在容量优化与成本控制方面仍存在瓶颈。

为了解决上述问题,基于充分利用既有站内资源的思想,本文提出了一种新型无功功率支撑与接地故障调控复合装置(RPS and GFC composite device, RGCD)。RGCD通过充分发挥站内资源的单

元容量大、改造成本低的优势,仅需新增小容量的MC即可构建高性价比的新型复合装置。本文首先阐述RGCD拓扑结构及运行原理,介绍无功补偿模式与故障调控模式下RGCD的拓扑连接情况与运行原理。其次,通过分析接地故障调控期间的能量流动机理,提出了基于直流侧电压稳定的P-Q两相消弧方法,实现了免供电装置下RGCD的稳定运行。再次,通过对所提复合装置与既有复合装置的MC容量、装置成本、装置损耗、设备利用率、站内资源利用率方案进行量化分析,证明所提方案具备MC容量低、损耗小等优势。最后,搭建了MATLAB/Simulink仿真模型验证了所提方案的有效性与可行性。

1 RGCD 拓扑结构

本文所提RGCD拓扑结构如图1所示。MC为星形连接的三相级联H桥,其中性点经消弧线圈串联接地。图1中: $\dot{E}_a, \dot{E}_b, \dot{E}_c$ 分别为A、B、C三相电网电压; $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ 分别为A、B、C三相并网点电压; r_{0a}, r_{0b}, r_{0c} 分别为A、B、C三相线路对地电阻; C_{0a}, C_{0b}, C_{0c} 分别为A、B、C三相线路对地电容; L_{fa}, L_{fb}, L_{fc} 分别为MC的A、B、C三相滤波电感; L_0 为消弧线圈电感; C_1, C_2, C_3 为3组站内电容器; R_f 为接地故障电阻。

该装置由MC和站内资源组成,其中站内资源包括站内电容器单元和站内消弧线圈单元。MC采用三相结构,每相由多个单相H桥级联而成;站内电容器单元由三相分组电容器构成,每个分组电容器均包括3个并联的电容器以及投切开关 k_j ,其

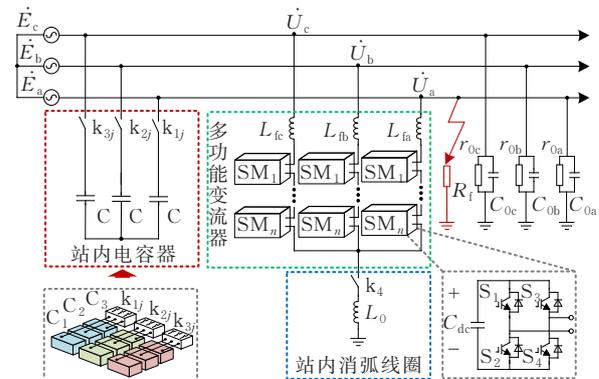


图1 RGCD 拓扑结构

Figure 1 Topology of RGCD

中, $i(1,2,3)$ 为电容器的组号, $j(1,2,3)$ 为电容器在当前组的序号; 站内消弧线圈单元包括消弧线圈以及开关 k_4 。

2 RGCD 工作原理

RGCD 工作原理如图 2 所示, RGCD 具备 2 种工作模式, 无功补偿模式: 在电网正常运行时, k_4 断开。故障调控模式: 在电网发生接地故障时, k_4 闭合。RGCD 依据待补偿无功功率大小决定 k_{1j} 、 k_{2j} 、 k_{3j} 开关状态。

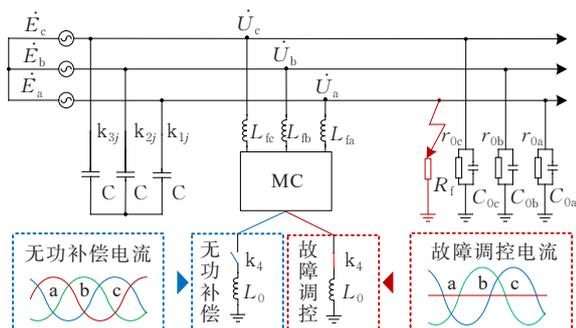


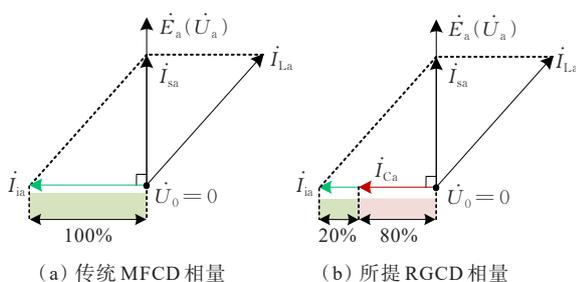
图 2 RGCD 工作原理

Figure 2 Operation principle diagram of RGCD

2.1 无功补偿模式

传统 MFCD 运行于无功补偿模式时, MC 直接补偿负荷所需的全部无功功率, 增加了 MC 容量需求, 如图 3(a) 所示; 所提 RGCD 运行于无功补偿模式时, 以 A 相为例, 站内电容器电流 \dot{I}_{ca} 、MC 输出电流 \dot{I}_{ia} 与负载电流 \dot{I}_{La} 的相量和等于网侧电流 \dot{I}_{sa} , 电网运行于单位功率因数状态, 如图 3(b) 所示。因此, 站内电容器与 MC 协同运行机制下, 站内电容器补偿大部分无功功率, MC 补偿剩余无功功率, 显著降低了 MC 容量需求。

RGCD 动作流程如下: 先检测电网电压信号和电流信号, 计算线路功率因数角。然后, 如果线路功率因数角低于阈值, RGCD 依据待补偿无功功率



(a) 传统 MFCD 相量

(b) 所提 RGCD 相量

图 3 无功补偿模式的相量

Figure 3 Phasor diagram of reactive power compensation

投入站内分组电容器, 为负荷提供无功功率补偿。站内电容器部分再按照“分层分区, 就地平衡”的原则, 以三相共补方式分组投入站内电容器进行无功补偿^[19]。最后, 当站内电容器全部投入运行后, 剩余的无功功率由 MC 提供。

2.2 故障调控模式

电网发生单相接地故障时, RGCD 工作于故障调控模式, 站内消弧线圈和 MC 进行接地故障调控。

假设 A 相发生单相接地故障, MC 的 A 相支路退出运行, 非故障相支路和站内消弧线圈协同配合向配电网注入故障调控电流。此时, 三相线路对地电流 \dot{I}_{0a} 、 \dot{I}_{0b} 、 \dot{I}_{0c} 可分别表示为

$$\begin{cases} \dot{I}_{0a} = 0 \\ \dot{I}_{0b} = (\dot{E}_b - \dot{E}_a) \left(\frac{1}{r_{0b}} + j\omega C_{0b} \right) \\ \dot{I}_{0c} = (\dot{E}_c - \dot{E}_a) \left(\frac{1}{r_{0c}} + j\omega C_{0c} \right) \end{cases} \quad (1)$$

结合式 (1) 可得故障调控电流 \dot{I}_z 为

$$\dot{I}_z = -\dot{E}_a \left(\sum_{i=a,b,c} \frac{1}{r_{0i}} + \sum_{i=a,b,c} j\omega C_{0i} \right) \quad (2)$$

此时, 站内消弧线圈承担电压 \dot{U}_{L0} 为

$$\dot{U}_{L0} = j\omega L_0 \dot{I}_z \quad (3)$$

MC 非故障相支路的输出电压 \dot{U}_{ib} 、 \dot{U}_{ic} 分别为

$$\begin{cases} \dot{U}_{ib} = (\dot{E}_b - \dot{E}_a) - \dot{U}_{L0} \\ \dot{U}_{ic} = (\dot{E}_c - \dot{E}_a) - \dot{U}_{L0} \end{cases} \quad (4)$$

站内消弧线圈承担了感性电压, 从而降低 MC 的非故障相支路的输出电压, 达到降低 MC 容量的效果, 如图 4 所示。

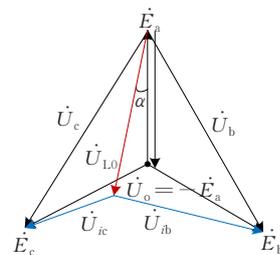


图 4 故障调控模式的相量

Figure 4 Phasor diagram of fault control mode

3 RGCD 控制策略

本节通过分析接地故障调控期间的能量流动机理, 提出了一种基于直流侧电压稳定的 P-Q 两相消弧方法, 实现了免供电装置下 RGCD 的稳定可靠运行。

3.1 两相消弧能量流动机理

假设 A 相发生单相接地故障,MC 的 A 相支路退出运行,非故障相支路共同向电网注入故障调控电流 $\dot{I}_z^{[12]}$,其相量关系如图 5 所示。其中, \dot{I}_{zb} 、 \dot{I}_{zc} 分别为 MC 的 B 相和 C 相支路的输出电流; α 为线路对地电阻和电容的夹角,可表示为 $\alpha = \arctan(1/\omega C_0 r_0)$ 。

根据图 5 可得,非故障相支路输出的零序有功功率 P_{zbc} 和无功功率 Q_{zbc} 为

$$\begin{cases} P_{zbc} = -2EI_z \sin \alpha \\ Q_{zbc} = 2EI_z \cos \alpha \end{cases} \quad (5)$$

采用两相消弧方法的零序功率流如图 6 所示。当采用两相消弧方法时,MC 需要同时输出有功功率和无功功率。因此,其直流侧需要接入附加供电设备,进而维持直流侧电压的稳定。

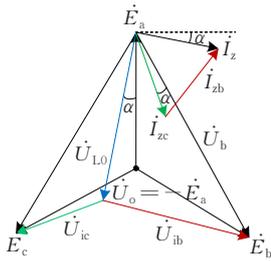


图 5 两相消弧方法相量

Figure 5 Phasor diagram of two-phase arc-suppression method

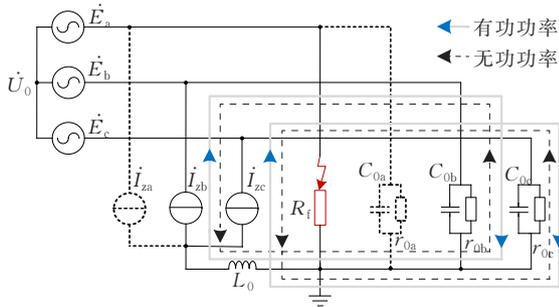


图 6 两相消弧方法零序功率流

Figure 6 Zero-sequence power flow diagram of two-phase arc-suppression method

3.2 P-Q 两相消弧能量流动机理

针对该问题,本文提出一种 P-Q 两相消弧方法,通过控制 MC 仅输出零序无功功率,即可实现接地故障电流的完全补偿,实现了免供电装置下 RGCD 稳定可靠运行。

P-Q 两相消弧方法下,非故障相支路零序有功功率 P'_{zbc} 和无功功率 Q'_{zbc} 可分别表示为

$$\begin{cases} P'_{zbc} = 0 \\ Q'_{zbc} = 2EI_z \cos \alpha \end{cases} \quad (6)$$

因此,非故障相支路补偿零序无功功率,电网侧补偿零序有功功率,零序功率流如图 7 所示。

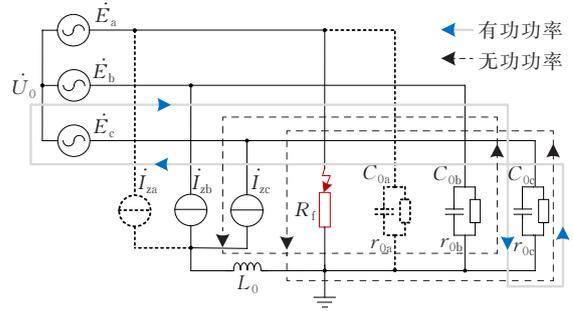


图 7 P-Q 两相消弧方法零序功率流

Figure 7 Zero-sequence power flow diagram of P-Q two-phase arc-suppression method

3.3 RGCD 控制策略

本文所提 RGCD 控制策略如图 8 所示,该控制策略基于分层控制思想构建^[20-21],主要包含如下 4 个部分:

- 1) 全局电压环。其主要目标是以 MC 三相变流器为控制对象,控制其从网侧吸收有功功率,维持 MC 运行于不同模式下的无功功率输出;
- 2) 局部电压环。其主要目标是以 MC 各相支路为控制对象,控制其实现相内无功功率分配,保证每个 H 桥的直流侧电压稳定;
- 3) 电流内环。其主要目标是避免低频谐波传递,在电流内环中引入 PR 控制器,跟踪工频交流分量,提升交流侧电能质量;

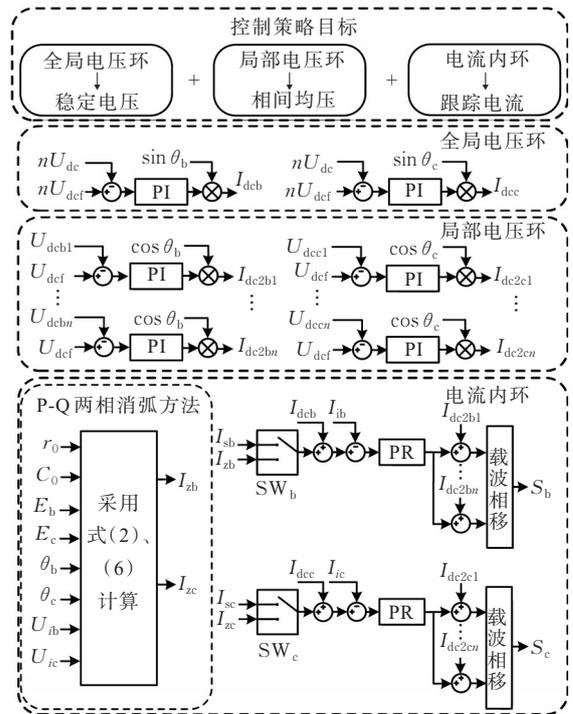


图 8 RGCD 控制策略

Figure 8 RGCD control strategy

4) P-Q两相消弧控制。其主要目标是根据式(2)、(6)控制MC输出功率,保证MC在故障调控模式下仅吸收无功功率,电网侧仅输出有功功率。

4 参数设计及方案对比

4.1 RGCD参数设计

4.1.1 站内电容器参数设计

依据RGCD总无功容量 Q 的80%配置站内电容器无功容量,分组式站内电容器的容量值按照等比级数分配。分组式站内电容器 C_1 、 C_2 、 C_3 参数设计应满足:

$$\begin{cases} C_1 = \frac{Q}{7\omega E^2} \\ C_2 = \frac{2Q}{7\omega E^2} \\ C_3 = \frac{4Q}{7\omega E^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中, E 为电网相电压有效值; ω 为角频率。

4.1.2 站内消弧线圈参数设计

针对RGCD故障调控模式的三相零序等效电路列写KVL等式得到:

$$\begin{cases} \sum_{k=a,b,c} \dot{I}_{zk}(\omega L_0) + \dot{I}_{za} \left(\omega L_{fa} + \omega L_{la} - \frac{1}{\omega C_{0a}} \right) = 0 \\ \sum_{k=a,b,c} \dot{I}_{zk}(\omega L_0) + \dot{I}_{zb} \left(\omega L_{fb} + \omega L_{lb} - \frac{1}{\omega C_{0b}} \right) = 0 \\ \sum_{k=a,b,c} \dot{I}_{zk}(\omega L_0) + \dot{I}_{zc} \left(\omega L_{fc} + \omega L_{lc} - \frac{1}{\omega C_{0c}} \right) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中, $L_{lk}(k=a,b,c)$ 为线路等效电抗值; $\dot{I}_{zk}(k=a,b,c)$ 为变流器输出的消弧电流。

为简化分析,假设 $L_{la}=L_{lb}=L_{lc}=L_l$, $L_{fa}=L_{fb}=L_{fc}=L_f$, $C_{0a}=C_{0b}=C_{0c}=C_0$ 。联立式(2)、(8),得到的消弧线圈电感值最优取值为

$$L_0 = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{\omega^2 C_0} - L_l - L_f \right) \quad (9)$$

4.1.3 滤波电感 L_{fb} 参数设计

MC相电流有效值 I_{ph} 可表示为

$$I_{ph} = \frac{S}{\sqrt{3} U_1} \quad (10)$$

式中, S 为装置额定容量; U_1 为电网线电压有效值, $U_1=10$ kV。

滤波电感标么值 X_L^* 以0.15进行选取^[22],滤波电感等效电感值 L_{fb} 可表示为

$$L_{fb} = \frac{X_L^* Z_b}{\omega} = \frac{X_L^*}{\omega} \cdot \frac{U_1}{\sqrt{3} I_{ph}} = \frac{X_L^* U_1^2}{\omega S} \quad (11)$$

4.1.4 直流侧电容 C_{dc} 参数设计

考虑器件电压应力,以 $(NI/\omega C_{dc})=U$ 为约束选取直流侧电容电压,则直流侧电容取值为

$$C_{dc} = \frac{3NS}{2\omega U_1^2} \quad (12)$$

4.2 方案对比

下面将本文方案与几种既有方案进行对比:①MC经隔离开关接地的MFCD^[12];②MC经单相级联H桥接地的MFCD^[16];③中性点经单相级联H桥接地的SASD^[23];④本文所提RGCD。首先对上述方案的装置容量与子模块电压等级进行统一:装置额定容量 $S=2$ MVar,直流侧电压 $U_{dc}=800$ V,开关频率 $f=10$ kHz。该方案与RGCD功能及器件数目对比如表1所示。

表1 不同方案功能及器件数目对比

Table 1 Comparison of functions and device numbers among different schemes

对比类型	功能种类	各桥臂级 NGTB25N1		电容数目	供电装置
		联数	20FL3WG		
方案①	少	18	216	54	有
方案②	多	11	176	44	无
方案③	少	11	44	11	有
RGCD	多	11	132	33	无

由表1可得,在相同子模块电压等级选型下,RGCD相比于方案①增添无功补偿功能,可减少39%功率器件数目、39%电容数目;相比于方案②降低了功率器件耐流要求,可减少25%功率器件数目、25%电容数目;其相比较方案③增添了无功补偿功能,不需要整流器、变压器等供电装置。虽然RGCD相比于方案①、方案②增添了消弧线圈和电容器,但是其均属于既有站内资源,无需额外采购。

为了量化分析,从有源部分容量、装置成本、装置损耗、设备利用率、站内资源利用率等5个方面对上述4种方案进行对比分析,结果如图9所示。

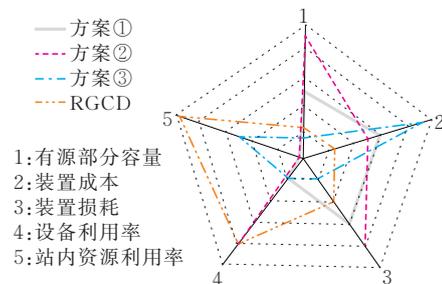


图9 不同方案量化对比

Figure 9 Quantitative comparison of different schemes

在有源部分容量方面,根据表 1 可计算得到,方案①~③和 RGCD 有源部分容量分别为 75.38、139.04、30.71、46.1 kW (NGTB25N120FL3 WG 容量源于官方数据,为 349 W)。对比既有方案①、②而言,RGCD 可分别减少 39%、67% 有源部分容量。

在装置成本方面,根据表 1 可计算得到,方案①~③、RGCD 所需功率器件成本分别为 11 379、9 271、2 317、6 954 元(NGTB25N120FL3WG 成本源于官方数据,为 52.68 元)。相比于既有方案①、②,RGCD 可减小 39%、25% 功率器件成本。相比于方案③,虽然本文所提装置功率器件成本较高,但是本文方案同时具备无功补偿和消弧功能,且方案充分利用站内资源,其综合成本效益更高。

在装置损耗方面,装置损耗与功率器件数量呈正相关,IGBT 的开关损耗和直流侧电压成正比,IGBT 的传输损耗随变流器输出电流呈正相关^[18]。相比于方案①、②,本文方案功率器件数量更小、无功补偿模式时变流器输出电流更小,因此本文方案损耗更小。方案③采用中性点经单相级联 H 桥方案,显著降低了功率器件数量,故其损耗最小。

在设备利用率方面,RGCD 和方案②具备消弧和无功补偿功能,电网正常运行和发生接地故障时均可投入运行,其设备利用率高于方案①、③的。

在站内资源利用率方面,与方案①、②、③相比,RGCD 充分利用了站内消弧线圈与站内电容器,站内资源利用率最高。

5 仿真验证

5.1 仿真模型及参数

为了验证 RGCD 的有效性和可行性,在 MATLAB/Simulink 仿真平台中搭建了 10 kV 配电网仿真模型,如图 10 所示。其中,馈线 L_1 为架空线路,馈线 L_2 为电缆线路,馈线 L_{31} 、 L_{32} 、 L_{41} 、 L_{42} 为电缆架

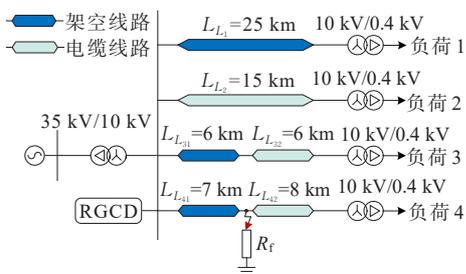


图 10 10 kV 配电系统仿真模型

Figure 10 Simulation model of 10 kV distribution system

空混合线路;系统中每条馈线负荷均为 $0.75 \text{ MV} \cdot \text{A}$,功率因数为 0.94。

本文架空、电缆线路参数如表 2 所示,线路的正序、负序参数相等。基于所搭建 10 kV 配电网仿真模型,本文主要仿真参数如表 3 所示。

表 2 架空、电缆线路参数

Table 2 Parameters of overhead and cable lines

线路类型	相序	电阻/ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	电感/ ($\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$)	电容/ ($\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$)
架空线路	正序	0.170	1.020	0.120
	零序	0.280	4.520	0.007
电缆线路	正序	0.270	0.255	0.250
	零序	2.540	1.019	0.215

表 3 主要仿真参数

Table 3 Simulation parameters

配电网电压/kV	线路对地电容 $C_0/\mu\text{F}$	线路泄漏电阻 $r_0/\text{k}\Omega$	接地故障过渡电阻 R_f/Ω	站内消弧线圈电抗值 L_0/mH
10	10	30	500	330
直流侧电容 C_{dc}/mF	站内电容器 C_1, C_2, C_3 容量/ kVar	滤波电感 L_b/mH	负载有功功率/ MW	负载功率因数
3	120, 60, 30	8	3	0.94

5.2 RGCD 不同工作模式仿真验证

为了验证 RGCD 不同工作模式下站内电容器、站内消弧线圈和 MC 的运行状态,设定了如下仿真工况:0.3 s 时,电网 A 相发生单相接地故障,0.2~0.3 s 时,RGCD 工作于无功补偿模式;0.3~0.5 s 时,RGCD 工作于故障调控模式。不同工作模式下 RGCD 仿真波形如图 11 所示。

电网电压 E_a 、电流 I_a 如图 11(a) 所示。RGCD 运行于无功补偿模式时,站内电容器补偿负荷所需大部分无功功率,剩余部分由 MC 进行补偿;RGCD 切换至故障调控模式时,站内电容器持续为电网提供无功补偿,电网持续运行于单位功率因数状态。

接地故障残流 I_f 、故障点电压 U_f 波形如图 11(b) 所示,RGCD 切换至故障调控模式后,故障点残流 $I_f \approx 0.25 \text{ A}$,故障点残压 $U_f \approx 130.40 \text{ V}$,接地故障在 100 ms 之内得到快速有效调控。

站内电容器输出电流 I_{ca} 、 I_{cb} 、 I_{cc} 波形如图 11(c) 所示,在单相接地故障前后,站内电容器承担 82.2% 无功补偿容量,有效降低了线路损耗。MC 输出电

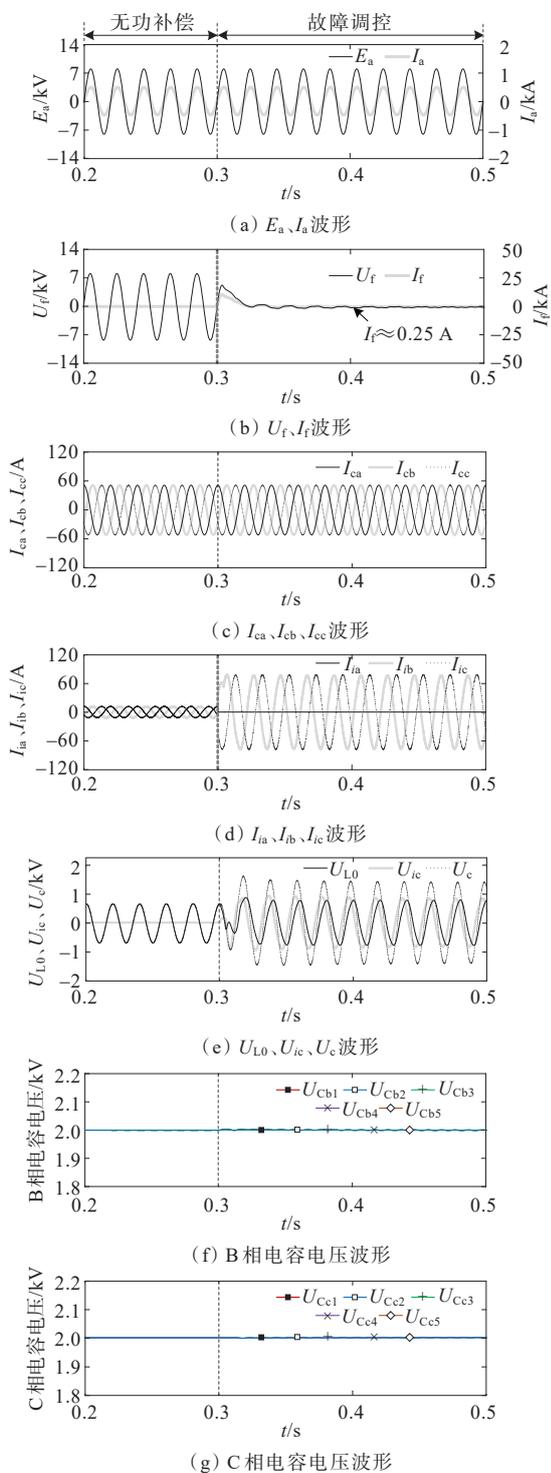


图 11 RGCD 不同工作模式仿真波形

Figure 11 Simulation waveforms in different modes of RGCD

流 I_{ia} 、 I_{ib} 、 I_{ic} 波形如图 11(d) 所示, 无功补偿模式下, MC 承担 17.8% 无功补偿容量; 故障调控模式下, MC 的故障相输出电流为 0 A, 非故障相依据 P-Q 两相消弧方法计算得到 B、C 两相注入的消弧电流分别为 $73.71 \angle -30.82^\circ \text{ A}$ 、 $75.14 \angle -149.57^\circ \text{ A}$ 。

以非故障相 C 相为例, 消弧线圈电压 U_{L0} 、MC 输出电压 U_{ic} 和总电压 U_c 波形如图 11(e) 所示。分析可知, 消弧线圈在无功补偿模式期间退出运行, 在故障调控模式期间发挥分担电压的作用。故障调控模式时, 消弧线圈电压 U_{L0} 接近中性点电压 $-E_a$, 而 MC 输出电压 U_{ic} 接近于 E_c , 消弧线圈与 MC 共同承担了总电压 U_c , 其中 U_c 接近于电网线电压 E_{ca} 。因此, 经站内消弧线圈接地可有效降低 MC 的容量。

MC 的 B 相、C 相电容电压如图 11(f)~(g) 所示, 在单相接地故障前后, 各子模块电容电压均稳定在 2 kV 附近, 确保了 MC 稳定运行与精准调控。

5.3 不同单相接地故障工况仿真验证

为进一步验证复杂故障工况下对所提 RGCD 复合装置的接地故障调控能力, 下面分别从不同线路故障位置、不同故障过渡电阻工况 2 个方面进行适应性仿真验证。

5.3.1 不同线路故障位置仿真验证

基于现有计及线路阻抗的有源消弧方法^[7], 在不同线路故障位置工况下对所提复合装置进行适应性仿真验证, 图 12 为不同线路故障位置仿真波形。如图 12(a) 所示, 当故障点位于馈线 L_2 首端时, 故障点残压 U_f 为 48.81 V, 故障点残流 I_f 为 0.18 A; 如图 12(b) 所示, 当故障点位于馈线 L_2 末端时, 故障点残压 U_f 为 24.56 V, 故障点残流 I_f 为 0.08 A。因此, 在不同线路故障位置下, RGCD 可有效调控故障残流至安全电流 5.00 A 以下。

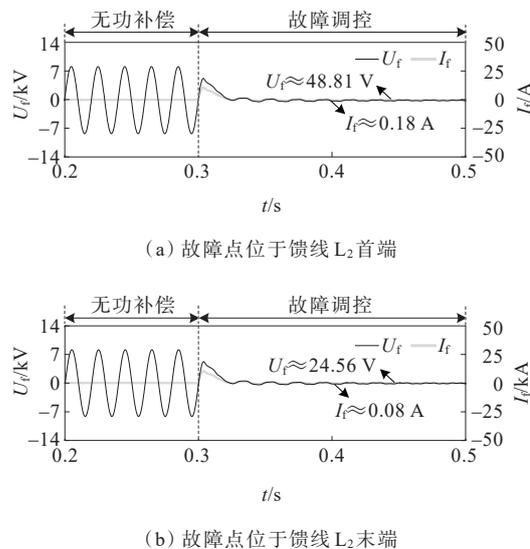


图 12 不同线路故障位置仿真波形

Figure 12 Simulation waveforms for different fault locations

5.3.2 不同故障过渡电阻仿真验证

在不同故障过渡电阻工况下对所提复合装置进行适应性仿真验证,图13为不同故障过渡电阻仿真波形。如图13(a)所示,当 $R_f=10\ \Omega$ 时,故障点残压 U_f 为13.66 V,故障点残流 I_f 为1.26 A;如图13(b)所示,当 $R_f=100\ \Omega$ 时,故障点残压 U_f 为41.67 V,故障点残流 I_f 为0.42 A;如图13(c)所示,当 $R_f=1\ 000\ \Omega$ 时,故障点残压 U_f 为144.70 V,故障点残流 I_f 为0.15 A;如图13(d)所示,当 $R_f=10\ 000\ \Omega$ 时,故障点残压 U_f 为160.05 V,故障点残流 I_f 为0.01 A。因此,对于低阻和高阻故障,RGCD可有效调控故障残流至安全电流5.00 A以下。

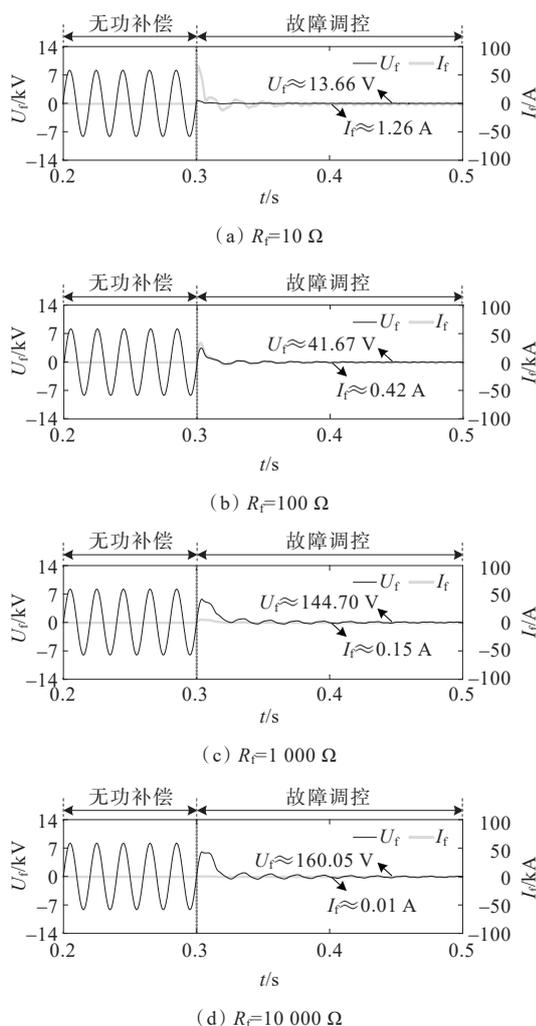


图13 不同故障过渡电阻仿真波形

Figure 13 Simulation waveforms under different fault transition resistances

6 结语

针对既有复合装置存在容量过高、需额外附

加供电装置的问题,在充分利用站内资源的基础上,本文提出了一种基于站内资源的新型无功功率支撑与接地故障调控复合装置。通过仿真验证了本文所提方案的可行性与优越性,得出结论如下:

1) 所提装置充分利用既有站内消弧线圈和电容器,仅需要在站内新增小容量的MC即可实现无功补偿功能和故障调控功能,有效降低了高成本的MC容量和功率器件数量,提高了装置工程价值。

2) 本文分析了单相接地故障调控期间系统功率流动机理,并提出了P-Q两相消弧方法,控制MC非故障相支路仅补偿零序无功功率,维持了故障调控期间MC直流侧电压稳定。

参考文献:

- [1] 秦译为,张蓬鹤,宋如楠,等.新型电力系统下电弧故障诊断技术及发展趋势[J].电测与仪表,2024,61(2): 1-9.
QIN Yiwei, ZHANG Penghe, SONG Runan, et al. Arc fault diagnosis technology and trend of development in novel power system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(2): 1-9.
- [2] 陈池瑶,苗世洪,殷浩然,等.基于注意力机制-卷积神经网络的配电网单相接地故障选线方法[J].电力建设, 2023, 44(4): 82-93.
CHEN Chiyao, MIAO Shihong, YIN Haoran, et al. Single-phase grounding-fault line selection method based on attention mechanism-convolution neural network for distribution network[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(4): 82-93.
- [3] 曾祥君,李理,喻锴,等.配电网相电源馈入中性点的接地故障相主动降压消弧新原理[J].中国电机工程学报, 2023, 43(8): 2953-2966.
ZENG Xiangjun, LI Li, YU Kun, et al. Novel principle of arc suppression for grounding phase voltage actively reduced based on phase power supply feedback in distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8): 2953-2966.
- [4] 许守东,潘馨钰,李世伟,等.基于光伏自适应注入量的配电网单相接地故障保护方法[J].电网与清洁能源, 2023, 39(9): 140-150.
XU Shoudong, PAN Xinyu, LI Shiwei, et al. A single phase grounding fault protection method for distribution networks based on photovoltaic adaptive injection amount[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(9): 140-150.
- [5] 常新建,邵文权,程远,等.基于模型预测控制的配电网

- 单相接地故障有源消弧[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 161-169.
- CHANG Xinjian, SHAO Wenquan, CHENG Yuan, et al. Active arc suppression of a single-phase grounding fault in distribution network based on model predictive control [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 161-169.
- [6] 李辉, 李航, 陈尚, 等. 配电网单相接地故障电弧特性分析及真型试验技术研究[J]. 供用电, 2024, 41(4): 45-52.
- LI Hui, LI Hang, CHEN Shang, et al. Study on arc characteristics of single-phase grounding fault and true type test technology in distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(4): 45-52.
- [7] 涂春鸣, 侯玉超, 郭祺, 等. 计及配电网线路阻抗影响的自适应接地故障消弧控制策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 163-171.
- TU Chunming, HOU Yuchao, GUO Qi, et al. Adaptive arc suppression control strategy for grounding fault considering influence of line impedance in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 163-171.
- [8] 李冠华, 李雁, 刘志宇, 等. 66 kV 消弧线圈接地系统单相接地电弧燃弧特性试验研究[J]. 高压电器, 2024, 60(11): 225-233.
- LI Guanhua, LI Yan, LIU Zhiyu, et al. Study on arcing characteristics test of single-phase grounding arc in 66 kV Petersen-coil grounding system[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(11): 225-233.
- [9] 陈锐, 王文, 翁洪杰, 等. 配电网过电压有源抑制的注入电流控制方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(5): 1-6.
- CHEN Rui, WANG Wen, WENG Hongjie, et al. Injecting current control method for active overvoltage suppression in distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2018, 30(5): 1-6.
- [10] 曾祥君, 王沾, 喻锟, 等. 相电源馈入中性点的配电网接地故障相主动降压消弧装置及其应用[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3356-3366.
- ZENG Xiangjun, WANG Zhan, YU Kun, et al. Arc suppression device for actively reducing grounding fault phase voltage based on phase power supply feedback in distribution network and its application[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3356-3366.
- [11] 栾晓明, 武守远, 贾春娟, 等. 基于主动型接地装置消弧控制不同电压反馈方法建模与分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(23): 9084-9098.
- LUAN Xiaoming, WU Shouyuan, JIA Chunjuan, et al. Modeling and analysis of different voltage feedback methods for arc suppression control based on active grounding device[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(23): 9084-9098.
- [12] 刘健, 陈曦子, 张志华, 等. 基于消弧线圈调制信号相关检测的高阻单相接地选线[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 63-70.
- LIU Jian, CHEN Xizi, ZHANG Zhihua, et al. High resistance single-phase grounding line selection in resonant grounding systems based on correlation detection[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 63-70.
- [13] 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.
- [14] 廖德辉, 金鑫, 田君杨, 等. 灵活接地配电网单相接地故障全过程特征分析[J]. 智慧电力, 2024, 52(5): 90-97.
- LIAO Dehui, JIN Xin, TIAN Junyang, et al. Analysis of the entire process characteristics of single phase-to-ground faults in flexible grounded distribution networks [J]. Smart Power, 2024, 52(5): 90-97.
- [15] 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.
- [16] 周兴达, 陆帅, 陈杨明, 等. 基于 SVG 两相电流注入的配电网单相接地故障消弧方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 142-149.
- ZHOU Xingda, LU Shuai, CHEN Yangming, et al. Single-phase-to-ground fault arc-extinguishing method for distribution network based on SVG two-phase current injection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 142-149.
- [17] 游建章, 郭谋发. 含四桥臂 H 桥变流器的不对称配电网综合补偿方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2849-2858.
- YOU Jianzhang, GUO Moufa. Comprehensive compensation method for asymmetric distribution network with four-arm H-bridge converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2849-2858.
- [18] 叶珍珠, 陈鑫祺, 张抒婷, 等. 离子液体型双电层电容器在 45 °C 和 3 V 状态下的长周期运行研究[J]. 发电技术, 2023, 44(2): 213-220.

- YE Zhenzhen, CHEN Xinqi, ZHANG Shuting, et al. Long period operation of ionic liquid based electrical double layer capacitor at 45 °C and 3 V[J]. *Power Generation Technology*, 2023, 44(2): 213-220.
- [19] 孟庭如, 邹贵彬, 许春华, 等. 一种分区协调控制的有源配电网调压方法[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(10): 2852-2860.
- MENG Tingru, ZOU Guibin, XU Chunhua, et al. A voltage regulation method based on district-dividing coordinated control for active distribution network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(10): 2852-2860.
- [20] 陈继开, 王瑞全, 祝世启, 等. 无直流传感器 LC-STATCOM 自适应测控方法[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(22): 8874-8885.
- CHEN Jikai, WANG Ruiquan, ZHU Shiqi, et al. Adaptive measurement and control method of LC-STATCOM without DC sensor[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(22): 8874-8885.
- [21] 曹善康, 马啸, 汪光远, 等. 网侧故障下系统友好型直流微网协调控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(23): 7950-7963.
- CAO Shankang, MA Xiao, WANG Guangyuan, et al. System-friendly DC microgrid coordination control strategy under AC grid fault[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(23): 7950-7963.
- [22] 杜少通, 刘杰, 周娟, 等. 一种基于 NPC 和 H 桥混合级联的 6kV 静止无功发生器[J]. *电网技术*, 2022, 46(12): 5012-5020.
- DU Shaotong, LIU Jie, ZHOU Juan, et al. A 6kV hybrid cascade static var generator using NPC and H-bridge[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(12): 5012-5020.
- [23] 郭亮, 屈新宇, 王晓卫, 等. 基于改进 Hough 变换的消弧线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.

(上接第 178 页 Continued from page 178)

- [20] 刘博, 陈佳漩, 李江. 基于 SEM-MIP 状态估计的配电网拓扑辨识方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(13): 69-77.
- LIU Bo, CHEN Jiaxuan, LI Jiang. SEM-MIP based state estimation for topology identification in a distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(13): 69-77.
- [21] CAVRARO G, ARGHANDEH R. Power distribution network topology detection with time-series signature verification method[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(4): 3500-3509. [LinkOut]
- [22] FARAJOLLAHI M, SHAHSAVARI A, MOHSENIAN-RAD H. Topology identification in distribution systems using line current sensors: an MILP approach [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(2): 1159-1170.
- [23] ZHAO L, LIU Y B, ZHAO J B, et al. Robust PCA-deep belief network surrogate model for distribution system topology identification with DERs[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 125: 106441.
- [24] 刘丽娜, 王韬, 周一飞, 等. 基于神经网络的配网电气拓扑识别算法[J]. *电子科技大学学报*, 2023, 52(2): 247-253.
- LIU Lina, WANG Tao, ZHOU Yifei, et al. Distribution network electrical topology identification algorithm based on neural network[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2023, 52(2): 247-253.
- [25] XIAO M M, WANG S R, ULLAH Z, et al. Topology detection in power distribution system using kernel-node-map deep networks[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2020, 14(19): 4033-4041.