

引用格式:朱飞跃,栗时平,吴陈雨,等.一种兼具配电网单相接地故障调控的多端口能量路由器[J].电力科学与技术学报,2024,39(5):235-246.

Citation: ZHU Feiyue, SU Shiping, WU Chenyu, et al. A multi-port energy router for distribution networks with single-phase grounding fault regulation [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 235-246.

# 一种兼具配电网单相接地故障调控的 多端口能量路由器

朱飞跃, 栗时平, 吴陈雨, 李 雄

(长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 能量路由器是能源互联网领域的核心设备,其电路拓扑能够实现新能源、储能、各类负荷的统一分配。目前,能量路由器缺乏配电网故障恢复能力。该文提出一种实现故障调控与新能源消纳的多端口能量路由器(multi-port energy router, MP-ER)。首先,介绍 MP-ER 拓扑及原理,根据 MP-ER 整体结构,提出以直流母线电压为主信号,各个端口分散控制的控制策略;其次,通过直流母线电压及配电网零序电压情况,将 MP-ER 工作模式分为正常模式和故障柔性消弧两种模式,在所提的控制策略下,实现各模式内的稳定、高效运行;最后,针对连接的微网、配电网系统,利用 MATLAB 数值软件,对该模型进行仿真并验证该文提出的拓扑结构功能的合理性。该研究为能量路由器的研究提出一种新的拓扑结构和模型。

**关键词:** 能源互联网;能量路由器;故障恢复;分散控制;柔性消弧

**DOI:** 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.05.024 **中图分类号:** TM46 **文章编号:** 1673-9140(2024)05-0235-12

## A multi-port energy router for distribution networks with single-phase grounding fault regulation

ZHU Feiyue, SU Shiping, WU Chenyu, LI Xiong

(College of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** The energy router is a core device in the field of the energy internet, and its circuit topology enables unified distribution of new energy sources, energy storage, and various loads. Currently, energy routers lack the capability to restore power distribution networks after faults. A multi-port energy router (MP-ER) is proposed in this paper, which achieves fault regulation and new energy accommodation. Firstly, the topology and principles of the MP-ER are introduced, and based on its overall structure, a control strategy is proposed that utilizes the DC bus voltage as the primary signal and implements decentralized control for each port. Secondly, by considering the DC bus voltage and the zero-sequence voltage of the distribution network, the operating modes of the MP-ER are divided into normal mode and fault-tolerant flexible arc suppression mode. Under the proposed control strategy, stable and efficient operation is achieved within each mode. Finally, for the connected microgrid and distribution network systems, MATLAB numerical software is used to simulate the model and verify the rationality of the proposed topology and its functions. This research introduces a new topology and model for the study of energy routers.

**Key words:** energy internet; energy router; fault recovery; decentralized control; flexible arc suppression

近些年来,中国的可再生能源发电装机容量日益增加<sup>[1]</sup>,电源形式向多元化方向发展,但以光伏、风电为代表的可再生能源具有波动性,无法直接并入电网。为实现将这些更复杂多变的可再生能源接入传统电网的目标,有学者提出了能源互联

网的设想<sup>[2]</sup>。能源互联网中的关键设备能量路由器,是以电力网络为主体骨架,融合新能源、储能设备、负荷和电网等网络的设备。其具备良好的新能源消纳能力,并能提供“即插即用”的标准化接口<sup>[3-4]</sup>。能量路由器作为未来新型电网中的关键装

收稿日期:2023-08-01;修回日期:2023-12-11

基金项目:国家自然科学基金(51708194, 51507014)

通信作者:栗时平(1963—),男,博士,教授,主要从事电力系统监控、电能质量等方面的研究;E-mail: 3137602824@qq.com

备,能实时控制接入端口的电流与电压,并实现对不同电压等级间的变换,其原理、拓扑和应用已成为国内外研究的核心方向。

目前,对于能量路由器的研究主要集中在其拓扑原理和整体控制策略等方面。在配电网中,根据故障类型自主补偿配电网接地故障电流的能量路由器的研究仍不多见<sup>[5-9]</sup>。文献[5]基于高压大功率固态变压器,提出了一种可调节系统功率和电压的电能路由器拓扑结构。文献[6]提出了一种4端口的能量路由器,该路由器采用分层控制策略,解决能量路由器功率流动和多工况切换的问题。文献[7]提出了一种用于直流微网群的能量路由器,该能量路由器每个模块由交、直流变换器与带高频变压器的隔离双有源桥变换器组成。文献[8]提出了一种用户端能量路由器,根据直流母线电压大小将能量路由器划分为不同运行状态。文献[9-10]提出了一种用于交、直流混合电网的能量路由器,其既保证能量路由器平稳运行,又填补了上级电网的功率缺额。目前,鲜有对主动实现配电网故障恢复功能的能量路由器的研究。若将光伏、储能等能源通过能量路由器作为消弧的能量支撑方式,则可进一步提升配电网运行的安全性与经济性。

中国配电网一般采用小电流方式运行,在配电网故障中,单相接地故障占比最大<sup>[11]</sup>。消弧线圈是一种无源消弧措施,在配电网接地故障中应用广泛<sup>[12-14]</sup>。但消弧线圈调节烦琐,消弧能力有限,且消弧能力随故障电流增大而减小,已不能满足目前配电网安全性与可靠性的要求<sup>[15]</sup>。随着城市建设加快,城市电缆线路铺设增加,在提高电力供应能力的同时,配电网对地电容的需求不断增大<sup>[16]</sup>。在发生单相接地时,故障电流可能超过其允许的安全范围。如果产生电弧,带电弧持续燃烧将对电力设备会造成永久性破坏。

为解决消弧线圈在线路故障中残流较大的困扰,国内外学者以电力变流器技术为基础,提出了一种创新的柔性消弧装置<sup>[17-20]</sup>。文献[17]提出了一种混合消弧方式,其消弧装置由可调电抗器和电力变流器组成,当系统正常运行时,该装置通过电抗器接地;当发生单相接地时,控制变流器会抑制故障相,恢复电压。文献[18]提出了一种模型预测与PR控制结合的新型控制方法,该方法采用级联H桥结构来实现变流器的柔性消弧。文献[19]将单相逆变器取代消弧线圈,直接接入配电网的中性点,补偿故障电流。文献[20]提出了一种同时具备

无功补偿和消弧的变流器,并在变流器并网前加入一个可调的电容电抗器,有效地降低了变流器的输出容量。目前,采用逆变器的消弧方法,通常需要有源逆变器与消弧线圈联合工作<sup>[21]</sup>,且需要将单独的直流源作为柔性消弧能量来源。当配电网安全运行时,直流源没有发挥任何作用,对于整个消弧设备来说存在一定的浪费。因此,逆变器消弧方法存在设计冗余、设备利用率低的问题。若将能量路由器作为交流网接地线圈补偿逆变直流侧电源,则可实现能量路由与主动故障调控于一体的目的。

基于现有方案和存在的问题,在参考静止无功补偿器(static var generator,SVG)技术的研究后,本文提出了一种兼具接地故障调控与新能源消纳的多端口能量路由器(multi-port energy router,MP-ER)。依托能量路由器内部拓扑,消弧端口连接能量路由器内部直流母线,无须再单独配置直流源。通过控制消弧端口的电流注入,可实现对配电网中接地故障电流的补偿,从而有效地实现消弧,提升配电网运行安全性。

本文先介绍了MP-ER的整体架构和柔性消弧原理;再对MP-ER各端口控制策略进行合理设计,针对MP-ER的不同工况,设置相应的运行模式;最后,通过仿真验证,充分论证了该拓扑架构功能的可行性及其在实际应用中的有效性。

## 1 MP-ER 拓扑结构与柔性消弧原理

### 1.1 MP-ER 拓扑结构

能量路由器的优点在于其端口状态可控,可实时监测输入侧电源和输出侧负荷的电压与电流大小,是新能源与微网之间良好的能源传送设备<sup>[22]</sup>。此外,根据能量路由器连接的负荷类型,在满足基本输入与输出的情况下,为满足负荷的多样化用电需求,能量路由器的电路拓扑应当具备更为多元化的接口设计,实现灵活的能量分配与转换;在控制策略上,应着重考虑如何提高能量路由器的稳定性。

本文提出的能量路由器如图1所示。该能量路由器可有效地实现微网、新能源、储能设备与负荷之间高效、紧凑的衔接。在图1中,该能量路由器直流母线电压设置为800V,交流侧电压设置为380V。此外,该能量路由器交流侧采用并联式逆变器电路(为简化拓扑,图1中只画了一个DC/AC示意),交流侧三相相互独立,其模块化的结构使其能较方便地接入交流负载与低压微网中。

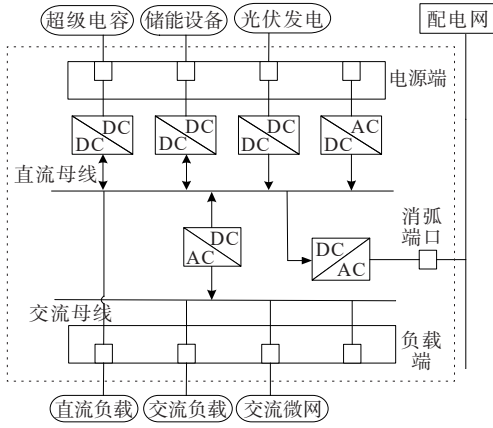


图 1 MP-ER 整体架构

Figure 1 Overall architecture of MP-ER

对能量路由器光伏侧、储能端和超级电容接口,采用半桥电路模块,根据其各自特性,灵活选择 Boost 或 Buck 模式。能量路由器光伏侧如果选用 Boost 模式,光伏将采用最大功率电跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制方式,将光伏输出的能量汇入直流母线。对于储能设备和超级电容端,采用 Boost 或 Buck 模式的工作方式,消纳光伏能量,有效实现对直流母线电压的可靠支撑。能量路由器消弧端口则通过注入变压器接入电网。在电网正常时,消弧端口开关管断开,处于备用状态;在配电网发生接地故障时,消弧端口向配电网注入消弧电流。

1.2 配电网接地故障柔性消弧原理分析

根据 MP-ER 的整体拓扑可得到图 2 的经 MP-ER 接地的经典配电网结构。在图 2 中,光伏、储能、消弧装置和负载(负载端未在图 2 中体现)接入 MP-ER 相应的端口。 $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$  和  $\dot{U}_0$  分别为配电网的电源三相电压和中性点电压; $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  分别为配电网三相电压; $\dot{I}_{ZX}(X=A, B, C)$  为消弧端口向配电网注入的电流; $L_{PX}(X=A, B, C)$  为 MF-ER 与变压器之间的连接电感; $\dot{I}_{GX}(X=A, B, C)$  为对地电流; $\dot{I}_{LX}(X=A, B, C)$  为负载电流; $Z_X(X=A, B, C)$  为线路阻抗; $r_x$  和  $C_x(X=A, B, C)$  分别为对地泄露电阻和对地电容。如果 A 相发生单相接地故障,则设故障电阻为  $R_f$ ,故障点电压为  $\dot{U}_f$ ,故障电流  $\dot{I}_f$ 。MP-ER 通过消弧端口的隔离变压器向配电网注入消弧电流,消弧端口内部结构以三相星形联结,三相相互独立运行。

配电网接入 MP-ER 消弧端口,MP-ER 消弧模块在配电网正常运行时开关管断开,处于备用状态;当配电网发生接地故障后,MP-ER 立即控制变

流器,输出接地故障电流的补偿电流。在单相接地故障发生后,接地故障电流会在地回路中形成闭合路径并流动。因此,需要对接地故障电流进行补偿以维持系统的稳定运行。本文以 A 相发生单相接地故障为例进行分析,其等效电路如图 3 所示。在图 3 中, $\dot{I}_z$  为消弧端口注入配电网电流; $Z$  为故障母线至故障点的阻抗; $\dot{U}_f$  为故障点故障前时刻电压; $Y$  为故障线路对地零序导纳。

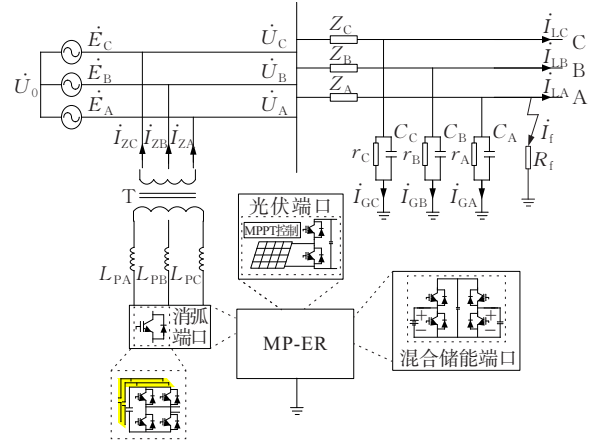


图 2 经消弧端口接地的配电网结构

Figure 2 Structure of distribution network grounded through arc suppression port

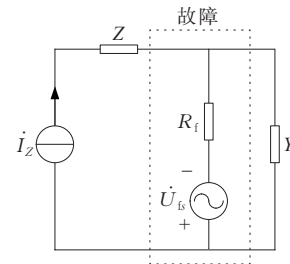


图 3 接入消弧端口的配电网等效电路

Figure 3 Equivalent circuit of distribution network connected to arc suppression port

配电网接地故障的消弧方法可分为电压消弧法和电流消弧法两类。电流消弧法的基本原理在于抑制接地电流。相反地,电压消弧法则利用特定的消弧装置,直接消除故障点处的电压,将其降为零,如果配电网是多馈线网络,在确定故障相后,控制故障母线相电压为  $0V$ <sup>[23]</sup>。

根据配电网等效电路图 3,可求得接地故障电阻两端电压  $\dot{U}_{R_f}$  和零序电压  $\dot{U}_0$ ,其表达式分别为

$$\dot{U}_{R_f} = \frac{\dot{U}_f R_f Y + R_f \dot{I}_z}{R_f Y + 1} \quad (1)$$

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{I}_z (R_f Y Z + Z + R_f) - \dot{U}_f}{R_f Y + 1} \quad (2)$$



对式(1)、(2)进行化简,可得故障电流的表达式:

$$\dot{I}_f = \frac{\dot{U}_{R_f}}{R_f} = \frac{\dot{U}_f Y + \dot{I}_z}{R_f Y + 1} \quad (3)$$

由式(3)可知,当注入电流为 $\dot{I}_z$ 为 $-\dot{U}_f Y$ 时,消弧装置可补偿故障电流。这是电流消弧的基本原理。中国配电网结构复杂,网络结构变化频繁,电流消弧法对电网结构变化的适应性较差。除补偿对地故障电流实现消弧外,电压消弧是另一种消弧方法。其原理是:抑制故障点电压至0V来实现接地故障消弧。从图2中可以看出,故障相母线电压 $\dot{U}_A$ 满足关系式:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_0 + \dot{E}_A \quad (4)$$

将式(4)带入式(2),若故障相母线电压为0V,则有

$$\dot{I}_z = \frac{-\dot{E}_A (R_f Y + 1) + \dot{U}_f}{R_f Y Z + Z + R_f} \quad (5)$$

根据式(5),在已知线路参数后,向配电网注入一个指定电流,即可实现故障相电压接近0V的目标,完成消弧。这种方式可以补偿电网发生故障时流过对地泄漏电阻的电流,补偿故障电流中的有功分量,解决消弧线圈只能补偿容性电流的不足与补偿能力有限的问题。

## 2 MP-ER 控制方式及工作模式

### 2.1 MP-ER 端口控制方法

从整体结构来看,MP-ER类似于一个交、直流混合微网,各类电源、负载等端口通过变流器与直流母线连接。公共直流母线有2个优点:一是可保证直流母线电压稳定,可控制各端口功率平衡;二是直流母线电压波动可间接地反映系统内部功率平衡状态<sup>[24]</sup>。基于这两点,本文提出以直流母线电压为主信号,MP-ER各个端口分散控制的控制策略。

#### 2.1.1 混合储能端口控制方法

直流母线电压稳定是MP-ER正常运行的关键。光伏和负载的突变会导致MP-ER直流母线电压发生波动,影响其他端口的正常运行。常规的蓄电池储能系统反应较慢,无法及时支撑直流母线电压稳定。由于超级电容功率密度大,可在短时间内反复充、放电,可补偿在短时间内出现的功率尖峰。混合储能端口的结构如图4所示。在图4中,蓄电池和超级电容通过双向DC-DC逆变器与直流母线

连接; $L_{batt}$ 为蓄电池回路电感; $L_{sc}$ 为超级回路电感; $C_{dc}$ 为直流母线电容; $U_{batt}$ 为蓄电池侧电压; $U_{sc}$ 为超级电容侧电压; $I_{batt}$ 为蓄电池电流电感; $I_{sc}$ 为超级电容电感电流。

由于直流母线电压波动可间接反映系统内部功率平衡状态,因此混合储能端口的控制策略要能尽快稳定直流母线电压,进而分配各端口功率。功率平衡方程可表示为

$$CU_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = P_{pv} + P_{sc} + P_{batt} - P_{load} - P_{arc} \quad (6)$$

式中, $C$ 为直流母线电容; $P_{sc}$ 和 $P_{batt}$ 分别为超级电容器和蓄电池的输出功率; $P_{pv}$ 为光伏单元输出功率; $P_{load}$ 为负载消耗的功率; $P_{arc}$ 为消弧端口输出的有功功率; $U_{dc}$ 为直流母线参考电压。

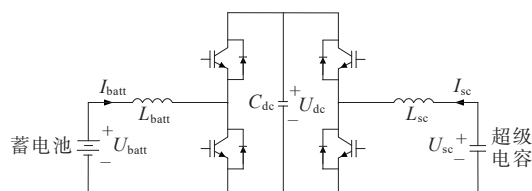


图4 混合储能端口结构

Figure 4 Structure of hybrid energy storage port

当直流母线侧电压恒定时,忽略逆变器损耗,则基本能量关系为

$$P_{pv} + P_{sc} + P_{batt} = P_{load} + P_{arc} \quad (7)$$

若光伏采用MPPT控制方式,则输出功率为 $P_{pv}$ 。混合储能参考电流 $I_{ref}$ 由直流母线参考电压与实际母线电压差值决定,其表达式为

$$I_{ref} = K_p (U_{dcref} - U_{dc}) + K_i \int (U_{dcref} - U_{dc}) dt \quad (8)$$

式中, $U_{dcref}$ 为直流母线参考电压; $K_p$ 和 $K_i$ 分别是比例常数和积分常数。

混合储能采用一种新型控制方法,其将下垂控制与电压电流控制相结合,如图5所示。在图5中, $P_{ref}$ 为混合储能端口功率参考值; $U_{bref}$ 为蓄电池端口电压参考值; $P_{scref}$ 为超级电容功率参考值; $I_{scref}$ 为超级电容电流参考值。将直流母线参考电压 $U_{dcref}$ 与实际母线电压 $U_{dc}$ 两者的差值作为参考值送入电流PI控制器,由电流PI控制器生成混合储能系统电流参考值 $I_{ref}$ ,该值与直流母线电压 $U_{dc}$ 相乘,通过低通滤波器<sup>[25]</sup>(low pass filter, LPF)得到蓄电池功率参考值 $P_{bref}$ ,再经过电压-功率下垂控制得到电压参考值,该电压参考值表达式为

$$U_{bref} = U_k - kP_{bref} \quad (9)$$

式中, $U_k$ 为下垂控制电压; $k$ 为下垂系数。



特性,设计虚拟同步发电机功频控制器,以实现输出功率的精确调节。其表达式为

$$P_m = P_{ref} + K_f(\omega_0 - \omega) \quad (12)$$

式中, $P_m$ 为机械功率; $P_{ref}$ 为参考功率给定值; $K_f$ 为调差系数。

从式(12)可以看出,当发生功率波动时,调差系数越大,发电机频率变化量越小。

同步电机通过改变励磁电流大小来调节机端电压。因此,在虚拟同步电机技术中,可通过积分来控制虚拟电势的幅值,进而改变输出无功的大小和流向,实现精准跟随、控制环电压。具体控制器为

$$\begin{cases} Q_{ref} - Q = D_k(U_{ref} - U_{out}) \\ E = \frac{1}{K_S} [D_k(U_{out} - U_{ref}) + (Q_{ref} - Q)] \end{cases} \quad (13)$$

式中, $Q_{ref}$ 为给定无功功率; $Q_{out}$ 为输出的无功功率; $U_{ref}$ 为给定的电压; $U_{out}$ 为输出电压; $D_k$ 为无功调节系数。

由此,可以得到发电机虚拟电势向量:

$$E = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E| \sin \delta \\ |E| \sin \left( \delta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ |E| \sin \left( \delta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中, $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$ 分别为a、b、c轴的虚拟电势分量; $\delta$ 为发电机功角。

由此可见,交流端口采用虚拟同步机控制,有效地提升了MP-ER的惯性和阻尼,在保证有功指令跟踪的情况下,在必要时对微网电压进行支撑,扩充能量路由器的功能。

### 2.1.3 消弧端口控制方法

配电网接地故障具有随机性,消弧端口的负载性质随着故障点、接地电阻的变化而改变<sup>[26]</sup>。消弧端口应在各种工况下跟踪指定电流。在故障发生后,若其未能及时有效地抑制故障电流,则可能导致电弧持续不断地燃烧,给系统带来严重的风险和危害。消弧逆变器主电路如图8所示。在图8中,该主电路直流侧与MP-ER直流母线相连,无须配置单独直流源。 $V_{dc}$ 为MP-ER直流母线电压,作为消弧端口的逆变源,其不需要输出大量有功功率。 $g_0$ 和 $C_0$ 分别为配电网的对地泄漏电导和对地

电容, $L_p$ 为连接电感, $U_{eq}$ 为电网等效电压源。将配电网参数等效至消弧端口侧 $g_1 = k_1^2 \Sigma g_0$ , $C_1 = k_1^2 \Sigma C_0$ , $R_{f1} = R_f/k_1^2$ ,逆变器滤波器为LC滤波器( $\Sigma g_0$ 、 $\Sigma C_0$ 分别为配电网总的对地泄露电导和对地电容)。

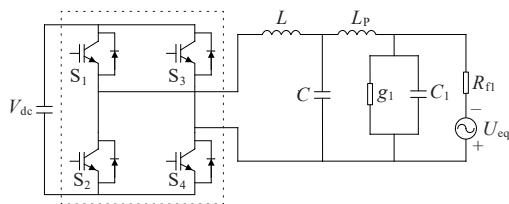


图8 消弧端口主电路

Figure 8 Main circuit of arc suppression port

为实现将故障点电流抑制为零的目标,控制故障相电压为零,消弧端口控制方案如图9所示。在图9中,将电压给定信号 $U_{ref}$ 与反馈信号相减的差值送入电压调节器 $G_v$ ,得到电流环给定信号 $i_L^*$ ,该值与电感电流瞬时值 $i_L$ 相减所得的差值再通过电流调节器 $G_i$ 得到控制逆变器开关所需的输出脉冲。 $K_{pwm}$ 为逆变器增益, $G_s$ 为消弧端口电压与故障点电压之间的传递函数。

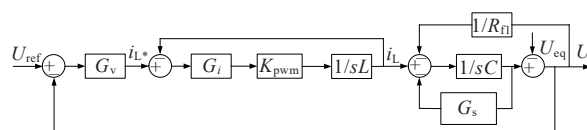


图9 消弧端口控制框

Figure 9 Control block diagram of arc extinguishing port

在该双环控制方案中,电流环采用PI控制器,增加控制系统阻尼系数,使系统工作稳定;为实现控制故障相电压为零,电压环采用准PR控制器,该控制器可最大限度地消除目标值与被控制量之间存在的静差<sup>[27]</sup>。相较于PR控制器,准PR控制器的增益可调,能避免系统轻微波动对控制器产生剧烈影响,增强系统的稳定性。将 $s=j\omega$ 分别带入PR与准PR控制器的传递函数中,则在基波频率处的PR与准PR控制器的增益 $G_{PR}$ 与 $G_{QPR}$ 分别为

$$|G_{PR}| = K_p + \frac{K_r j\omega}{(j\omega)^2 + \omega^2} = \infty \quad (15)$$

$$|G_{QPR}| = K_p + \frac{2\omega_1 K_r j\omega}{(j\omega)^2 + 2\omega_1 j\omega + \omega^2} = \sqrt{K_p^2 + K_r^2} \quad (16)$$

式(15)、(16)中, $K_r$ 为谐振系数。

从式(15)、(16)可以看出,PR控制器在基波频率处的增益为无穷大。如果系统频率存在一定的

误差,则该控制器对无静差调节和快速追踪能力会受到限制,阻碍系统实现最佳性能的目标。准PR控制的增益可通过参数 $K_r$ 来调节,该调解器能有效地解决带宽问题,实现无静差调节。消弧端口逆变器参数设计主要考虑电压跟踪问题,详见文献[28],本文不再赘述。

MP-ER消弧端口控制策略的关键是注入理论补偿电流。当电网接地故障发生后,MP-ER立即控制变流器从关管备用状态转变为输出接地故障、补偿电流的工作状态。依据式(5),消弧法会受到线路阻抗、对地零序导纳和接地电阻的影响。注入的电流能同时补偿故障电流中的有功及无功分量,补足消弧线圈的不足。

## 2.2 MP-ER工作模式

MP-ER有2种工作模式:在电网正常运行时,MP-ER采用正常模式;在电网发生单相接地故障时,MP-ER采用消弧模式。根据本文提出的分散控制策略,将MP-ER运行模式划分成6个模态,以母线电压水平为主信号,以配电网零序电压、微网频率、有功指令等为辅助信号,实时进行模式的判断与选择,实现母线电压稳定、系统功率平衡。 $U_t$ 、 $f_t$ 、 $P_t$ 分别为 $t$ 时刻母线电压值、微网频率、功率指令; $U_{dc}$ 为直流母线电压参考值,设为800V; $|\Delta U_{dc}| = U_t - U_{dc}$ ;  $f$ 为微网频率,取其值为50Hz; $P_{ref}$ 为功率参考值。MP-ER运行流程如图10所示。

在各模态下MP-ER各端口的运行情况较为复杂。对于模态1的4种情况,即处于模态1-1、模态1-2、模态1-3、模态1-4时,系统工作于正常模式且光伏没有发生波动。

在模态1-1和模态1-3中,系统的切换方式:光伏单元为MPPT控制,系统输出的有功指令降低,当检测到MP-ER母线电压上升并越限时,则系统进入模态1-1;如果系统输出的有功指令增加,且检测母线电压 $U_t < 0.98U_{dc}$ 时,则系统从模态1-1切换至模态1-3。

在模态1-2和模态1-4中,系统的切换方式:光伏单元仍为MPPT控制,微网频率上升,MP-ER向微网传输的有功功率减少,当检测到母线电压升高至超过上限时,MP-ER进入模态1-2。如果此时微网频率下跌,微网需要MP-ER输出更多有功功率,且若检测到母线电压 $U_t > 1.02U_{dc}$ 时,系统从模态1-2切换至模态1-4。

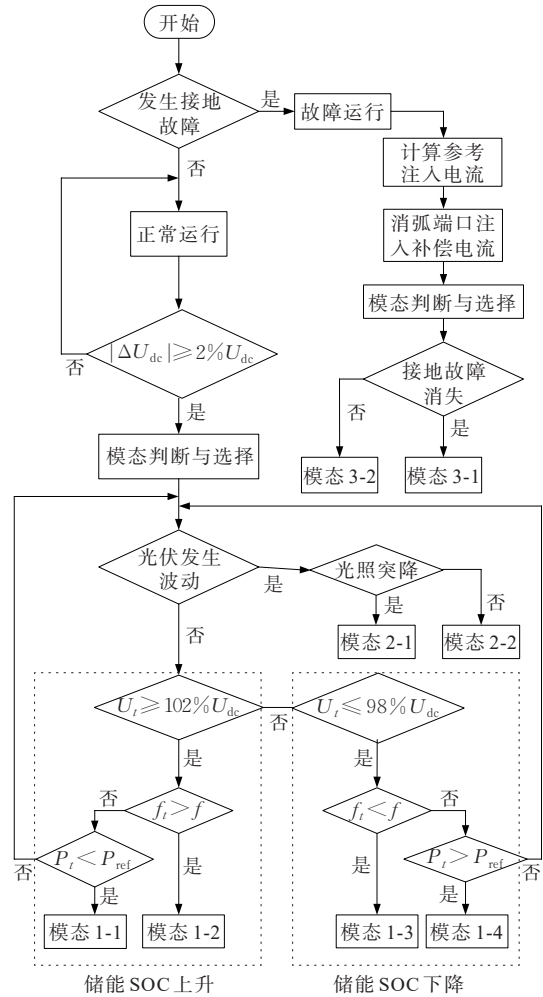


图10 MP-ER运行流程

Figure 10 Operation flowchart of MP-ER

在模态2中,系统的切换方式:若电网处于正常模式,消弧端口仍处于闭锁状态,系统功率指令、微网频率都不发生变化。若光伏单元输出减少,则直流母线电压下跌,系统进入模态2-1;若光伏单元输出增加,则直流母线电压上升,系统进入模态2-2。混合储能端口会根据直流母线电压情况调整输出功率,维持系统功率平衡。

在模态3中,系统的切换方式:若电网处于故障模式,分析零序电压值,消弧端口通过注入变压器向配电网注入补偿电流,强制故障相电压为零。经过一段时间后,系统逐渐减小注入电流。若零序电压降至设定值以下,则系统判断电弧已有效熄灭,系统进入模态3-1;反之,则判断电网该故障为永久性电阻接地故障,能量路由器退出消弧模式,系统断路器动作,隔离故障线路,系统从模态3-1切换至模态3-2。



### 3 仿真结果与分析

为验证该能量路由器及其控制策略的正确性,在 MATLAB/Simulink 平台下搭建仿真模型,参数见表1。对 MP-ER 的各个工作模式进行仿真,并分析其仿真结果,讨论当因光照条件变化引起光伏单元输出功率波动、功率变化或配电网单相接地故障等情况发生时,系统的稳态与动态情况。

表1 MP-ER 正常模式下仿真参数

Table 1 Simulation parameters under MF-ER normal mode

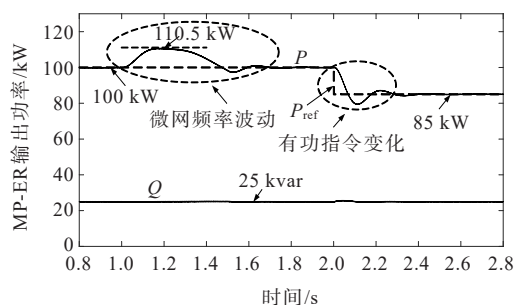
参数及符号	单位	值
交流端口滤波电感 $L_s$	mH	0.8
交流端口滤波电容 $C_c$	$\mu\text{F}$	100
转动惯量 $J$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0.3
阻尼系数 $D$	$\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$	20
调差系数 $K_f$	—	1
电压调节系数 $D_k$	—	0.2
光伏开路电压 $U_k$	V	321
光伏短路电流 $I_d$	A	29.8
蓄电池额定电压 $U_{\text{batt}}$	V	500
超级电容额定电压 $U_{\text{sc}}$	V	600
蓄电池回路电感 $L_{\text{batt}}$	mH	10
超级电容回路电感 $L_{\text{sc}}$	mH	30
下垂系数 $k$		0.002
开关频率 $f$	kHz	10
直流母线电压 $U_{\text{dc}}$	V	800

#### 3.1 MP-ER 正常模式下仿真

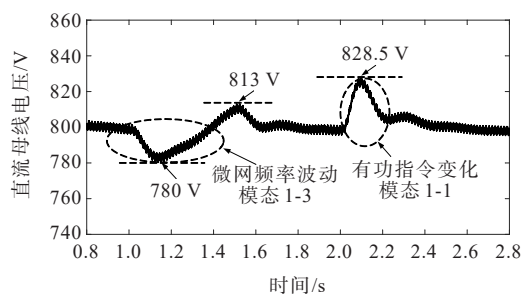
验证 MP-ER 在正常模式下,当端口的功率指令发生变化时,系统能否运行稳定以及各端口功率协调分配时,母线电压是否稳定。

对于模式1,如图11(a)所示,在0.8 s时,母线电压稳定,光伏单元工作于MPPT模式,微网未发生频率偏移,MP-ER输出有功  $P$  为100 kW,无功功率  $Q$  为25 kVar。在1.0 s时,微网端口发生频率波动,在1.00~1.50 s,频率在下跌0.25 Hz后又恢复正常工频,同时直流母线电压下跌20 V,低于  $0.98U_{\text{dc}}$ ,MP-ER进入模式1-3,如图11(b)所示。若系统检测到微网频率波动,在虚拟同步电机控制下,MP-ER交流端口输出功率增加10.50 kW有功,维持微网频率稳定,如图11(c)所示。为了保证直流母线电压为800 V,混合储能端口输出从4.80 kW增加到16.50 kW。在2.0 s时,系统有功指令从100.00 kW变为85.00 kW,如图11(a)所示。MP-ER交流端口迅速跟踪有功指

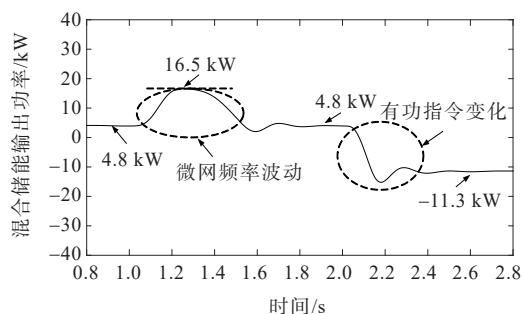
令,满足电网功率需求,同时,直流母线电压上升28.50 V,超过  $1.02U_{\text{dc}}$ ,MP-ER进入模式1-1,如图11(b)所示。如果直流母线电压越限,混合储能端口会立即减少输出功率至-11.30 kW,保证母线电压不超过限值,混合储能从放电状态变为充电状态。模式1-2、模式1-4与模式1-1、模式1-3分析过程类似,这里不再赘述。



(a) 交流端口输出功率



(b) 直流母线电压



(c) 混合储能输出功率

图11 MP-ER 模式1仿真

Figure 11 Simulation of MP-ER in mode 1

对于模式2,设定初始环境  $25^\circ\text{C}$ ,图12(a)、12(b)给出光伏单元在MPPT模式下端电压情况及光伏单元的输出功率。从图12(a)、12(b)中可以看出,扰动观测法能很好地保证光伏单元保持最大功率输出模式,实现对新能源的最大利用。若初始光照强度为  $1000 \text{ W/m}^2$ ,在1.0 s时,光照强度降至  $850 \text{ W/m}^2$ ,直流母线电压波动超过  $0.02U_{\text{dc}}$ ,MP-ER进入模式2-1;在1.5 s时,光照强度升至  $1100 \text{ W/m}^2$ ,MP-ER



切换至模式 2-2;在 2.1 s 时,光照强度恢复至 1 000 W/m<sup>2</sup>,MP-ER 切换回模式 2-1。图 12(c)为光伏波动期间直流母线电压情况。为维持内部能量平衡,混合储能端口输出如图 12(d)所示,在 1.0 s 时,混合储能端口出力增加 15.50 kW,填补由于光伏不足导致的功率缺额;1.5 s 后,由于光照充足,混合储能从放电状态变为充电状态,吸收光伏产生的多余能量,时刻保持内部功率平衡;在 2.1 s 时,光照恢复至初始状态。

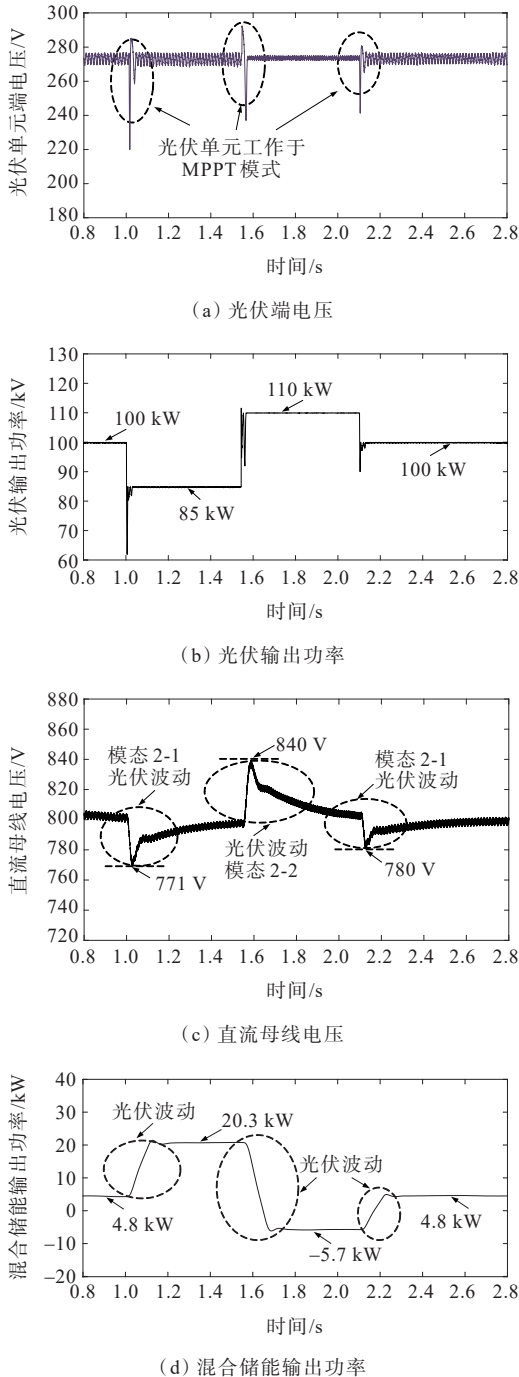


图 12 MP-ER 模式 2 仿真

Figure 12 Simulation of MP-ER in mode 2

综上所述,当 MP-ER 所接负荷变化、微网频率发生变化、光伏连续波动时,MP-ER 通过调整各端口输出功率来维持能量路由器直流母线电压在  $\pm 5\%U_{dc}$  范围内波动,保证系统功率平衡,并维持直流母线电压稳定。

3.2 MP-ER 消弧模式下仿真

在不接地系统中,若配电网发生单相接地故障,故障电流通常为容性电流。MP-ER 直流母线作为消弧端口逆变源,不需要其输出大量有功功率,通常在直流端配置稳压电容提供直流电压支撑即可,因此,在消弧仿真过程中,不考虑消耗的有功功率对于直流母线电压的影响。消弧端口逆变器参数见表 2。

表 2 消弧端口逆变器参数

Table 2 Inverter parameters for arc suppression port

消弧端口滤波电感 $L/\text{mH}$	消弧端口滤波电容 $C/\mu\text{F}$	开关频率 $f/\text{kHz}$	直流侧电压 $U_{dc}/\text{V}$	隔离变压器变比 $T/\text{kV}$
0.5	10	10	800	5.7/0.4

配电网线路(以 A 相接地为例)设置了 3 条出线,线路模型采用  $\pi$  型等值电路,长度依次为 10、20、20 km,线路为电力电缆线路,故障点设置在线路 1 距离母线 1 km 处, $R_f$  为 50  $\Omega$ 。具体参数见表 3。将线路参数带入式(1)、(5),可得到接地电阻两端电压及注入的补偿电流  $\dot{I}_s$ 。当检测到配电网零序电压升高时,MP-ER 端口立即采取动作,注入消弧电流。若电网在 0.3 s 时发生接地故障,则系统会在 0.4 s 时注入补偿电流。电网发生故障前、后的故障点电流、三相电压运行状态如图 13 所示。

表 3 线路参数

Table 3 Line parameters

线路	相序	电阻/ $(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	电容/ $(\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$	电感/ $(\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$
架空线路	正序	0.012 7	0.001 2	0.933 7
	零序	0.386 4	0.007 7	0.412 6
电缆线路	正序	0.624 1	0.359 4	0.267 4
	零序	0.942 7	0.237 6	1.100 0

图 13(a)为 A 相接地故障点电流。在 0.3 s 前,系统稳定运行;在 0.3 s 时系统发生单相接地故障。在消弧端口注入电流前,故障点电流为 17.32 A;0.4 s 时,该路由器将注入消弧电流,故障点电流被抑制到 1.53 A,故障电流抑制程度为 91.17%,可实现稳定消弧。图 13(b)为单相接地故障系统三相电

压波形。在0.4 s时,路由器在消弧端口注入电流后,故障相电压由2.80 kV下降至低于0.06 kV,故障相电压下降幅度为97.86%,抑制效果显著。在灭弧3.0 s后,系统按一定比例减少注入消弧电流。若零序电压也随之降低,则系统判定故障为瞬时故障,消弧成功;否则,则系统断定该故障为永久性故障,将采取保护动作隔离故障馈线,避免故障进一步发展。

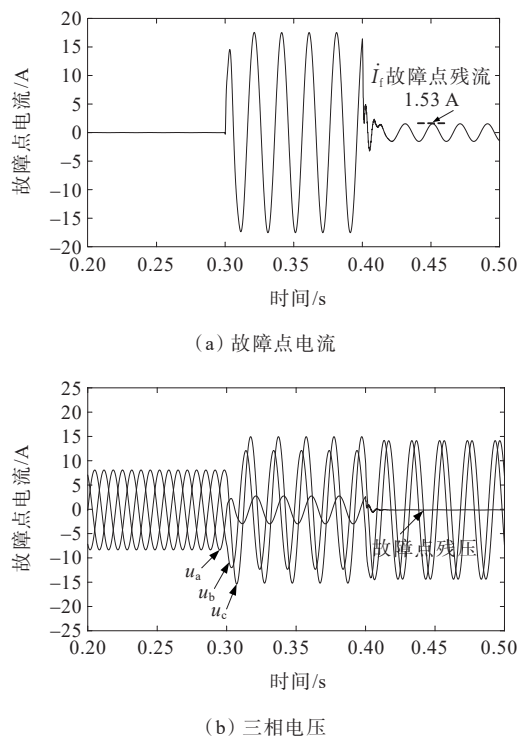


图13 MP-ER消弧模式仿真

Figure 13 Simulation of MP-ER in arc suppression mode

为确认在消弧模式下MP-ER其他端口能否正常运行,本文测试了更恶劣的运行环境:在发生配电网单相接地故障时,微网发生电压跌落,并持续0.1 s后才恢复正常。图14为消弧模式下MP-ER各端口输出的功率及直流母线电压情况。如果系统在0.3 s时检测到发生单相接地故障,且微网也发生电压跌落,MP-ER会立即向微网增加无功输出,抬升微网电压。微网电压下跌会影响MP-ER有功输出。为维持有功平衡,MP-ER会调整有功输出。系统在0.4 s时从消弧端口注入补偿电流消弧,故障点的残压、残流与MP-ER消弧模式仿真结果均与图13的结果相同。直流母线电压在整个工况下一直保持在800 V附近,整个系统运行稳定。

仿真验证了当配电网接地故障时,MP-ER能将故障点电压和电流均抑制到0 V、0 A,保障故

障电弧被可靠熄灭,同时保证其他端口正常运行,不受消弧端口影响。该仿真结果与理论分析一致。

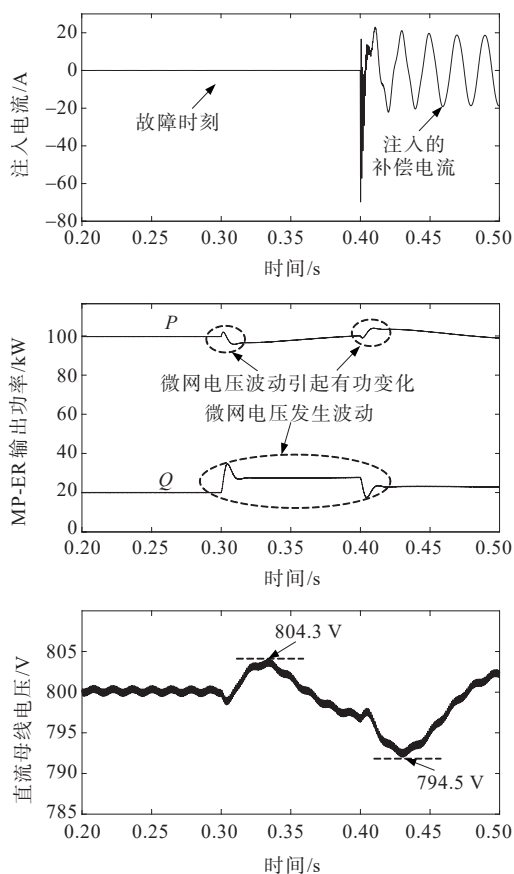


图14 消弧模式下MP-ER端口运行状况

Figure 14 Port operation status of MP-ER in arc elimination mode

## 4 结语

能量路由器作为能源互联网的关键设备,对含新能源的电网的配网调度等具有至关重要的作用。针对目前能量路由器在配电网故障恢复中能力欠缺及消弧方案设备利用率低的问题,本文提出了一种兼具接地故障调控与新能源消纳的多端口能量路由器。通过理论分析和仿真验证,得到以下结论:

1) 该新型能量路由器的模块化结构能灵活地为以光伏为代表的新能源,微电网,储能提供交、直流负荷接口,且具备同时主动应对配电网发生单相接地故障的能力。

2) 在各端口分散控制的控制策略下,能量路由器消弧端口仍可响应迅速,快速抑制故障相电压。且该策略亦可与继电保护装置配合隔离故障馈线,大幅提升了配电网运行安全性与经济性。

需要指出的是,本文研究侧重于能量路由器正常运行工况,暂未考虑能量路由器内部发生故障的情况,也未考虑在配电网复杂馈线工况下如何精确消除故障接地电流的措施。由于实验条件限制,该能量路由器未在实物平台上进行验证,未来将搭建能量路由器测试平台,完成实物验证。

#### 参考文献:

- [1] 张军六,李佳朋,唐震,等.基于本地测量的高比例新能源电力系统不平衡功率估算与附加功率控制策略[J].电力科学与技术学报,2022,37(3):50-60.  
ZHANG Junliu, LI Jiapeng, TANG Zhen, et al. Local measurement based unbalanced active power estimation and supplementary power modulation for power systems with high proportions of renewable energy[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(3): 50-60.
- [2] 卢林煜,王鲁杨,恽东军,等.基于柔性配电网级联H桥固态变压器电压与功率均衡控制策略[J].电力科学与技术学报,2021,36(1):152-159.  
LU Linyu, WANG Luyang, YUN Dongjun, et al. Research on voltage and power balance control strategy of cascaded H-bridge solid state transformer based on flexible distribution networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1): 152-159.
- [3] 盛万兴,刘海涛,曾正,等.一种基于虚拟电机控制的能量路由器[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3541-3550.  
SHENG Wanxing, LIU Haitao, ZENG Zheng, et al. An energy hub based on virtual-machine control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3541-3550.
- [4] 苗键强,张宁,康重庆.能量路由器对于配电网运行优化的影响分析[J].中国电机工程学报,2017,37(10):2832-2839.  
MIAO Jianqiang, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Analysis on the influence of energy router on the optimal operation of distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 2832-2839.
- [5] SHE X, WANG F, BURGOS R, et al. Solid state transformer interfaced wind energy system with integrated active power transfer, reactive power compensation and voltage conversion functions[C]//2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Raleigh, NC, USA. IEEE, 2012: 3140-3147.
- [6] 孙利,陈武,蒋晓剑,等.能源互联网框架下多端口能量路由器的多工况协调控制[J].电力系统自动化,2020,44(3):32-39.  
SUN Li, CHEN Wu, JIANG Xiaojian, et al. Coordinated control of multiple operation conditions for multi-port energy router in energy Internet framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 32-39.
- [7] TU C M, XIAO F, LAN Z, et al. Analysis and control of a novel modular-based energy router for DC microgrid cluster[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(1): 331-342.
- [8] 王建元,张泽强,宋月航.户用型能量路由器控制策略研究[J].电测与仪表,2021,58(6):174-179.  
WANG Jianyuan, ZHANG Zeqiang, SONG Yuehang. Research on control strategy of household energy router [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(6): 174-179.
- [9] 艾欣,荣经国,吕正,等.一种新型的能量路由器结构及其控制策略的研究[J].电网技术,2019,43(4):1202-1210.  
AI Xin, RONG Jingguo, LYU Zheng, et al. Research on structure and control strategy of a novel energy router[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1202-1210.
- [10] 郑云平,亚夏尔·吐尔洪.基于VSG技术的风光—储系统自适应调频控制策略研究[J].高压电器,2023,59(7):12-19.  
ZHENG Yunping, YAXAR·Turgun. Research on adaptive frequency modulation control strategy of wind-PV-storage system based on VSG technology[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 12-19.
- [11] 要焕年,曹梅月.电力系统谐振接地[M].2版.北京:中国电力出版社,2009:88-89.  
YAO Huannian, CAO Meiyue. Power system resonant grounding[M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2009: 88-89.
- [12] 朱珂,王怡轩,倪建.主动干扰技术在消弧线圈接地系统故障选线中的应用[J].电力自动化设备,2017,37(10):189-196.  
ZHU Ke, WANG Yixuan, NI Jian. Application of active disturbance technology in faulty line selection of arc suppression coil grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 189-196.
- [13] 何小龙,高红均,高艺文,等.基于GA优化BP神经网络的有源配电网高阻接地故障选线方法[J].智慧电力,2023,51(4):54-61.  
HE Xiaolong, GAO Hongjun, GAO Yiwen, et al. High resistance grounding fault line selection method for active distribution network based on GA optimized BP neural network[J]. Smart Power, 2023, 51(4): 54-61.
- [14] 杨磊,曾祥君,喻锴,等.新型谐振接地系统接地故障全补偿方法[J].电力自动化设备,2018,38(11):57-62.  
YANG Lei, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. Novel method of full compensation for grounding fault of resonant grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 57-62.
- [15] 游建章,郭谋发,蔡文强,等.配电网单相接地故障柔性

- 自适应消弧新方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 146-153.
- YOU Jianzhang, GUO Moufa, CAI Wenqiang, et al. Novel flexible and adaptive arc suppression method for single-phase grounding fault in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 146-153.
- [16] 孙建明, 黄事成, 丁坚勇. 基于额定电压因数的长电缆线路PT保护措施[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(1): 199-205.
- SUN Jianming, HUANG Shicheng, DING Jianyong. Research on PT protection measures for long cable lines based on rated voltage factor[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1): 199-205.
- [17] WANG P, CHEN B C, TIAN C H, et al. A novel neutral electromagnetic hybrid flexible grounding method in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1350-1358.
- [18] 邱伟强, 郭谋发, 郑泽胤. 基于单一直流源级联H桥逆变器的配电网接地故障柔性消弧方法[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3848-3858.
- QIU Weiqiang, GUO Moufa, ZHENG Zeyin. Flexible arc-suppression method based on single-DC-source cascaded H-bridge converter for earth fault in distribution networks[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3848-3858.
- [19] WANG W, ZENG X J, YAN L J, et al. Principle and control design of active ground-fault arc suppression device for full compensation of ground current[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 4561-4570.
- [20] 涂春鸣, 黄泽钧, 郭祺, 等. 一种具备单相接地故障调控与无功补偿能力的多功能并网型变流器[J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4286-4295.
- TU Chunming, HUANG Zejun, GUO Qi, et al. Multifunctional grid-connected converter with capabilities of single-phase grounding fault regulation and reactive power compensation[J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4286-4295.
- [21] 陈锐, 周丰, 翁洪杰, 等. 基于双闭环控制的柔性接地装置消弧方法[J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30(4): 63-70.
- CHEN Rui, ZHOU Feng, WENG Hongjie, et al. Flexible grounding device with the dual-loop control method for arc suppression[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(4): 63-70.
- [22] ZHAO T F, WANG G Y, BHATTACHARYA S, et al. Voltage and power balance control for a cascaded H-bridge converter-based solid-state transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1523-1532.
- [23] 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.
- [24] 崔俊昊, 田桂珍, 刘广忱, 等. 独立运行直流微电网混合储能系统功率分配控制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(4): 129-136.
- CUI Junhao, TIAN Guizhen, LIU Guangchen, et al. A study on the power distribution control strategy of hybrid energy storage system in the isolated DC microgrid[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(4): 129-136.
- [25] 雷珽, 欧阳曾恺, 李征, 等. 平抑风能波动的储能电池SOC与滤波协调控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(7): 126-131.
- LEI Ting, OUYANG Zengkai, LI Zheng, et al. Coordinated control of battery SOC maintaining and filtering for wind power fluctuation smoothing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7): 126-131.
- [26] 赵国军, 陈坤燚, 曾伟, 等. 计及等效负载变化的消弧逆变器性能分析与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 148-157.
- ZHAO Guojun, CHEN Kunyi, ZENG Wei, et al. Performance analysis and design of an arc suppression inverter considering equivalent load change[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 148-157.
- [27] 立梓辰, 张延迟, 李硕, 等. 基于交流调功电路的有源滤波器PI-PR-重复前馈控制算法[J]. 电测与仪表, 2022, 59(2): 53-62.
- LI Zichen, ZHANG Yanchi, LI Shuo, et al. The PI-PR-repeat feed-forward control algorithm of active power filter for AC power-regulating circuit[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(2): 53-62.
- [28] 陈锐, 周丰, 翁洪杰, 等. 基于双闭环控制的配电网单相接地故障有源消弧方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 128-133.
- CHEN Rui, ZHOU Feng, WENG Hongjie, et al. Active arc-suppression method based on double closed-loop control under single-phase grounding faults in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 128-133.