

doi: 10.3969/j.issn.1672-0792.2021.07.003

含多端口能量路由器的多能互补系统故障 保护功能测试研究

周一凡, 苏适, 朱斌, 孙成

(云南电网有限责任公司 电力科学研究院, 云南 昆明 650217)

摘要: 针对某区域用电负荷存在严重的季节性过载现象, 以及可再生能源存在功率波动大、稳定性较差的问题, 研制了多能(含水电、光伏、储能)、多端口的能量路由器装置及其能量管理系统。综合考虑当地多场景运行, 解决了季节性过载问题, 实现了能量的合理配置与利用。首先, 对比分析选定能量路由器各端口变换器的拓扑结构; 然后, 对多场景下的工作模式进行介绍; 最后, 对含能量路由器的多能互补系统进行故障保护功能测试。测试结果表明, 该系统具有较好的故障保护功能, 有效实现了不同场景下的工作模式切换, 直流母线电压稳定以及上层功率指令跟踪等功能, 解决了当地用电负荷季节性过载和可再生能源功率波动较大的问题。

关键词: 多端口能量路由器; 可再生能源; 多场景运行; 故障保护

中图分类号: TM73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-0792(2021)07-0018-08

Research on Fault Protection Function Test of Multi-energy Complementary System Containing Multi-port Energy Router

ZHOU Yifan, SU Shi, ZHU Bin, SUN Cheng

(Electrical Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract: For a certain area, there is a serious seasonal overload phenomenon of electricity load, and renewable energy sources have the problems of large power fluctuations and poor stability. This paper has developed multi-energy (hydropower, photovoltaic, and energy storage), multi-port energy router device and its energy management system, comprehensively considering the local multi-scenario operation, solving the seasonal overload problem, and realizing the reasonable allocation and utilization of energy. First, the topology of each port converter of the energy router is selected for comparative analysis; secondly, the working mode under multiple scenarios is introduced; finally, the fault protection function

收稿日期: 2021-04-12

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0904603); 云南电网有限责任公司电力科学研究院科技项目(YNKJXM20180007)

作者简介: 周一凡(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网控制与优化;

苏适(1972—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为新能源与智能电网;

朱斌(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网运行与控制;

孙成(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网优化运行。

test of the multi-energy complementary system with energy router is carried out. The test results show that the system has better fault protection function, effectively realizing the work mode switching in different scenarios, the DC bus voltage stabilization and upper power command tracking function, and can solve the problems of seasonal overload of local electricity load and large power fluctuations of renewable energy sources.

Key words: multi-port energy router; renewable energy sources; multi-scenario operation; fault protection

0 引言

随着旅游业的发展, 某区域用电负荷存在无限制接入、无法准确预测等问题, 且存在较严重的季节性过载现象, 旅游旺季用电负荷明显上升, 导致供电可靠性下降。同时, 该区域的水力发电和光伏发电系统存在功率波动大、稳定性较差的问题。针对以上存在的问题, 如果仅采用一次手段对配电网进行改造, 会造成一次设备浪费严重, 大多数情况下低载运行。

能量路由器是配电网系统多能接入的核心装置, 最基本任务是管理接入能量和负荷, 寻求最优路径^[1-3]。能量路由器具有多个电气接口, 可将配电网与各种可再生能源、各类负荷需求紧密结合, 实现能源的耦合、互济、互补^[4-6]。因此, 能量路由器的应用研究具有重要意义。

本文研制了多能(含水电、光伏、储能)、多端口的能量路由器装置及其能量管理系统, 能够就近消纳小水电、光伏等新能源, 综合考虑当地多场景运行, 实现资源的合理配置与利用, 解决季节性过载问题。但能量路由器的引入对配电网的功能及性能会带来影响^[7-8]。因此, 需要对接入能量路由器后的配电网进行测试。本文将针对含能量路由器的多能互补系统的故障保护功能进行测试研究, 从而评估该多能互补系统的功能和性能。

1 能量路由器拓扑结构和工作模式

1.1 拓扑结构

如图1所示, 该能量路由器具有4个端口, 总功率为500 kW, 直流母线电压为750 V, 储能端口能够实现能量的双向流动。系统拓扑结构如图2所示, 图3为多端口能量路由器实际系统。

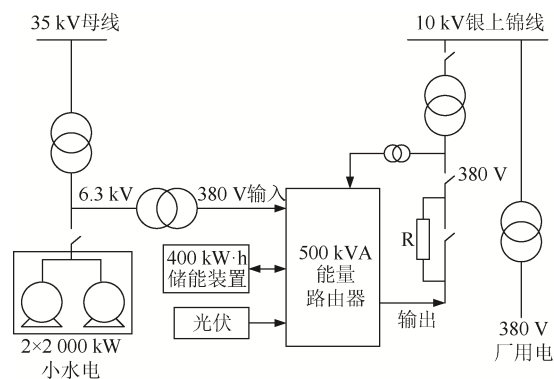


图1 电厂布置图

Fig. 1 Power plant layout

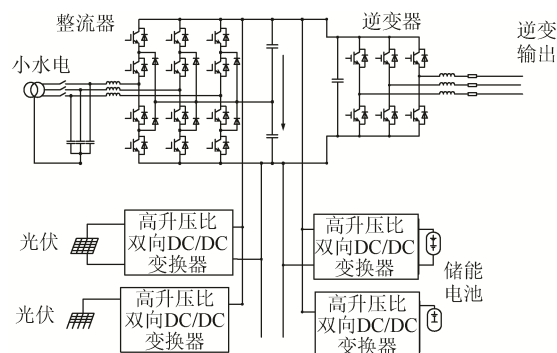


图2 拓扑结构

Fig. 2 Topology



图3 多端口能量路由器

Fig. 3 Multi-port energy router

(1) 小水电端口采用 1 个 500 kW 的中点钳位型 (NPC) 三电平 PWM 整流器。

水电端口的输出电压为 6.3 kV, 通过工频变压器将 6.3 kV 转化为 380 V, 方便能量路由器装置的低压接入和工程实现。

拓扑结构如图 4 所示, 包括 12 个带有反并联二极管的 IGBT ($T_1 \sim T_{12}$) 和 6 个二极管 $D_1 \sim D_6$ 。相较两电平结构, 中点钳位型 (NPC) 三电平结构虽然器件数量较多, 控制较为复杂, 但对开关管进行合理控制, 可有效改善输出电压波形, 降低谐波含量, 提高电能质量^[9,10]。并且开关管承受的电压仅为 $U_d/2$, 电压应力小, 适合高压大功率的场景下使用。

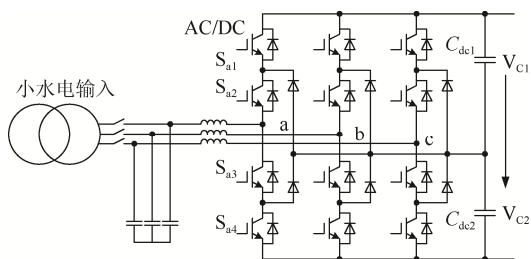


图 4 中点钳位型 (NPC) 三电平 PWM 整流电路

Fig. 4 Neutral point clamp (NPC) type three-level PWM rectifier circuit

(2) 并网端口采用 1 个 500 kW 的两电平隔离型 PWM 逆变器。

并网端口接入 10 kV 电网, 故采用 10 kV/380 V 的工频变压器实现电压等级变换, 方便能量路由器装置的低压接入以及电气隔离。

如图 5 所示, 该电路能实现能量双向流动, 可以运行在整流状态或逆变状态, 且两种状态下均能实现功率因数单位化。

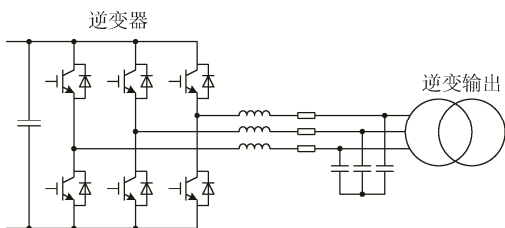


图 5 三相桥式两电平 PWM 逆变电路

Fig. 5 Three-phase bridge two-level PWM inverter circuit

电路工作原理遵循 180°导电方式, 上下桥臂

交替导通, 三相开关器件的导通起始角度依次相差 120°。任意时刻均有 3 个开关管导通, 不同开关组合时输出的相电压值如表 1 所示 (设直流侧电压为 1)。

表 1 不同开关组合时输出的相电压值

Tab. 1 The output phase voltage value in different switch combinations

S_a	S_b	S_c	U_{a0}	U_{b0}	U_{c0}
0	0	0	0	0	0
0	0	1	-1/3	-1/3	2/3
0	1	0	-1/3	2/3	-1/3
0	1	1	-2/3	1/3	1/3
1	0	0	2/3	-1/3	-1/3
1	0	1	1/3	-2/3	1/3
1	1	0	1/3	1/3	-2/3
1	1	1	0	0	0

(3) 光伏/储能端口分别采用 2 个 250 kW 的非隔离型 DC/DC 变换器。

光伏/储能端口的非隔离型 DC/DC 变换器采用高升压比级联型 Buck/Boost 电路, 不仅可以实现双向直流升、降压变换^[11,12], 且可以通过合理控制 IGBT 关断及适当的控制策略, 确保光伏端口的能量单向流动。拓扑结构如图 6 所示, 包含 8 个带有反并联二极管的 IGBT。

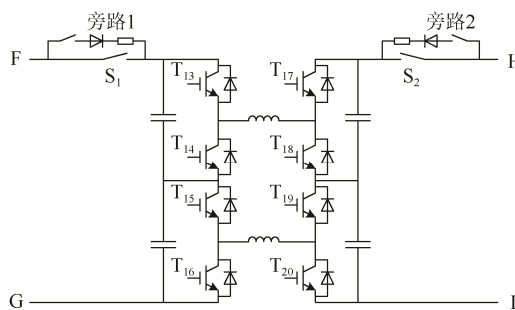


图 6 高升压比级联型 Buck/Boost 电路

Fig. 6 Buck/Boost circuit of high-step-up cascade

该电路的工作原理如表 2 所示, 在能量流向不同的情况下, 均可作为 Buck 或者 Boost 变换器使用, 每种变换器都存在两个不同的工作状态, 每个工作状态下的能量通道也不同。

表 2 工作原理

Tab. 2 Working principle

(a) 能量由 FG 端流向 HI 端

能量流向	变换器类型	工作状态	导通关断情况	能量通道
FG 端 流向 HI 端	Buck 变换器	状态 1	T ₁₃ 、T ₁₆ 导通	FG 侧电源通过 T ₁₃ 、T ₁₆ 以及 T ₁₇ 、T ₂₀ 的二极管向 HI 侧提供能量
		状态 2	T ₁₃ 、T ₁₆ 关断	电感电流通过 T ₁₄ 、T ₁₅ 、T ₁₇ 、T ₂₀ 的二极管续流
	Boost 变换器	状态 1	T ₁₃ 、T ₁₆ 、T ₁₈ 、T ₁₉ 导通	FG 侧电源通过 T ₁₃ 、T ₁₆ 、T ₁₈ 、T ₁₉ 向电感充电
		状态 2	T ₁₃ 、T ₁₆ 导通, T ₁₈ 、T ₁₉ 关断	FG 侧电源和电感共同向右侧电容充电并向 HI 侧提供能量

(b) 能量由 HI 端流向 FG 端

能量流向	变换器类型	工作状态	导通关断情况	能量通道
HI 端 流向 FG 端	Buck 变换器	状态 1	T ₁₇ 、T ₂₀ 导通	HI 侧电源通过 T ₁₇ 、T ₂₀ 以及 T ₁₃ 、T ₁₆ 的二极管向 FG 侧提供能量
		状态 2	T ₁₇ 、T ₂₀ 关断	电感电流通过 T ₁₃ 、T ₁₆ 、T ₁₈ 、T ₁₉ 的二极管续流
	Boost 变换器	状态 1	T ₁₄ 、T ₁₅ 、T ₁₇ 、T ₂₀ 导通	FG 侧电源通过 T ₁₄ 、T ₁₅ 、T ₁₇ 、T ₂₀ 向电感充电
		状态 2	T ₁₄ 、T ₁₅ 关断, T ₁₇ 、T ₂₀ 导通	HI 侧电源和电感共同向左侧电容充电并向 FG 侧提供能量

1.2 工作模式

1.2.1 DC/AC 变换器工作模式

DC/AC 变换器详细的工作模式切换过程如图 7 所示。

并网逆变器包括两种工作模式：

(1) 并网模式：充电包括恒流充电、恒压充电；放电包括恒功率放电、恒流放电。能实现平滑功率输出、削峰填谷、系统调频、改善电能质量等功能。

(2) 独立逆变模式：在电网断电或处于孤岛状态时，稳定输出电压和频率，可继续为各种负荷供电，此时变流器处于放电状态。

1.2.2 DC/DC 变换器工作模式

DC/DC 变换器详细的工作模式切换过程如图 8 所示。

DC/DC 变换器包括 4 种工作模式：

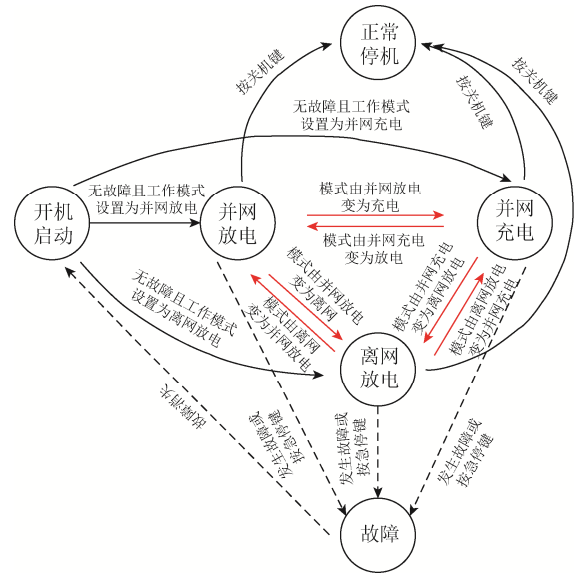


图 7 DC/AC 变换器工作模式

Fig. 7 DC/AC converter working mode

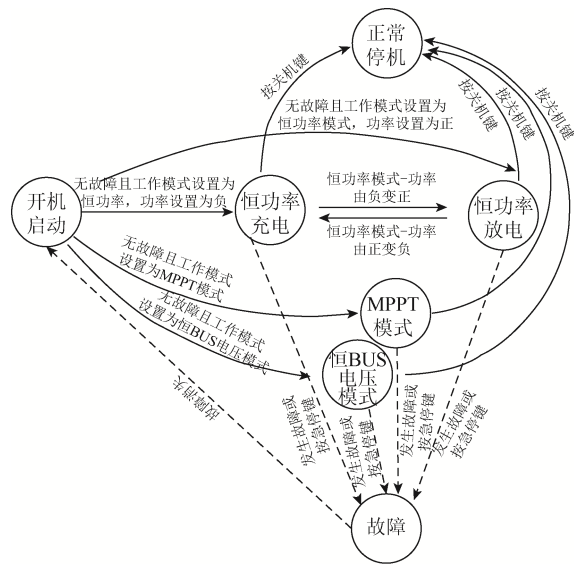


图 8 DC/DC 变换器工作模式

Fig. 8 DC/DC converter working mode

(1) 恒功率模式：变流器以设定功率进行充放电。

(2) 恒流模式：变流器以储能侧设定电流进行充放电。

(3) 恒母线电压模式：变流器根据设定值维持母线电压恒定。母线电压大于设定值时，储能充电使母线电压降低；母线电压小于设定值时，储能放电，使母线电压升高。

(4) MPPT 模式：保证光伏阵列始终以最大功率输出。

2 故障保护功能测试

在各个端口都正常运行（光伏端口暂时未使用），直流母线电压稳定，系统输出功率跟随上层功率指令工作的前提下，对实际系统在不同故障情况下的响应进行了现场测试。

2.1 正常运行状态

如表 3 所示，在正常运行状态下，小水电机组向能量路由器输出有功功率为 24.1 kW，能量路由器向电网输出有功功率为 9.9 kW，储能电池#1 和#2 均处于充电状态。

表 3 正常运行状态下的电气参数

Tab. 3 The electrical parameters under normal operating conditions

(a) 小水电、并网端口和直流母线电气参数			
	输出有功功率/kW	输出无功功率/kVar	电压/V
小水电端口	-24.1	0	403.2 (线)
并网端口	9.9	0	233.2 (相)
直流母线	-	-	700
(b) 储能电池电气参数			
	SOC/%	电池侧 电流/A	电池侧 电压/V
储能电池#1	73	-5.8	612.9
储能电池#2	67	-6.7	612.9

2.2 小水电端口断电且短时间内不恢复

正常运行状态下，其他端口正常运行，但小水电端口突然断电，测试结果如表 4 所示。

由表 4 可以看出，水电端口断电后，直流母线电压仍保持稳定，但小水电端口变流器状态由“运行”变为“故障”，停止运行。储能电池运行状态变为放电，系统由储能电池#1 和#2 放电提供能量维持运行。电池放电按照恒流模式运行，输出功率固定，因此无法跟随上层功率指令运行。此时并网输出有功功率变大，为 30.6 kW。

一段时间后，由于小水电端口一直未恢复供电，储能电池#1 和#2 依次变为放电截止状态，结果如表 5、表 6 所示。

表 4 小水电端口断电且短时间内不恢复状态下的电气参数

Tab. 4 The electrical parameters with the power of small hydropower port being cut off and non-restoring in a short time

(a) 小水电、并网端口和直流母线电气参数			
	输出有功功率/kW	输出无功功率/kVar	电压/V
小水电端口	0	0	4.0 (线)
并网端口	30.6	0	235.3 (相)
直流母线	-	-	699.9
(b) 储能电池电气参数			
	SOC/%	电池侧 电流/A	电池侧 电压/V
储能电池#1	75	31.9	569.2
储能电池#2	72	31.9	569.5

表 5 储能电池#1 停止供电状态下的电气参数

Tab. 5 The electrical parameters with the power of the energy storage battery #1 being cut off

(a) 小水电、并网端口和直流母线电气参数			
	输出有功功率/kW	输出无功功率/kVar	电压/V
小水电端口	0	0	4.1 (线)
并网端口	12.9	0	234.5 (相)
直流母线	-	-	700
(b) 储能电池电气参数			
	SOC/%	电池侧 电流/A	电池侧 电压/V
储能电池#1	73	0	577.8
储能电池#2	70	31.8	560.8

表 6 储能电池#2 停止供电状态下的电气参数

Tab. 6 The electrical parameters with the power of the energy storage battery #2 being cut off

(a) 小水电、并网端口和直流母线电气参数			
	输出有功功率/kW	输出无功功率/kVar	电压/V
小水电端口	0	0	4.1 (线)
并网端口	12.9	0	234.5 (相)
直流母线	-	-	700
(b) 储能电池电气参数			
	SOC/%	电池侧 电流/A	电池侧 电压/V
储能电池#1	73	0	577.8
储能电池#2	70	31.8	560.8

由表 5、表 6 可以看出, 由于小水电端口长时间未恢复供电, 储能电池#1 先进入放电截止状态, 系统仅由储能电池#2 提供能量, 并网变流器输出功率大幅下降, 但系统内部的直流母线电压依然能保持稳定; 当小水电端口继续保持未恢复供电状态, 储能电池#2 也同样进入放电截止状态。此时由于能量路由器各端口无能量输入, 直流母线失压, 系统停机。

2.3 小水电端口断电且短时间内恢复

小水电端口断电后, 系统运行 20 min, 之后恢复供电。结果如表 7 所示。

表 7 小水电端口断电且短时间内恢复状态下的电气参数

Tab. 7 The electrical parameters with the power of small hydropower port being cut off and recovering in a short time

(a) 小水电、并网端口和直流母线电气参数			
	输出有功功率/kW	输出无功功率/kVar	电压/V
小水电端口	-24.1	0	403.2 (线)
并网端口	9.9	0	233.2 (相)
直流母线	-	-	700
(b) 储能电池电气参数			
	SOC/%	电池侧 电流/A	电池侧 电压/V
储能电池#1	73	-5.8	612.9
储能电池#2	67	-6.7	612.9

小水电端口断电后与表 4 测试结果相同, 由储能电池#1 和#2 供电。待 20 min 后小水电端口恢复供电, 由表 7 可以看出, 小水电端口变流器重新启动运行, 恢复能量输入; 储能电池运行状态由放电变为充电, 系统输出功率跟随上层功率指令, 系统恢复到正常运行状态。

2.4 储能电池侧出现故障

分别对储能电池#1 单独故障、两组储能电池均故障以及两组储能电池故障均消除 3 种状态进行模拟, 测试系统的故障响应状态, 结果如表 8~10 所示。

由表 8 可以看出, 储能电池#1 单独故障时, 直流母线电压始终保持稳定, 储能端口变流器 1 停机, 储能电池#2 保持充电状态, 小水电端口输入能量, 系统连接电网供电, 保持稳定运行。

表 8 储能电池#1 发生故障状态下的电气参数

Tab. 8 The electrical parameters of energy storage battery #1 under fault state

(a) 小水电、并网端口和直流母线电气参数			
	输出有功功率/kW	输出无功功率/kVar	电压/V
小水电端口	-18.7	-0.01	403.5 (线)
并网端口	10.2	0	233.3 (相)
直流母线	-	-	699.8
(b) 储能电池电气参数			
	SOC/%	电池侧 电流/A	电池侧 电压/V
储能电池#1	74	0	606.1
储能电池#2	69	-4.4	613.2

表 9 储能电池#1、#2 均发生故障状态下的电气参数

Tab. 9 The electrical parameters of energy storage batteries #1 and #2 under fault state

(a) 小水电、并网端口和直流母线电气参数			
	输出有功功率/kW	输出无功功率/kVar	电压/V
小水电端口	-15.5	-0.02	402.9 (线)
并网端口	9.9	0	233.2 (相)
直流母线	-	-	700
(b) 储能电池电气参数			
	SOC/%	电池侧 电流/A	电池侧 电压/V
储能电池#1	74	0	603.1
储能电池#2	70	0	601

表 10 两组储能电池故障均消除后的电气参数

Tab. 10 The electrical parameters after the two sets of energy storage batteries fault being eliminated

(a) 小水电、并网端口和直流母线电气参数			
	输出有功功率/kW	输出无功功率/kVar	电压/V
小水电端口	-18.5	0	403.1 (线)
并网端口	9.9	0	233.1 (相)
直流母线	-	-	700.1
(b) 储能电池电气参数			
	SOC/%	电池侧 电流/A	电池侧 电压/V
储能电池#1	74	-4	613
储能电池#2	70	0	597.6

由表 9 可以看出, 当两组储能电池同时故障

时,直流母线电压始终保持稳定,储能端口变流器1、2均停机,小水电端口输入能量,系统连接电网供电,保持稳定运行。

由表10可以看出,当两组储能电池故障均消除后,直流母线电压依旧保持稳定,储能电池恢复正常,系统恢复至稳定运行状态。

2.5 小水电端口断电且两组储能电池均故障

当小水电端口断电且两组储能电池均发生故障,测试结果如表11所示。

表11 小水电端口断电且两组储能电池均故障状态下的电气参数

Tab. 11 The electrical parameters with the power of small hydropower port being cut off under the two sets of energy storage batteries faulty state

(a) 小水电、并网端口和直流母线电气参数

	输出有功功率/kW	输出无功功率/kVar	电压/V
小水电端口	0	0	6(线)
并网端口	0	0.4	234(相)
直流母线	-	-	5.6

(b) 储能电池电气参数

	SOC/%	电池侧	电池侧	电池侧
		电流/A	电压/V	功率/kW
储能电池#1	73	0	583.6	0
储能电池#2	67	0	580.7	0

结果显示,小水电端口断电后,小水电端口变流器停机;储能电池#1、#2均故障,储能端口变流器1、2停机。能量路由器无能量输入,所有设备进入停机状态。

3 结论

当小水电端口断电后,储能电池可以迅速放电,使直流母线电压始终稳定在700V左右,小水电端口故障消除后,系统能快速恢复至正常运行状态;储能电池故障消除前后,系统均能维持正常运行,但削峰填谷等功能无法正常实现;各端口均故障时,系统能够稳定切换至停机状态。

综上所述,系统各端口基本功能达到了预定目标,全端口联合测试功能正常,各部分可以相互协调,同时工作。该系统具有较好的故障保护

功能,各端口出现故障时,有效实现了不同场景下的工作模式切换,直流母线电压稳定以及上层功率指令跟踪等功能,能保证系统在一定故障时间内的稳定输出能力。并且在故障消除后能够快速恢复至正常运行状态,所以可以用于解决当地用电负荷季节性过载和可再生能源功率波动较大的问题。

参考文献:

- [1] 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, LV ZHENG, et al. Research on structure and control strategy of a novel energy router[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1202-1210(in Chinese).
- [2] 刘振.适应新能源接入的多端口能量路由器关键技术研究[D].长沙:湖南大学,2019.
LIU ZHEN. Research on the key technology of multi-port energy router adapting to new energy access[D]. Changsha: Hunan University, 2019(in Chinese).
- [3] 张红涛,徐天奇,杨婕,等.能源互联网中能量路由器的关键技术研究[J].电工技术,2019(20):105-107.
ZHANG HONGTAO, XU TIANQI, YANG JIE, et al. Research on key technologies of energy routers in energy internet[J]. Electric Engineering, 2019(20): 105-107(in Chinese).
- [4] 盛万兴,段青,王良,等.基于多代理协调机制的能量路由器群组与配电网综合规划[J].高电压技术,2021,47(1):1-11.
SHENG WANXING, DUAN QING, WANG LIANG, et al. Comprehensive planning for energy routers and distribution network based on multi-agent system coordination mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 1-11(in Chinese).
- [5] 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(in Chinese).
- [6] 孙湛冬,靳友豪.泛在电力物联配电网拓扑研究[J].农村电气化,2019(8):26-29.
- [7] 施灵卫,刘桂英.多LAN端口能量路由器切换控制策略研究[J].电力科学与技术学报,2019,34(2):

- 84-90.
SHI LINGWEI, LIU GUIYING. Research on switching control strategy for the multi-LAN-port energy router[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 84-90(in Chinese).
- [8] XU X, HU Y, TAI N, et al. A reliable distribution network structure with the use of electric energy router[C]//2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration(EI2). Beijing, China: IEEE, 2017: 1-3.
- [9] 李宁, 王跃, 雷万钧, 等. NPC 三电平变换器中点电压控制方法综述[J]. 电力电子技术, 2011, 45(10): 78-80.
LI NING, WANG YUE, LEI WANJUN, et al. Overview of neutral point potential fluctuation control strategies in NPC three-level converters[J]. Power Electronics, 2011, 45(10): 78-80(in Chinese).
- [10] 余世瑶, 王琛琛, 辛宏亮, 等. 考虑三电平中点钳位型变换器中点电压波动抑制的混合调制方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(S1): 146-154.
YU SHIYAO, WANG CHENCHEN, XIN HONGLIANG, et al. Hybrid PWM strategy for neutral point voltage fluctuation suppression of three level neutral point clamped converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(S1): 146-154(in Chinese).
- [11] 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(in Chinese).
- [12] 张程翔, 陆莹, 贺军, 等. 基于多端口能量路由器的微网系统及其调试[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(13): 5149-5155.
ZHANG CHENGXIANG, LU YING, HE JUN, et al. Commissioning of microgrid system based on multi-port energy router[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(13): 5149-5155(in Chinese).