

直流微电网控制保护策略研究

周钰^{1,✉}, 张浩¹, 陈锐², 鲁丽娟¹, 施世鸿¹

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 2. 广东电科院能源技术有限责任公司, 广州 510080)

摘要: [目的] 直流微电网的控制及保护技术, 对保证直流微电网的可靠、安全运行具有重要作用。论文旨在解决直流微电网设计中的关键技术问题。[方法] 从直流母线拓扑结构选择、并网切换控制策略、保护配置方案三个方面深入开展研究。[结果] 通过研究, 给出了直流母线拓扑结构选择原则、直流微电网的控制策略流程、保护分区及配置, 并对直流互感器的选择进行了分析比较。[结论] 研究成果在国家示范项目得到了有效性验证, 投运以来运行效果良好。

关键词: 直流微电网; 直流母线拓扑结构; 控制策略; 保护配置

中图分类号: TM7; TM721.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)04-0061-06

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Strategy of DC Micro-grid Control and Protection

ZHOU Yu^{1,✉}, ZHANG Hao¹, CHEN Rui², LU Lijuan¹, SHI Shihong¹

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. Guangdong Dian Ke Yuan Energy Technology Co., Ltd., Guangzhou, China)

Abstract: [Introduction] The control and protection technology of DC microgrid plays an important role in ensuring the reliable and safe operation of DC microgrid. The paper aims to solve the key technologies in the design of DC micro-grid. [Method] DC bus topology selection, control strategy, and protection configuration scheme were discussed in the paper. [Result] The selection principle of DC bus topology structure, the control strategy process of DC micro-grid, protection zone and configuration are given in the paper. At the same time, the selection of DC transformer is analyzed and compared. [Conclusion] The method has been validated in national demonstration projects, and it has performed well since it was put into operation.

Key words: DC micro-grid; DC bus structure; control strategy; protection configuration

微电网包含分布式能源、储能装置、负载、电力电子器件及其控制等装置, 一般分为交流微电网、直流微电网和交直流混合微电网, 从运行方式上, 可分为并网和孤岛两种运行模式^[1]。直流微电网和交流微电网相比具有更多的优势, 其电能损耗小, 且转换环节少, 相对控制系统更简单, 随着直流负荷设备不断的出现, 直流微电网在电力系统中具有越来越广阔的应用前景^[2-4]。

直流微电网的研究及应用过程中, 除了要解决与交流微电网共性的能量管理、电压质量管理等问题外, 还有很多有别于交流微电网的特殊问题, 文

献 [5-8] 介绍了直流微电网中的关键技术, 其中, 文献 [5] 认为电网结构、控制策略、供电可靠性及经济调度是研究的主要方向; 文献 [8] 认为直流微电网的关键是做好能量管理, 做好微电网的电压调整及电能质量控制。直流配电网中的直流微电网除了考虑直流微电网各主要元件的运行、控制、保护相关要求外, 还需要考虑直流微电网接入直流配电网的相关技术问题, 包括直流变压器的拓扑、运行控制策略、保护级差配合等内容^[9-13]。本文从工程应用的角度出发, 从直流微网母线拓扑结构、控制策略、保护配置三个角度, 对直流配电网中的直流微电网工程主要技术难点进行研究, 旨在解决工程建设过程中的实际技术问题。

收稿日期: 2020-07-17 修回日期: 2020-09-08

基金项目: 中国能建广东院科技项目“柔性直流输电控制与保护设备技术研究”(ER03391W)

1 直流母线拓扑结构

直流微电网接入直流配网的母线拓扑结构可分为对称双极系统、对称单极系统和单极系统三种类型,拓扑结构如图1所示。目前已投运或者正在建设的工程中多为单极或者对称单极系统。根据国家标准(GB/T 35727—2017),目前国内中压直流配电网的标称电压主要为 $\pm 35\text{ kV}$ 、 $\pm 10\text{ kV}$ 、 $\pm 3\text{ kV}$ 、 $\pm 1.5\text{ kV}$,低压直流配电网的标称电压主要为电压等级以 $1\ 500\text{ V}$ ($\pm 750\text{ V}$)、 750 V ($\pm 375\text{ V}$)、 220 ($\pm 110\text{ V}$)为主,可根据工程实际应用场景及直流负荷需求确定选择合理的中压直流配网以及低压直流微电网的电压水平。

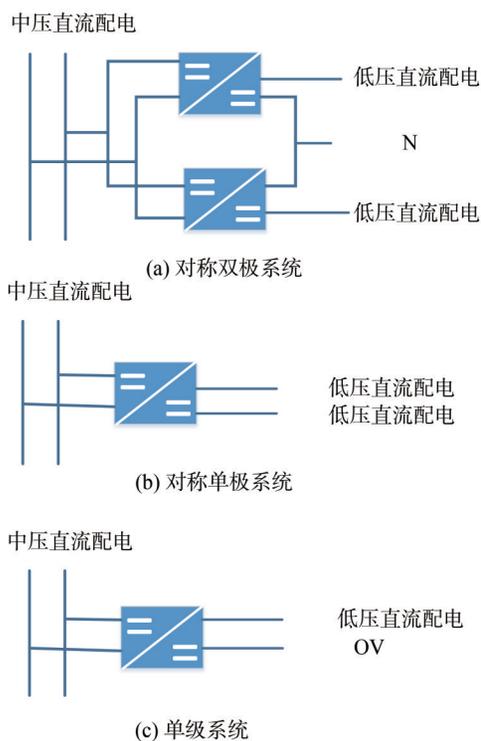


图1 直流母线拓扑结构

Fig. 1 Structure of DC busbar

1.1 对称双极系统

对称双极系统直流微电网与直流配网的互联端口采用两个相同容量的双向DC/DC变流器,两者共用一极的直流母线为N。对称双极系统可在单机故障时,另外一极可独立运行,供电的灵活性及可靠性高,但是该拓扑结构配置两套电力电子变流装置,成本相对较高,国内尚无成熟工程应用。

1.2 对称单极系统

对称单极系统直流变压器没有中性线N,直流

变压器内部采用高阻接地方式,与直流配网的互联端口变压器只输出正负额定电压,但可通过DC/DC设备为直流设备工作所需的电压。目前国内贵州大学、东莞松山湖示范项目采用该拓扑结构。

1.3 单极系统

单极系统只配置一套电力电子变流器,一极为极间额定电压,另一极电压为零。目前浙江上虞示范项目采用该拓扑结构。该拓扑结构主要是考虑到项目负荷对电压的特殊要求。

三种直流母线的拓扑结构各有优缺点,具体技术经济比较如表1所示:

表1 三种母线结构技术经济比较

Tab. 1 Technical and economic comparison of three busbar structures

比较项目	对称双极系统	对称单极系统	单极系统
直流变压器结构	内置双套独立变流器	单套变流器	单套变流器
直流变压器产品成熟度	无产品及样机,需定制	有产品及样机,需改型	有产品及样机,需改型
研发成本	较高	较低	较低
直流母线数量	三条	两条	两条
系统电压	提供两种电压等级,电压适用范围更广	提供一种电压等级,经电压变换扩展适用范围	提供一种电压等级,经电压变换扩展适用范围
故障识别	TN或TT接地方式时,容易识别单极接地;IT接地方式时,较难识别单极接地	IT接地方式时,较难识别单极接地	IT接地方式时,较难识别单极接地
工程应用	尚无	贵州大学、东莞松山湖	浙江上虞

综上所述,各种拓扑结构各有优劣,应该从工程的系统运行需求及经济性方面进行综合比选。从产品的成熟度及经济性的角度,上述三种拓扑结构,对称单极及单极供电系统的成熟度更高,工程可实施性更强。

2 直流微网控制策略

直流微电网的控制策略主要包括并网运行控制策略、离网运行控制策略以及并网转离网、离网转并网切换过程中的控制策略。

2.1 并网运行控制策略

在并网运行模式下,以经济运行行为评价指标,

光伏发电尽量就地消纳,储能以优先满足微电网需求为主要目标。直流配电网可通过直流变压器对微电网进行功率支援,在不影响直流微电网稳定运行的情况下,光、储具备对 ± 10 kV直流配电网功率支援的功能。

并网运行控制策略往往以经济运行作为控制目标,最大化促进新能源的消纳。当新能源发电量大于直流微网系统内负荷时,可采用以储能系统为可调元件,优先在直流微网内进行消纳,电量余额通过直流变压器上网;当新能源发电量小于直流微网系统内负荷时,可通过直流变压器对直流微网进行功率支援。

并网运行控制策略直流变压器在定电压或下垂控制模式,控制直流微网电压,储能系统在定功率运行模式,配合新能源实现动态功率平衡。

2.2 离网运行控制策略

在离网运行控制模式下,储能系统处于下垂控制模式,控制微电网直流母线电压,储能根据新能源出力情况,自发进行功率输出调节,维持系统发电功率及负荷的动态平衡。

由于当系统发生功率的功率缺额或过剩时,储能元件的功率可调范围受到储能系统容量的限制,所以当功率缺额超出储能元件的输出范围时,需要根据负荷分级,紧急切除部分负荷;当新能源出力超出负荷及储能共同消纳能力时,需要对新能源的出力进行限制。直流微电网的电压控制按照 $0/\pm 5\%/\pm 10\%$ 电压波动进行分级紧急切负荷控制。

2.3 并网运行切换策略

1) 并网转离网切换

并网转离网运行切换,主要包计划性运行切换及非计划性运行切换两种类型。

当需要设备检修或者隔离故障时,可通过调度系统下达并网转离网切换命令,进行计划性并网转离网切换,计划性切换具体流程如图2所示。

当中压直流配电出现故障或者大扰动时,需要非计划性并网转离网运行,防止事故扩大保证电网的安全,非计划性切换流程如图3所示。

2) 离网转并网切换

离网转并网均在计划的情况下进行,通过储能及直流变压器的调节尽量缩小两侧电压偏差,当满足合闸条件时闭合低压侧的断路器,具体流程如

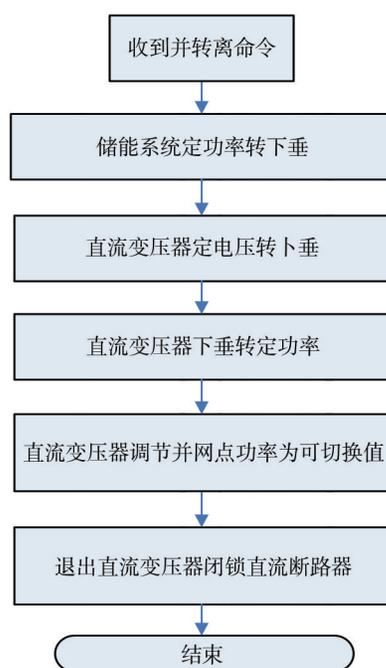


图2 计划并网转离网切换过程

Fig. 2 Planned grid-connected mode transfer to grid-disconnected mode control procedure diagram

图4所示。

3 直流微网保护配置

3.1 直流测量装置的选择

直流微网的控制保护需要直流母线电压及各支路电流的采样值作为基础,通过传感元件处理后送给直流微电网的控制或保护装置^[14-16]。常用的低压直流测量装置主要包括全光纤互感器、电阻分流器、巨磁阻效应传感器、零磁通型霍尔传感器。由于直流电压在正常运行及暂态过程中的工作范围的差异,直流电压测量装置一般能满足要求,然而直流电流在正常运行及系统短路的工况下可能电流值相差十几倍,因此,直流电流测量装置存在兼顾正常运行时小额定电流测量精度以及短路电流采样抗饱和的双重需求,本文主要针对目前主流的低压直流电流测量装置选型做了技术经济比较,主要特性如表2所示。

从成本、测量范围、抗饱和性几个角度比较可知,全光纤互感器性能较好,在高压及超高压直流电网中应用广泛,但是成本较为昂贵;电阻分流器和巨磁阻效应传感器可以兼直流微网应用场景测量精度和抗饱和性,较为适用于与直流微电网的应用场景。

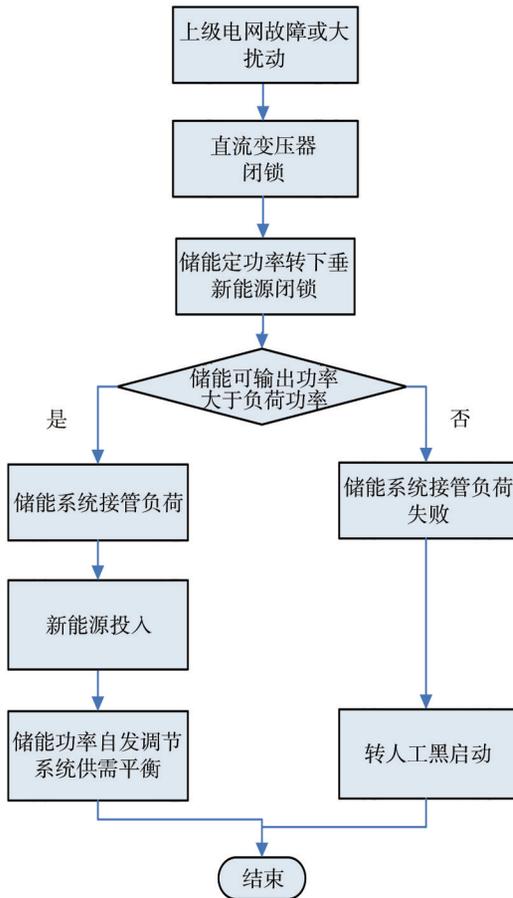


图3 非计划并网转离网切换过程

Fig. 3 Unplanned grid-connected mode transfer to grid-disconnected mode control procedure diagram

3.2 保护配置方案

针对第一节所述的拓扑结构，整个低压直流微电网的保护分区均可以按照三个区域进行划分：直流变压器保护区、直流母线保护区、直流支路保护区。

1) 直流变压器保护区

直流变压器保护主要针对本体的故障，采用差动保护作为主保护，过流保护、过/欠压保护作为后备保护。此外本体电力电子器件具备元件保护，由本体自身的控保系统实现。

2) 直流母线保护

直流母线配置直流母线差动保护作为直流母线的主保护、并配置直流过流保护、直流过压/欠压保护作为后备保护。

3) 直流支路保护

直流支路主要针对直流微网内的新能源及储能、负荷等出线支路，配置带方向过流保护作为主

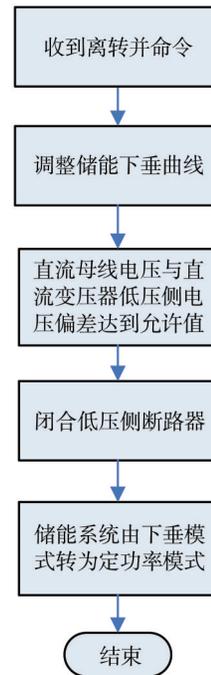


图4 离网转并网切换过程

Fig. 4 Planned grid-disconnected mode transfer to grid-connected mode control procedure diagram

表2 低压直流电流互感器的经济比较

Tab. 2 Economic comparison of low-voltage DC current transformers

比较内容	全光纤互感器	电阻分流器	巨磁阻效应 传感器	零磁通 型霍尔 传感器
测量范围 (最大不饱 和电流)	一般<6 p.u 最大<30 p.u	<6 p.u	<6 p.u	<1.5 p.u
测量精度	(0.1-1)% Id<1.5 A (1-10)% Id<3% (10-134)% Id<0.2% (134-300)% Id<1.5% (300-600)% Id<3%	(10-134)% Id<0.5% (134-300)% Id<1.5% (300-600)% Id<10%	(10-134)% Id<0.2% (134-300)% Id<1.5% (300-600)% Id<3%	0.5
抗饱和性	高	中	中	低
设备价格	高	中	中	低

保护，配置直流过压/欠压保护、直流断线保护作为后备保护。此外各支路连接负荷的DC/AC、DC/DC整流/逆变模块自身具备IGBT过温，模块故障等本体保护功能。

4 典型案例分析

珠海唐家湾能源互联网+示范项目在珠海清华科技园区内建设±375 V 直流微电网, 直流微网采用对称单极系统, 通过直流变压器将±10 kV 降压为±375 V 及±110 V 两个电压等级, 直流变压器采用双分支结构。由于±375 V 为高阻接地系统, 站内配置绝缘监测装置, 用于监测低压侧的绝缘水平。

具体拓扑结构如图 5 所示:

站内控制保护设备配置如下:

- 1) 配置双套站级直流控制保护系统, 实现±10 kV 侧直流系统控制保护功能。
- 2) 配置单套±375 V 三端口母线控制保护系统, 集成±375 V 母线差动及连接支路过流保护功能。
- 3) 直流变压器保护集成在站级直流控制保护主机中实现, 采用主要包括变压器差动保护, 各侧后备过流保护。

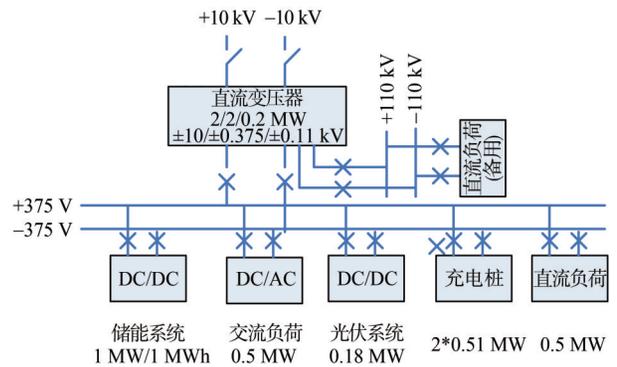


图 5 项目一次接线图

Fig. 5 Primary wiring diagram of project

站内直流微网的控制策略采用本文第 2 节所述的控制策略, 系统在运行中成功在非计划情况下由并网运行转为离网运行。现场由故障录波装置记录的非计划性并网转离网波形曲线如图 6 所示。

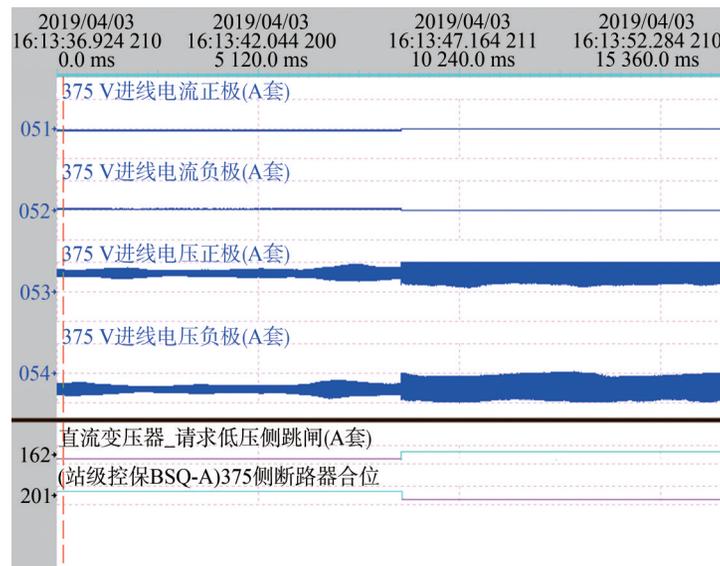


图 6 项目非计划并网转离网波形

Fig. 6 Unplanned grid-connected mode transfer to grid-disconnected mode control procedure diagram of the project

电流与电压波形记录工程实践表明, 本文所述并网控制策略及保护方案运行情况良好。

5 结论

本文结合工程实际经验, 从母线拓扑结构、控制策略、保护配置三个方面, 针对现有直流微电网建设过程中的关键技术问题进行了深入的分析。首先, 对三种主流直流微电网母线拓扑结构进行了技术经济比较, 三种拓扑结构各有优缺点, 应该根据工

程应用实际需求进行选取, 同等条件下选取技术成熟度更高的拓扑结构; 其次, 给出了直流微电网并网运行、离网运行及并离网切换的详细控制策略, 为后续工程提出具体的控制方案; 再次, 给出直流测量装置的选型及保护配置方案, 巨磁阻效应传感器可以兼测量精度和抗饱和性在直流微电网中具有有良好的应用前景, 并给出了直流保护配置方案, 最后示范工程的验证表明本方案的有效性及其可推广性。

参考文献:

- [1] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等. 微电网研究综述 [J]. 电力系统自动化,2007,31(19):100-107.
LU Z X, WANG C X, MIN Y, et al. Overview on micro-grid research [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19):100-107.
- [2] 李霞林,郭力,王成山,等. 直流微电网关键技术研究综述 [J]. 中国电机工程学报,2016,36(1):2-17.
LI X L, GUO L, WANG C S, et al. Key technologies of DC microgrids: an overview [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1):2-17.
- [3] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述 [J]. 中国电机工程学报, 2014,34(1):57-70.
YANG X F, SU J, LV Z P, et al. Overview on micro-grid technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1):57-70.
- [4] 王成山,李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战 [J]. 电力系统自动化,2010,34(2):10-14+23.
WANG C S, LI P. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2):10-14+23.
- [5] 吴卫民,何远彬,耿攀,等. 直流微电网研究中的关键技术 [J]. 电工技术学报,2012,27(1),98-106+113.
WU W M, HE Y B, GENG P, et al. Key technologies for DC microgrids [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1):98-106+113.
- [6] SHE X, HUANGA Q, LUKIC S, et al. On integration of solid-state transformer with zonal DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(2):975-985.
- [7] HUDDY S R, SKUFCA J D. Amplitude death solutions for stabilization of DC microgrids with instantaneous constant-power loads [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1):247-253.
- [8] 王丹,毛承雄,陆继明,等. 直流配电系统技术分析及设计构想 [J]. 电力系统自动化,2013,37(8):82-88.
WANG D, MAO C X, LU J M, et al. Technical analysis and design concept of DC distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8):82-88.
- [9] 胡竞竞,徐习东,裴鹏,等. 直流配电系统保护技术研究综述 [J]. 电网技术,2014,38(4):844-851.
HU J J, XU X D, QIU P, et al. A review of the protection methods in DC distribution system [J]. Power System Technology, 2014(4):844-851.
- [10] 江道灼,郑欢. 直流配电网研究现状与展望 [J]. 电力系统自动化,2012,36(8):98-104.
JIANG D Z, ZHENG H. Research status and developing prospect of DC distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8):98-104.
- [11] 丁明,田龙刚,潘浩,等. 交直流混合微电网运行控制策略研究 [J]. 电力系统保护与控制,2015,43(9):1-8.
DING M, TIAN L G, PAN H, et al. Research on control strategy of hybrid AC/DC microgrid [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9):1-8.
- [12] 殷晓刚,戴冬云,韩云,等. 交直流混合微电网关键技术研究 [J]. 高压电器,2012,48(9):43-46.
YIN X G, DAI D Y, HAN Y, et al. Discussion on key technologies of AC-DC hybrid microgrid [J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(9):43-46.
- [13] 周钰,郝为瀚,李涛,等. 微网监控系统及其控制策略设计 [J]. 南方能源建设,2018,5(增刊1):177-182.
ZHOU Y, HAO W H, LI T, et al. Design of monitoring system and control strategy for micro-grid [J]. Southern Energy Construction, 2018, 5(Supp. 1):177-182.
- [14] 王成山,高菲,李鹏,等. 低压微网控制策略研究 [J]. 中国电机工程学报,2012,32(25):2-9.
WANG C S, GAO F, LI P, et al. Control strategy research on low voltage microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25):2-9.
- [15] LU X N, SUN K, GUERRERO J M, et al. State of charge balance using adaptive droop control for distributed energy storage systems in DC microgrid applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 61(6):2804-2815.
- [16] 赵上林,吴在军,胡敏强,等. 关于分布式发电保护与微网保护的思考 [J]. 电力系统自动化,2010,34(1):73-77.
ZHAO S L, WU Z J, HU M Q, et al. Thought about protection of distributed generation and microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1):73-77.
- [17] JIN Y, FLETCHER J E, O'REILLY J. Short-circuit and ground fault analyses and location in VSC-based DC network cables [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(10):3827-3837.

作者简介:



周钰

周钰 (通信作者)

1986-, 女, 江西九江人, 高级工程师, 硕士, 主要从事电池储能技术、微网技术、大型输变电工程设计工作 (e-mail) zhouyu2@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)