

DOI: 10.7667/PSPC160455

交直流混合配电方式及其故障保护研究综述

许火炬, 缪希仁

(福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要: 汇集各类分布式能源, 构建交直流混合超级电网, 是世界各国应对当前能源危机的一大举措。然而缺乏稳定、可靠的故障保护技术是限制其发展的主要因素之一。首先概述了交直流混合电网的发展现状, 着重介绍了欧洲、中国、美国、日本等多个地区及国家的超级电网构想及计划。进而对交直流混合配电方式的系统架构, 系统特点及其关键技术等方面的内容进行了详细的分析, 并从故障区域、故障特征、故障保护等方面总结了其在保护方面的特殊性及要求。最后对今后故障保护技术的研究方向进行了展望。

关键词: 超级电网; 分布式能源; 直流配电; 保护技术; 短路故障

A review of AC/DC hybrid distribution and fault protection

XU Huoju, MIAO Xiren

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Collecting all kinds of distributed generation and constructing AC/DC hybrid power grid have become one of the major measures to overcome the energy crisis. However the lack of stable and reliable fault protection technology has become one of the main factors, which limits its development. Firstly, this paper summarizes the development situation of AC/DC hybrid power grid at home and abroad, focuses on the conception and plan of super grid from Europe, China, the United States, Japan, and other regions and countries. And then the system structure, characteristics and key technology of AC/DC hybrid power distribution are analyzed in detail, and the particularity and requirement of protection technology are summarized from the content of fault area, fault feature and fault protection. Finally, the technical research direction on protection in the future is prospected.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377023).

Key words: super grid; distributed energy; DC distribution; protection technology; short-circuit fault

0 引言

目前国内外的配电网仍以传统的交流配电方式为主, 然而随着当今社会对能源高效利用以及节能减排要求的不断提高、各种分布式能源的涌现、工业生产对电能质量要求的日益增高以及电力电子技术的快速发展, 直流配电方式在消纳分布式能源、提高能源利用效率和电能质量以及与目前大量的直流负载、变频电器的兼容性方面, 展现出了传统交流配电方式所不具备的优势^[1]。

直流配电方式目前主要应用在某些特定的工业领域, 如通信机房、数据中心、舰船系统、铁路牵引系统以及配电站、变电站、调度中心的控制机房,

直流融冰^[2]等。随着各类直流负荷及电子负荷如智能手机、笔记本、电动车、变频电器、交换机、路由器等的出现, 大量的直流开关电源以及变频器被应用到实际中, 现有的城市配电已不再是纯粹的交流配电方式。然而由于传统的交流配电方式在数十年的应用历史中已积累了大量的技术、设备、资产, 直流配电方式在许多方面虽然具有很大的优势, 但想要完全取代交流配电方式并不现实。因此从充分利用原有交流配电系统所存资产以及直流配电系统的优势角度出发, 交直流混合配电方式很可能成为今后配电系统的主流形式。

目前国内外对直流配电方式的研究尚处于起步阶段, 直流配电保护方面的技术仍较为空白, 再加上缺乏经济、可靠的直流断路器, 直流配电保护技术成为制约直流配电系统发展的瓶颈^[3]。现有的

直流保护设备及保护技术仅适用于特定应用场合，如铁路牵引系统、光伏发电系统等。目前尚无通用化的直流保护设备及保护技术标准。短路故障作为电力系统最常见、危害最大的故障类型之一，一直以来都是控制与保护研究的重中之重，本文在故障保护方面的研究主要以短路故障为主。

本文综述了目前国内外交直流混合电网的研究现状，开展了交直流混合配电方式的研究工作，从系统架构、系统特点、关键技术、故障保护等方面进行了较为全面的总结与分析。

1 交直流混合电网的研究现状与发展

能源危机是 21 世纪人类面临的重大难题之一，再加上社会的快速发展，使得环境污染问题日渐严重。在能源危机以及环境污染的双重压力下，人们开始将目光转向太阳能、风能、生物质能等可再生清洁能源，此时直流电网凭借着高分布式能源消纳能力的优势受到了广泛关注^[4-5]。

在近几年智能电网研究热潮仍未消退的背景下，迫于全球能源危机的压力，建设跨越多个国家，连接多种分布式能源的“超级电网”的构想又成为了世界范围内新的研究热点^[6]。

欧洲在 2010 年公布“超级电网 2050 计划”一期工程——北海超级电网计划，如图 1 所示。

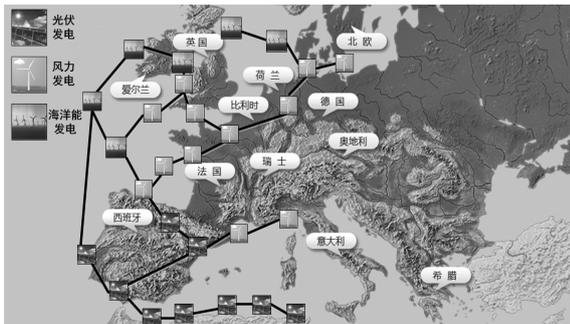


图 1 欧洲“超级电网 2050”计划
Fig. 1 Super smart grid 2050

计划利用直流输电技术将苏格兰的海上风力涡轮机、德国的太阳能阵列、比利时和丹麦的波浪能发电站与挪威的水力发电站连成一片，从而形成贯穿北海到欧洲大陆北部的联合电网。将可再生能源与传统能源广域互联，将偏远地区的大规模可持续电能传输到负荷中心，实现多能源形式、多时间尺度、大空间跨度、多用户类型之间的互补。超级电网的实质是一个多种能源广域互联的电网，在原有交流电网的基础上通过直流输电技术叠加一层直流网络，形成的交直流混合电力系统^[7]。

文献[8-9]参考了欧洲超级电网的建设，对直流电网在中国的应用前景进行了分析，并提出了一种广域连接国内可再生能源的超级电网构想。如图 2 所示，以中国现有的高压交流输电网为骨干，将华中、华东和华北电网作为特高压交流电网系统的交汇中心，利用直流输电技术汇集全国各地的清洁能源形成多区域的直流电网，与全国各地的大型交流电网联合形成坚强的交直流混合电力系统网架结构^[10-12]。

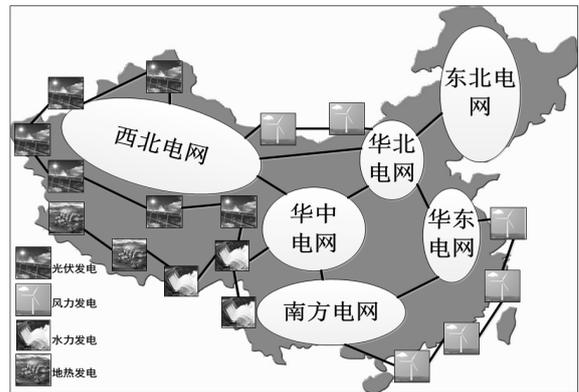


图 2 中国超级电网结构设想

Fig. 2 Structure image of China's super power grid

美国总结了自身电力系统的缺陷以及近年内发生的数起重大停电事故，在 2003 年正式提出了“Grid 2030”计划。根据计划，美国未来电网将会是一个连接东西两岸并且北到加拿大、南到墨西哥，采用超导技术、电力储能技术以及直流输电技术进行输电的网架结构。

如图 3 所示，Grid 2030 包括 3 个部分内容：一是国家电力主干网，通过高容量的输电通道将东西海岸及加拿大墨西哥连在一起，在全国范围内平衡供需；二是区域互联，区域电网接入国家电力主干网，各区域电网通过交流或直流线路加强互联，相邻的非同步区域间通过大容量直流背靠背连接；三是地方配电系统，地方配电系统与区域电网相连，且通过区域电网与国家主干网相连，配电设备的电功率流向或来自用户，连接到区域电网，功率的流向由供需条件决定。

日本自福岛核危机之后，为解决其未来的供电问题，参考了欧洲的“沙漠太阳能”项目，提议建设亚洲超级电网，计划开发蒙古国戈壁的风电与太阳能、俄罗斯远东地区的水电与火电、中国的风电与太阳能、韩国和日本的光伏与风电，实现连接俄罗斯、中国、蒙古国、韩国和日本的泛亚洲跨国电网。

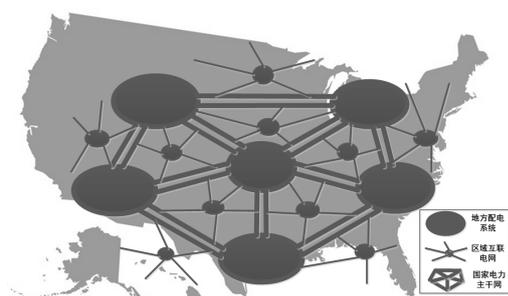


图3 美国 Grid2030 计划

Fig. 3 Grid 2030 of America

东南亚所提出的超级电网项目通过建设海底高压直流输电电缆, 从澳大利亚北部海岸沿着印度尼西亚群岛, 连接到菲律宾、马来西亚、中南半岛和中国, 目的是将澳大利亚北部丰富的太阳能传输到东南亚国家。

2014年在《全球智能电网建设分布式能源及技术储备展览会暨高峰论坛》中, 国网智能电网研究院总工曹均正博士提出: 未来的电网将会是交直流混合存在的电网。随着国内外对直流输电研究的日益加深以及国家政策的推动, 再加上世界上第一个商业化实践的超级电网—欧洲超级电网的不断开展以及经验积累, 未来有望在交流输电以及直流输电的基础上建成跨国际的交直流混合电网。

如图4所示, 通过高压交直流输电技术整合各种形式的分布式电源, 再利用交直流变压器降压, 建立广域的中压交直流混合配电网, 最后与地方的低压交直流混合配电网建立连接, 形成多层次, 多能源形式、大空间跨度、多用户类型的交直流混合配电形式, 是未来电网发展的方向。

2 交直流混合配电系统

2.1 系统架构

目前直流配电方式只有在少数领域有较为成熟的应用。针对直流配电系统架构的通用性问题, 许多专家学者展开了大量研究^[13-16]。

图5所示为交直流混合配电系统的典型系统架构。通过双向 AC/DC 换流器连接交直流母线, 双向 DC/DC 变换器将储能设备蓄电池与直流母线相连。大量分布式电源如光伏发电、燃料电池、风力发电通过对应功率变换器连接到直流母线, 作为直流侧的电源。系统可通过 DC/DC、DC/AC 变换器提供多电压等级, 多形式的电能, 与目前各种类型的负载友好兼容。系统侧重于分布式能源的充分利用, 以及交直流两侧之间的互联, 进一步提高了配电的灵活性及可靠性。

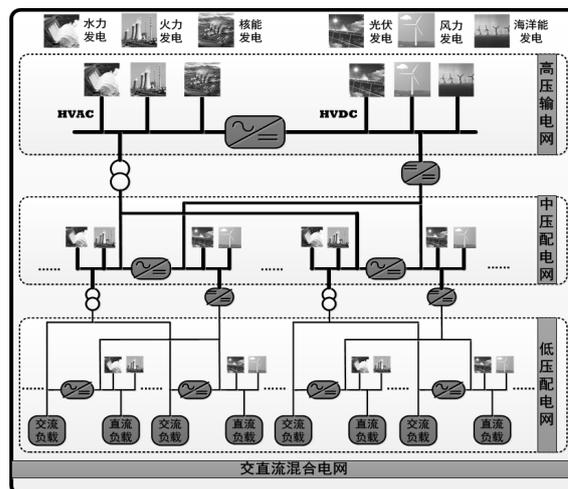


图4 交直流混合电网结构

Fig. 4 Structure of AC/DC hybrid power grid

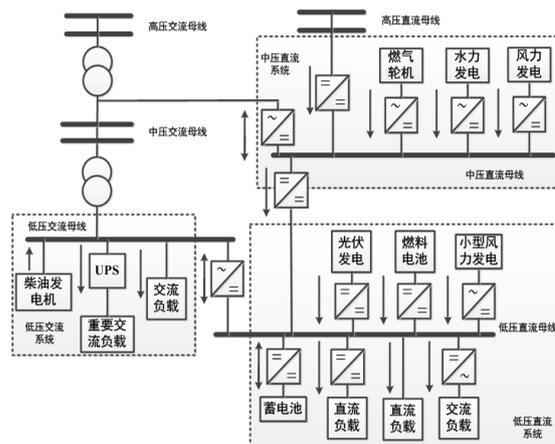


图5 交直流混合配电系统架构

Fig. 5 Structure of AC/DC hybrid distribution power system

2.2 系统特点及关键技术

2.2.1 分布式能源的并网

系统在直流侧并有大量分布式能源, 提高了电网中清洁能源的比重以及能源分配的灵活性。其关键技术在于分布式能源与直流配电系统的并网问题。由于直流配电系统的研究仍处于起步阶段, 关于分布式能源并入直流配电网的技术还鲜有研究, 而交流电网并网技术方面的研究已经相对较为成熟^[17-19], 因此直流方面的研究可以参考交流并网技术, 并结合直流电网特点, 探索出符合自身需求的并网技术。可以预知的是, 分布式能源与直流电网的并网相比于交流电网, 可以省略中间换流环节, 减少能源损耗以及设备成本, 提高分布式能源的利用效率, 减少换流环节的同时也可以简化原本复杂的控制过程。

2.2.2 交直流两侧的互联

通过双向换流器建立交直流两侧之间的联系，根据交直流两侧电能的供需情况切换整流以及逆变两种工作模式，提高电能分配的灵活性以及供电的可靠性^[20-21]，同时将直流侧所带储能设备的不间断供电功能通过双向换流器扩展到交流侧，提高整个系统供电的不间断性。表 1 列出了双向换流器在交直流两侧不同电能供需情况下的工作模式。

表 1 不同电能供需情况下双向换流器工作模式

Table 1 Working pattern of the bidirectional converter

under different power supply			
交流侧电能 供需情况	直流侧电能 供需情况	直流侧储能设 备电能储存状态	双向 AC/DC 变 换器工作模式
供大于求	供不应求	电量不足/充足	整流
供大于求	供大于求	电量不足/充足	不工作
供不应求	供大于求	电量不足/充足	逆变
供不应求	供不应求	电量不足	不工作
供不应求	供不应求	电量充足	逆变

双向换流器是连接交直流两侧的重要纽带，因此对双向换流器的性能要求较高。文献[22]结合电压平衡控制器和四桥臂三相四线制电压源变换器提出了一种新型交直流混合配电功率变换器。所提出的变换器即能够实现对交流侧电能质量的综合治理，同时又能维持直流网电压的平衡，进行可靠的直流供电和 DG 直流并网。文献[23]提出将蓄电池作为平衡节点，连同双向 AC/DC 变换器一起维持系统运行的控制策略。在蓄电池的平抑作用下，一方面可以提高直流侧光伏利用率，另一方面能够平抑孤岛与并网运行模式切换的功率缺额，有效抑制系统功率波动，维持交直流混合电网稳定运行。文献[24]提出了一种双向三相 AC/DC 变流器的无锁相环控制策略。该方法可以有效避免电网电压畸变对控制精度的影响，同时基于无功功率闭环调节控制方法，可以保证变流器实际输出功率的准确性。

2.2.3 带有储能设备，具有不间断供电功能

与交流配电系统相比，储能设备如蓄电池接入直流配电系统母线中，可省略 AC/DC 变换环节，减少能量损耗，降低控制难度。在断电时，不仅对于重要的负载，对于普通的负载也可在一定程度上保证供电的不间断性。蓄电池通过智能管理模块与直流母线相连，该模块能够实现蓄电池的智能充电以及在线监测功能，该模块目前已形成较为成熟的技术及产品。

2.2.4 良好的负荷兼容性

此外交直流混合配电系统也展现出了与现有各类负载良好的兼容性。

1) 阻性负载：如加热负载、白炽灯负载以及其他阻性负载，在交直流两种电能下均可工作。

2) 电机类负载：交流电机直接通过交流侧供电，而交直流两用电机则可工作在交直流两种电能下。带变频功能的电器可在直流侧通过 DC/AC 变换器实现变频控制，相比在交流侧可省略 AC/DC 变换环节。

3) 直流负荷、电子负载：各类直流负荷、电子负载如智能手机、笔记本、电动车、路由器等的最终用电形式都是直流电，因此可以毫无疑问地在直流侧中稳定工作。

由此可见，交直流混合配电方式相比于交流配电方式表现出了更好的负荷兼容性。目前在低压配电领域 DC/DC 和 DC/AC 变换技术已经较为成熟。

3 交直流混合配电系统的故障保护

3.1 故障区域

交直流混合配电系统是一个涉及交直流两侧的混合配电系统，并且带有大量的电力电子变换装置，因此其故障类型相比于交流配电系统要复杂得多。系统的故障区域可分为交流侧故障、直流侧故障以及变换器故障^[25-26]，如图 6 所示。

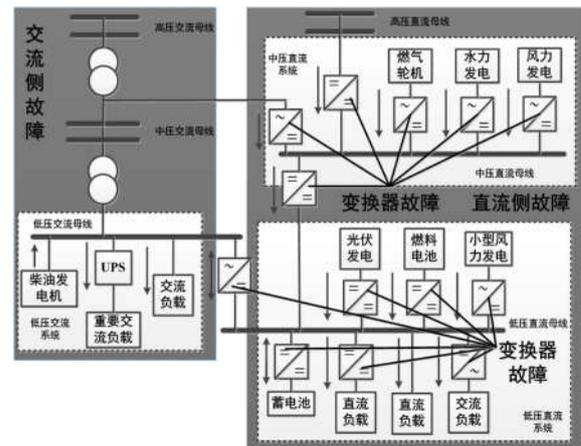


图 6 交直流混合配电系统故障区域

Fig. 6 Fault zone of AC/DC hybrid power system

1) 交流侧最常见、危害最大的故障主要有短路故障，包括单相接地短路、两相接地短路、两相相间短路、三相短路等。另外电压暂降、三相电压不平衡等也会对负载的正常运行产生影响。

2) 直流侧故障可分为直流母线故障以及负载区故障。直流母线故障主要包括接地短路故障、极间短路故障，此外还有负荷投切以及操作过程中产生的过电压、电压暂降等暂态过程。负载区的故障主要以短路及过载为主。

3) 变换器是交直流混合配电系统中进行电能变换的核心设备, 变换器的可靠性直接决定了系统工作的可靠性。变换器的故障主要有驱动模块故障、主电路故障、元器件故障等。变换器一般由装置内部自带的保护功能来实现保护, 此外还需要考虑变换器自身的保护功能以及配电系统所采取的保护措施之间的协调配合。

3.2 故障特征与保护要求

1) 直流侧短路电流上升率高, 峰值大: 直流线路阻抗小, 发生短路故障时, 故障电流会在短时间内上升到很大数值, 再加上电力电子变换装置输出滤波电容及储能设备的放电, 进一步加大了故障电流的上升率及峰值^[27]。因此直流侧在短路保护方面, 要求“两快”, 即检测快加分断快。

2) 涉及交直流两侧, 影响范围广, 故障定位困难。由于交直流两侧的互联, 当一侧发生故障时, 将会对另一侧产生影响, 使得故障的影响范围扩大^[28-29]。同时直流配电系统线路短, 且带有大量电力电子设备, 还有分布式电源的并网, 系统内部结构复杂, 设备分布密集, 使得故障定位较为困难。因此在实际保护过程中不仅需要交直流两侧各自的保护措施, 还应该根据两侧间的相互影响, 考虑两侧保护的协调配合, 在故障蔓延前及时检测并排除, 避免故障影响范围的扩大。

3) 灭弧困难。直流故障电流没有自然过零点, 灭弧难度大, 需要采取额外的灭弧措施, 另外控制过程也较为复杂^[30]。针对此难题, 要求具有能够可靠灭弧的直流短路保护装置。

3.3 故障保护技术

3.3.1 直流短路检测技术

直流短路电流上升快, 灭弧难, 危害严重, 因此直流配电保护技术对短路故障检测的快速性提出了很高的要求。目前在国内外关于直流短路故障检测技术方面的研究主要集中在地铁、舰船等少数领域, 直流配电系统目前还处于初步的仿真研究阶段, 尚没有实际应用工程案例, 许多关键问题还未得到解决, 因此少有专家学者开展对应的直流短路检测技术。相比之下, 关于直流输电短路故障检测方面的研究则已有较多, 由于两者都是基于电力电子换流技术, 具有一定的参考价值。

其中地铁在短路检测方面主要以大电流脱扣及 DDL 方法(电流上升率及电流增量)为主, 定时限过流保护及低电压保护作为后备保护^[31-32]。但为了区分短路电流及启动电流以及近端短路和远端短路, 提高检测的可靠性, 需要引入一定的延时整定时间, 使得检测的快速性较差。文献[33-34]针对

DDL 方法存在的问题进行了优化, 改善了其灵敏性, 但依然存在延时整定时间所造成检测快速性不佳的问题。

在高压直流输电的短路检测方面, 专家学者提出了多种方法, 主要涉及行波, 傅里叶分解, 小波分解, 阻抗测量, 差动电流、电压, 电流上升率等多种原理^[35]。J.Descloux 等学者采用类似于交流配电系统的差动电流保护算法, 并建立通信系统, 实现了在 2 ms 内有选择性地检测出系统发生的短路故障。K. Young-Jin、S. GuoBing、R.K. Mallick 等学者也以行波算法为原理提出了各自的保护策略, 但最后并未给出具体的检测时间。傅里叶分解由于所需要的时间较长, 检测速度较慢。而小波算法具有良好的奇异性信号检测功能, 在快速检测方面具有较好的应用前景。由于直流输电及直流配电均采用电力电子换流技术, 因此直流配电短路故障检测方面的研究可以借鉴直流输电相关技术原理, 并以此为切入点, 弥补直流配电短路检测技术现存的空白。

3.3.2 直流断路器技术

直流断路器是直流配电系统控制与保护的核心元件。根据拓扑结构以及分断机理可将直流断路器分为: 机械式直流断路器、全固态直流断路器、混合式直流断路器^[36]。

机械式直流断路器通过机械操动机构动作, 采用金属栅片灭弧, 具有通态损耗小、结构简单、控制方便的优点。然而受到机械结构限制, 无法实时、灵活、快速地开断。

全固态直流断路器通过电力电子器件开断故障电流, 可以实现无弧快速开断。但是其价格昂贵、通态损耗大, 开断时会产生较大的过电压, 因而在实际中应用难度较大^[37-38]。

混合式断路器采用机械开关导通正常运行电流、固态开关开断故障电流, 兼具机械开关良好的静态特性以及固态开关无弧快速分断的动态特性^[38], 具有良好的直流开断性能。

4 故障保护技术研究展望

本文综合分析了交直流混合配电方式故障保护存在的难题, 对今后故障保护技术的研究进行了以下展望。

1) 直流短路故障快速检测技术的研究: 在交流配电系统中已有学者对交流短路故障的快速检测做了大量的研究, 并通过仿真以及实验室系统实现了 200 μs 以内的短路故障早期检测^[39-40]。直流短路电流上升率高, 灭弧难, 对于快速性的要求较高, 研

究直流短路故障的快速检测技术具有非常重大的意义。

2) 直流断路器的研发: 开发新型、能快速开断以及可靠灭弧的直流断路器是目前直流配电保护技术研究的重要内容之一。混合式直流断路器通态损耗小、分断速度快、具有良好的应用前景, 是未来直流断路器的主要发展方向。

3) 建立基于快速通信系统的智能控制与保护机制: 交直流混合配电系统涉及交直流两侧、分布式电源、储能设备以及诸多电力电子变换装置, 因此协调保护的思想在其中尤为重要。通过快速通信系统将系统的状态参量传输到智能控制与保护平台, 实时监测系统的运行情况, 并在系统发生故障时快速做出反应, 形成覆盖交直流两侧的全范围选择性协调保护机制。同时有效整合电力电子变换装置的保护功能, 减少分散保护设备数量, 降低保护系统的复杂性及成本。

5 结论

交直流混合配电方式的诸多优点特别是分布式能源的高消纳能力, 使其成为解决能源危机的重要出路之一。汇集各地的分布式能源, 结合原有交流电网, 建设交直流混合电网是未来电力系统的发展方向。然而直流保护技术的空白限制了直流配电系统的发展。交直流混合配电方式的特殊性使得其故障类型及故障特征与交流配电方式存在较大差别, 并为其故障保护带来了新的难题。总结了现有的故障保护技术, 并对其今后的研究方向进行了展望。

参考文献

- [1] 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 Daozhuo, ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 98-104.
- [2] 姚致清, 刘涛, 张爱玲, 等. 直流融冰技术的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 57-62.
YAO Zhiqing, LIU Tao, ZHANG Ailing, et al. Research & application on DC de-icing technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 57-62.
- [3] 胡竞竞, 徐习东, 裘鹏, 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 Jingjing, XU Xidong, QIU Peng, et al. A review of the protection methods in DC distribution system[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 844-851.
- [4] 任洪波, 吴琼, 邱留良, 等. 分布式能源系统可靠性评价[J]. 热力发电, 2016, 45(4): 65-69.
REN Hongbo, WU Qiong, QIU Liuliang, et al. Reliability assessment of distribution energy system[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(4): 65-69.
- [5] 刘永坤, 李成. 我国能源效率及其影响因素分析[J]. 热力发电, 2015, 44(3): 1-7.
LIU Yongkun, LI Cheng. China's energy efficiency and its influencing factors[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(3): 1-7.
- [6] 余晓丹, 徐宪东, 陈硕翼, 等. 综合能源系统与能源互联网简述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 1-13.
YU Xiaodan, XU Xiandong, CHEN Shuoyi, et al. A brief review to integrated energy system and energy internet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 1-13.
- [7] 姚美齐, 李乃湖. 欧洲超级电网的发展及其解决方案[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 549-555.
YAO Meiqi, LI Naihu. An introduction to European super grid and its solutions[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 549-555.
- [8] 范松丽, 苑仁峰, 艾芊, 等. 欧洲超级电网计划及其对中国电网建设启示[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(10): 6-15.
FAN Songli, YUAN Renfeng, AI Qian, et al. European supergrid project and its enlightenment to China's power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 6-15.
- [9] 温家良, 吴锐, 彭畅, 等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 7-12.
WEN Jialiang, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 7-12.
- [10] 姚良忠, 吴婧, 王志冰, 等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6007-6020.
YAO Liangzhong, WU Jing, WANG Zhibing, et al. Pattern analysis of future HVDC grid development[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6007-6020.
- [11] 肖立业, 林良真. 未来电网初探[J]. 电工电能新技术, 2011, 30(1): 56-63.
XIAO Liye, LIN Liangzhen. Exploration of future power grid[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2011, 30(1): 56-63.
- [12] 杨冬, 刘玉田. 中国未来输电网架结构初探[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(8): 1-5.
YANG Dong, LIU Yutian. Preliminary discussion on

- china transmission backbone in the future[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(8): 1-5.
- [13] HAMMERSTROM D J. AC versus DC distribution systems did we get it right[C] // IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, America: IEEE, 2007: 1-5.
- [14] SALONEN P, KAIPIA T, NUUTINEN P, et al. An LVDC distribution system concept[C] // Proceedings of the Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, Espoo, Finland: Helsinki University Department of Electrical Engineering, 2008: 1-7.
- [15] SALAMONSSON D, SANNINO A. Low-voltage DC distribution system for commercial power systems with sensitive electronic loads[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1620-1627.
- [16] 李露露, 雍静, 梁仕斌, 等. 民用低压直流供电系统保护综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 133-143.
- LI Lulu, YONG Jing, LIANG Shibin, et al. A rebiew of civil low voltage dc distribution system protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 133-143.
- [17] HAO Z, YAO Z, LI S, et al. The contribution of double-fed wind farms to transient voltage and damping of power grids[J]. Tehnicki Vjesnik, 2015, 22(1): 43-49.
- [18] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
- YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [19] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-126.
- YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-126.
- [20] 兰征, 涂春鸣, 肖凡, 等. 电力电子变压器对交直流混合微网功率控制的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 50-57.
- LAN Zheng, TU Chunming, XIAO Fan, et al. The power control of power electronic transformer in hybrid AC-DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 50-57.
- [21] 王义军, 郑晴予, 李殿文. 直流微网中关键技术的研
究[J]. 高压电器, 2016, 52(6): 18-22.
- WANG Yijun, ZHENG Qingyu, LI Dianwen. Study of key technologies in DC micro-grid[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(6): 18-22.
- [22] 张树东, 朱大为, 刘闯, 等. 交直流混合配电型通用功率变换器(UPC)研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 48-55.
- ZHANG Shudong, ZHU Dawei, LIU Chuang, et al. Universal power converter (UPC) for hybrid AC and DC distribution[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 48-55.
- [23] 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 Ming, TIAN Longgang, PAN Hao, et al. Research on control strategy of hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 1-8.
- [24] 郑昕昕, 肖岚, 田洋天, 等. 双向三相 AC/DC 变流器的无锁相环控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 79-87.
- ZHENG Xinxin, XIAO Lan, TIAN Yangtian, et al. Control strategy of bidirectional three-phase AC/DC converter without PLL[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 79-87.
- [25] 孙刚, 时伯年, 赵宇明, 等. 基于 MMC 的柔性直流配电网故障定位及保护配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 127-133.
- SUN Gang, SHI Bonian, ZHAO Yuming, et al. Research on the fault location method and protection configuration strategy of MMC based DC distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 127-133.
- [26] 宋国兵, 蔡新雷, 高淑萍, 等. 高压直流输电线路故障定位研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 133-137.
- SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. Survey of fault location research for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 133-137.
- [27] YANG Jin, 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.
- [28] TANG L X, OOI B T. Locating and isolating DC faults in multi-terminal DC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1877-1884.
- [29] BARAN M E, MAHAJAN N R. Overcurrent protection on voltage-source-converter-based multiterminal DC

- distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 406-412.
- [30] CUZNER R M, VENKATARAMANAN G. The status of DC micro-grid protection[C] // 2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Edmonton, Alberta, Canada: IEEE, 2008: 1-8.
- [31] 杨莉莉. DC 1500 V 三轨供电系统直流馈线保护研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
YANG Lili. The research on feeder protection of DC 1500 V third rail power supply system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [32] 王广峰, 孙玉坤, 陈坤华. 地铁直流牵引供电系统中的 DDL 保护[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(1): 59-62.
WANG Guangfeng, SUN Yukun, CHEN Kunhua. DDL protection in subway DC traction power supply system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 19(1): 59-62.
- [33] 李墨雪. 直流牵引供电系统建模及基于电流变化特征量的保护算法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
LI Moxue. Modeling for DC traction power supply system and development of protection algorithm based on discrimination of current characteristic quantity[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [34] 刘璟. 地铁直流牵引供电系统检测与保护的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2006.
LIU Jing. Study of the detection and protection of DC traction supply system[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2006.
- [35] BUIGUES G, VALVERDE V, ZAMORA I, et al. DC fault detection in VSC-based HVDC grids used for the integration of renewable energies[C] // International Conference on Clean Electrical Power: IEEE, 2015.
- [36] 史宗谦, 贾申利. 高压直流断路器研究综述[J]. 高压电器, 2015, 51(11): 1-9.
SHI Zongqian, JIA Shenli. Research on high-voltage direct current circuit breaker: a review[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11): 1-9.
- [37] 胡杰, 王莉, 穆建国. 直流固态断路器现状及应用前景[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 145-150.
HU Jie, WANG Li, MU Jianguo. Present status of DC solid state circuit breaker and its potential application[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 145-150.
- [38] 江道灼, 张弛, 郑欢, 等. 一种限流式混合直流断路器方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(4): 65-71.
JIANG Daozhuo, ZHANG Chi, ZHENG Huan, et al. A scheme for current-limiting hybrid DC circuit breaker[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(4): 65-71.
- [39] 缪希仁, 吴晓梅. 低压系统多层次短路电流早期检测与预测[J]. 电工技术学报, 2014, 29(11): 177-183.
MIAO Xiren, WU Xiaomei. Early detection and prediction for short-circuit current in a multi-level low voltage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(11): 177-183.
- [40] 陈丽安, 张培铭. 基于形态小波的低压系统短路故障早期检测[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 24-28.
CHEN Lian, ZHANG Peiming. Early detection for short-circuit fault in low voltage system based on morphology-wavelet[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 24-28.

收稿日期: 2016-04-01; 修回日期: 2016-05-26

作者简介:

许火炬(1990-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为智能电器在线监测; E-mail: 807580731@qq.com

缪希仁(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能电器在线监测。E-mail: miaoxr@163.com

(编辑 葛艳娜)