

直流配电网系统关键技术探讨

周逢权, 黄伟

(许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 针对提高运行效率、改善供电可靠性和电能质量、实现分布式电源有效安全接入等配电系统面临的问题和挑战, 提出了以直流为主导的配电方式, 用于解决上述问题的可行性研究和探讨。结合直流配电技术的研究现状, 总结了直流配电系统的技术特点和潜在优势, 系统地探讨并分析了直流配电系统发展的若干关键技术及其可行性。

关键词: 直流配电系统; 直流网架结构; 直流断路器; 控制保护

Study on the key technology of DC distribution power network

ZHOU Feng-quan, HUANG Wei

(XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: How to increase the efficiency, improve the reliability and power quality, resolve the injection issue of the distributed generation (DG) will be the main challenges which the distribution system faces, on the other hand, which also provides the new developing opportunities for distribution technology. The direct current (DC) distribution system is proposed and studied to try to resolve the issues. Study status of DC distribution technology and the basic principle and technology characteristics of DC distribution system are summarized, and some of its key technologies and feasibility are analyzed systematically.

Key words: direct current (DC) distribution system; DC power network structure; DC breaker; control and protection

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)22-0062-06

0 引言

伴随着石化能源的日益枯竭, 风电、光伏等可再生能源、储能系统以及电动汽车等新能源技术逐渐的得到人们的重视。越来越多的分布式发电、清洁能源等接入配电系统, 必然会在提高系统效率、改善供电的可靠性和电能质量、实现分布式电源的有效安全的接入等方面面临着挑战, 其主要具体表现在以下几个方面。

(1) 在配电网电源方面, 可再生能源与储能系统的应用越来越受到广泛的关注, 其显著特征是能更好地改善能源结构、提升能源利用效率, 同时减少环境污染。但其接入电网所涉及的直流电源、变频交流电源以及传统的工频交流电网之间的高效、可靠、安全地接入互联问题, 对现有的配电网结构来说, 是一个新的挑战。

(2) 在用电负荷方面, 家用电器用电模式的改变、越来越多的电动汽车快速推广和普及, 使得越来越多的直流负载和含有直流环节的负载直接或者间接地接入配电网, 使用传统的交流配电网给这些

直流负载供电时, 需要 AC/DC 变换, 大大降低了系统效率。

(3) 在配电网网架结构方面, 随着城镇化建设推进, 更大的城市规模和人口对城市配电网的容量和供电范围提出了更高的要求, 需要在已有的配电网基础上进行扩建与拓展, 有限的供电走廊以及越来越长的供电线路走廊势必会对配电网的安全性和可靠性带来新的挑战。

(4) 在配电网运行控制方面, 大量的电力电子控制设备出现在配电系统中, 如 DSTATCOM、定制电力等, 一方面这些设备优化和改进了用户配网供电性能, 另一方面, 带来了新的电能质量问题, 这与用户对电能质量要求的提高之间的矛盾凸显。

伴随着智能电网的发展, 以及电力电子技术发展日益成熟的今天, 尝试探讨以直流配电方式解决现有配电网面临的一些问题, 将成为解决目前问题的新思路。本文通过描述分析国内外关于直流配电网的研究现状, 总结了关于直流配电网的技术特点, 并从直流配电网协调控制的角度阐述了相关关键技术及其可行性。

1 直流配电网研究现状

相比交流配电网, 直流配电网以其强大的节能优势具有巨大的发展前景。目前, 一些国家已经纷纷开展了直流配电网的研究, 提出了各自的直流配电网概念和发展目标。文献[1]已就国外研究现状进行了总结归纳, 最具典型的直流配电网体现在以下三个方面。

1.1 纯直流的用电网络结构模式

这种直流供电模式, 最早始于美国弗吉尼亚理工大学。在 2007 年, 美国弗吉尼亚理工大学 CPES 中心提出了“Sustainable Building Initiative(SBI)”研究计划, 主要为未来住宅和楼宇提供电力。随着研究的深入, CPES 于 2010 年将 SBI 发展为 SBN(Sustainable Building and Nanogrids), 其典型结构如图 1 所示^[2]。严格来说, CPES 提出的直流供电网络仅仅涉及直流用电供电结构, 但是, 其结构体现出了直流配电网的雏形。整个系统具有 2 个电压等级的直流母线 DC 380 V 和 DC 48 V, 分别给不同电压等级的负载供电。DC 380 V 母线主要是为了匹配工业标准的直流电压, 它依靠前端整流器和功率因数校正(power factor correction, PFC)电路接入主电网。DC 48 V 母线主要是为了匹配通信设备的直流供电电源的电压等级, 它通过 DC/DC 变换器与 DC 380 V 母线连接。

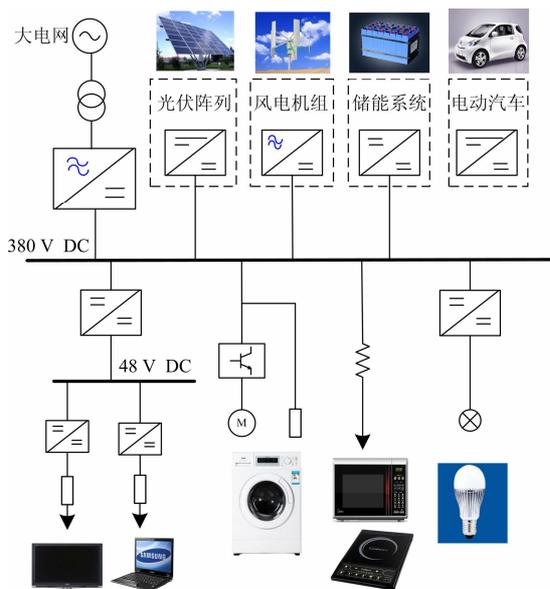


图 1 CPES 中心提出的直流配电系统结构

Fig. 1 DC distribution system proposed by CPES

1.2 交直流混联的直流供电网络结构模式

这种直流供电网架, 以日本东京工业大学^[3]、日本大阪大学于 2006 年提出的一种双极结构的直流微

电网系统^[4-5]为代表, 如图 2 所示。230 V 交流电由降压变压器从 6.6 kV 配电网直接获得, 然后通过双向整流器变换为 170 V 直流电压。一个燃气轮机通过背靠背变换器直接连接到 230 V 交流电, 蓄电池和超级电容等储能设备以及光伏电池等分布式电源均通过 DC-DC 变换器连接到直流母线。基于直流母线, 可以通过电力电子变换器得到多种电力供应, 如单向 AC 100 V、三相 AC 200 V 和 DC 100 V 等。

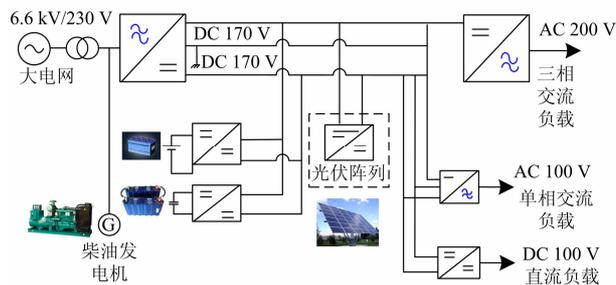


图 2 具有双电极的直流配电系统结构

Fig. 2 Bipolar-type DC distribution configuration

1.3 多电源注入的交直流混联的直流供电网络结构模式

这种直流供电模式以意大利的米兰理工大学、罗马尼亚的布加勒斯特理工大学为代表, 于 2007 年提出了一种带有交替供电电源的直流配电系统结构^[6], 如图 3 所示。该系统不仅可以利用光伏发电和风力发电产生的电能, 还可以由沼气等产生生物能供电。

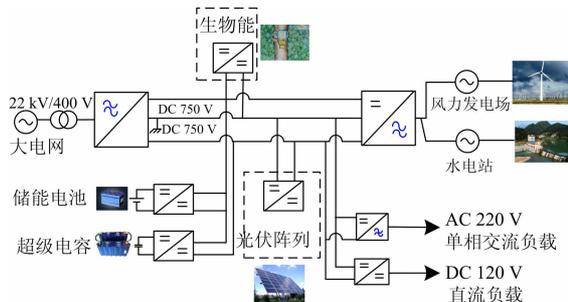


图 3 带有交替供电电源的直流配电系统结构

Fig. 3 DC distribution network with alternative sources

2014 年国家 863 研究课题设置了一种新型的直流配电网网架结构, 代表了国内在直流配电网领域中新的研究动向, 主要结构体系为: 未来直流配电网将会以交直流混联方式存在。直流配电网将会与直流输电网进行对接, 在直流配电网系统中将会以直流微网与交流微网同时存在。电压等级也会以多层电压等级存在, 目前较为合适的电压等级为 DC

500V 以及 DC 250V。

2 直流配电系统技术特点和优势

相比于交流配电网, 直流配电系统拥有着其自身的潜在技术特点与优势^[7]。

2.1 直流配网有利于分布式电源接入和有效利用

随着城市范围内越来越多的分布式电源就近接入配电网, 采用直流微网可以实现分布式电源就地并网, 节省投资费用。例如, 光伏电池发出的是一种随机波动的直流电, 且电池出口电压较低。现采用光伏电池并网模式一般先需要通过 DC/DC 升压器升压, 再通过 DC/AC 变流器, 并经过滤波器才能和交流系统相连接。未来的配电网应更好接纳光伏电池、燃料电池、小型风电场和电动汽车充电站等分布式电源的并网。

直流配网的引入有利于分布式电源的接入与有效利用。同时, 相对于传统交流配网, 含有直流电源的分布式电源接入直流配网, 只需要 DC/DC 变流器, 节省了 DC/AC 变流器和滤波器的投资。

2.2 直流配网更方便于直流负荷接入

现今大量的工业负荷采用变频技术以提高电能利用效率, 并且众多办公与家用电器设备采用直流供电实际上更为方便、节能。多数家电可以采用直流供电, 产生的电压电流的纹波较少, 电能损耗比交流减少 15% 以上。所以, 一方面可以简化相关设备结构, 降低成本, 另一方面可以避免换流器对交流系统的影响。

2.3 直流配网可提供更大的供电容量和更好的电能传输效率

当配电网线路绝缘水平相同、线路建造费用和输电走廊宽度相同时, 若三相交流线路(功率因数 0.9)与直流微网双极直流线路的传输功率大致相同时, 就单条线路而言, 直流的传输功率约为交流的 1.5 倍。所以直流微网具有更大的供电容量。直流配网还不需要无功补偿设备和滤波设备, 减少了固定设备的投资, 节约了土地资本, 降低了新建输电线路的费用。

2.4 直流配网能保障高可靠性和高品质供电

一方面, 随着科技的进步, 城镇化进程的推进, 其中具有代表性的信息产业和城市居民需要较高的电能可靠性和优质的电能质量。另一方面, 城市冲击负荷和负荷容量也迅速增加。另外, 由于城市负荷中心往往电源支撑较弱, 无功补偿能力不足, 当系统发生扰动时, 很有可能造成常容易失去同步稳定和电压崩溃, 从而发生大范围停电现象。因此, 直流配电网不但控制简单, 供电能力强, 同时还更

有利于电力优化调度, 实现资源的优化配置, 符合人们对高品质供电的要求。

3 直流配电网协调控制技术

直流配电网日益受到关注的同时, 也应该清楚的认识, 完全实现以直流为主导的配电方式还需要很长的一段时间, 特别是一些关键的控制技术与装备技术需要解决。本文将从直流配电网协调控制的角度来分析相关关键技术及可行性。

3.1 直流配电网网架结构及电压等级选择

由于采用直流电源作为配送电后, 其配送网络与传统的交流配送网络将会有根本的不同。从配电系统来讲, 直流配电网也将分级配送, 相互配合。未来也会出现中压直流配电、低压直流配电、以及超低压直流配电网架。需要根据各个电压等级所适应的直流负载, 相互配合, 相互补充。同时, 输电网络转入到配电网, 也会出现不同的接入形式, 存在直流输电网对接直流配电网、交流输电网对接直流配电网的形式, 这涉及到多端直流输电以及控制等关键技术。

从网络接线方式来讲, 直流配电网的网络架构也可设计成辐射状、网状或环状。不同的形式其可靠性、经济性、复杂程度不尽相同。因此, 直流配电网网架结构的研究是一个系统性以及全局性的问题。未来想要重新建立直流配电网在其成本造价和可行性上还有待商榷, 最有可能的将会是交流配网与直流配网混联存在。

直流配电网同样将会拥有多个电压等级, 以适应不同直流负荷的需求。文献[8-9]提出了可分为两个电压等级; 文献[10]则认为为适应目前 400 V 交流电压等级, 500 V 的直流电压等级更为合适与有效。总的来说, 直流配电网的电压等级目前并未有统一的标准, 这是未来直流配电网系统需要重点考虑的问题, 因此, 需要从以下三个方面考虑电压的选取问题: 1) 直流配网的供电范围与供电容量; 2) 直流配网的成本造价; 3) 直流配网的绝缘与开关设备选取。

3.2 直流配电网稳定控制技术

对于直流配电系统而言, 直流配电系统的电压控制与电流控制是最基本的控制目标。文献[11]通过对系统建模仿真, 并在此基础上对直流微电网进行小扰动稳定性分析, 从而得出了功率变换器的控制参数对系统稳定性的影响。文献[12]则针对直流微网中功率变换器阻抗特性, 通过分析变换器在下垂控制方式下的阻抗特性, 得到对直流微电网稳定性的分析。

目前, 大多文献还是集中在变换器本身的控制技术的研究与分析, 并未从系统的角度对直流配电网稳定性控制进行系统分析。而对于未来配电网很有可能是交流配电网与直流配电网混合存在, 因此, 对于直流配电网的稳定控制研究可以在以下三个方面进行研究: 1) 发生交流侧故障时及保护动作后, 保证交流侧频率稳定、电压稳定, 直流侧电压稳定等双重控制目标的稳定控制技术; 2) 受到分布式发电出力波动及负荷波动的扰动后, 直流配电网电压稳定控制技术; 3) 受到外部大电网或配电网交换功率波动等影响后, 直流电压稳定控制技术。未来直流配电网中势必会通过电力电子变换装置完成电压控制及电流控制, 其可靠性以及快速性也将决定直流配电网稳定控制的可行性。

3.3 直流配电网能量管理技术

直流配电网主要能够有效地解决分布式发电及直流负荷, 但分布式发电(目前主要包含光伏发电及风力发电)往往存在波动性与随机性, 势必会对系统的稳定性和能量的有效管理带来挑战, 因此在未来直流配电网系统中, 能量管理系统也将是关键技术之一。文献[13]就提出了一种基于直流总线电压信息的能量变换与管理方法, 系统由三个模块与四种工作模式组成, 能够有效地控制直流微网中的功率平衡和系统稳定。文献[14]提出了一种基于智能多代理技术的能量协调控制方法, 用于直流微网的能量管理与电压控制。

未来其研究方向可以在以下三点: 1) 多时间尺度的分布式发电源发电预测与负荷预测技术; 2) 直流配电网经济优化调度模型建模; 3) 直流配电网双向潮流最优控制技术。目前大多有关能量管理系统的研究还是集中在交直流混合微电网以及直流微电网, 有关直流配电网如何进行能量管理系统相关研究较少。

3.4 直流配电网电能质量治理技术

电能质量的问题在交流配电网中较为突出, 主要表现在电压的波动以及闪变、谐波的治理以及三相不平衡的问题。在直流配电网中, 电能质量的问题主要体现在电压的波动及闪变。文献[15]分析了超级电容、燃料电池、蓄电池等各种储能模块, 通过下垂法, 协调控制各个储能单元, 从而达到稳定直流母线电压的目的。文献[16]针对直流微电网电能质量综合评估进行了研究, 提出了直流微电网电能质量综合评估的概念, 建立其有别于交流系统的直流电能质量评价指标。

目前文献并未针对直流配电网中的电能质量问题展开分析, 基于未来交直流混合配电网的状态下,

电能质量治理技术可以在以下几点考虑: 1) 分布式发电 DC/AC 变流器的谐波抑制优化设计分析; 2) 基于多组快速储能装置下垂算法的直流稳压技术; 3) 分散储能与集中储能协调控制直流电压调节技术。储能技术的应用在未来直流配电网中也将越来越重要。

3.5 直流配电网继电保护技术

由于直流配电网采用以直流为主导, 在电气特性及其测量方式等根本性问题上跟传统的交流配电网完全不同, 因此直流配电网继电保护技术将会是一个新的挑战。文献[17]则是针对城镇轨道交通牵引系统中的直流供电系统, 提出了一种新型的直流保护装置, 特别是对直流系统中电压与电流的监测与保护。文献[18]针对逆变型分布式电源的微电网不同于传统电源的控制方式、短路故障以及双向潮流等特点, 讨论了微电网保护与传统电网保护的差别及分布式电源的接入对配电网的影响。有关直流配电网的保护技术研究仍处于开始阶段。

未来有关直流配电网可以通过以下技术路线进行研究: 1) 基于广域测量数据的直流配网快速故障定位技术; 2) 常规传感元件和光线通讯技术相结合的直流测量技术; 3) 基于微秒级高速采样的 SV 采样值和 GOOSE 报文传输机制的直流配网保护通讯技术; 4) 直流配网保护系统的组成方案和保护配置。

3.6 直流配电网关键设备技术

直流配电网的构建离不开关键设备的支撑与保障。直流配电网协调控制的基础是要在设备层能够实现监测与管控。因此, 关键设备的开发与应用也是直流配电网发展的关键所在。

1) 直流固态断路器

近年来, 出现的基于半导体器件的直流固态断路器, 具有损耗低、动作快等优点, 收到了学术界以及工业界的广泛关注^[19-20]。1987年, 美国 Texas 大学采用 GTO 作为开关器件对 200V/15A 的直流断路器进行了研究。2005年, 美国 CPES 采用 ETO 作为开关器件对 1.5 kV/1.5 kA 的直流固态断路器进行了研究。总的来说, 目前 400 V 以下的低压断路器已经逐步实现工业化, 而中高压直流断路器的研发已经逐步提上日程。比如 2012年 11月, ABB 公司就宣称开发了世界上第一台高压直流断路器, 其主要是将机械动力学与电力电子设备结合的固态型断路器。今后, 直流固态断路器将会是直流配电网发展的基础。

2) 用于直流配网与交流微电网节点的双向 DC/AC 三电平变换器

随着电力电子技术及其控制技术发展, 三电平

变换器的研究越来越多的得到关注^[21-23]。相对于两电平的变换器,三电平变换器拥有输出谐波含量更少、电能质量更好、耐压系数更高的特点。在微电网应用中,已经有许多文献在风力发电应用^[24],光伏发电应用^[25]中采用了三电平变换器。在未来直流配电网的应用中,用于交流微电网与直流配电网的接口中也可采用 DC/AC 三电平变换器。并且,其还可以配合潮流控制、系统稳定控制以及保护等协调控制技术的要求,成为智能一体化的双向 DC/AC 三电平变换器。

4 结语

直流配电网可以有效地解决分布式发电以及直流负荷对传统交流配电网带来的挑战,但同时又面临新的挑战。本文系统性地总结了直流配电网的研究现状以及直流配网的技术特点。重点从直流配电网协调控制的角度提出了未来直流配网发展的关键技术;加紧研究确定直流配电网的网架结构和电压等级是前提和基础;研究直流配电网的稳定控制和能量管理系统是解决直流配电网稳定、可靠、高效运行的保证;研究直流配电网谐波治理技术是为客户提供更好的供电质量,符合客户的迫切需求;研究直流配网继电保护技术将会是全新的挑战;直流配电网关键设备的研制既是直流配网发展的助推器,也是早日实现直流配网的根本基础。随着直流配网越来越得到关注,更深层次的研究会陆续展开。

参考文献

- [1] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 9-19.
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wen-hua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.
- [2] BOROYEVICH D, CVETKOVIC I, DONG D, et al. Future electronic power distribution systems: a contemplative view[C] // 2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, Basov, Russia: IEEE, 2010: 1369-1380.
- [3] ITO Y, ZHONG Y, AKAGI H. DC microgrid based distribution power generation system[C] // 2004 4th International Power Electronics and Motion Control Conference, Xi'an, China: IEEE, 2004: 1740-1745.
- [4] KAKIGANO H, MIURA Y, ISE T. DC micro-grid for super high quality distribution system configuration and control of distributed generations and energy storage devices[C] // 2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, Jeju, Korea: IEEE, 2006: 1-6.
- [5] KAKIGANO H, MIURA Y, ISE T. Low-voltage bipolar-type DC microgrid for super high quality distribution[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2010, 25(12): 3066-3075.
- [6] MAGUREANU R, ALBU M, PRIBOIANU M, et al. A DC distribution network with alternative sources[C] // 2007 Mediterranean Conference on Control and Automation, Athens, Greece: Mediterranean Control Association (MCA), 2007: 1-4.
- [7] 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 Dao-zhuo, ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 98-104.
- [8] BOROYEVICH D, CVETKOVIC I, DONG D, et al. Future electronic power distribution systems: a contemplative view[C] // Proceedings of the 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, Basov, May 20-22, 2010: 1369-1380.
- [9] ANAD S, FERNANDES B G. Optimal voltage level for DC microgrid[C] // Proceedings of the 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Glendale, AZ, USA, November 7-10, 2010: 3034-3039.
- [10] PRATT A, KUMAR P, ALDRIDGE T V. Evaluation of 400V DC distribution in telco and data centers to improve energy efficiency[C] // Proceedings of the 29th International Telecommunications Energy Conference, Rome, Italy, September 30-October 4, 2007: 32-39.
- [11] 施婕, 郑漳华, 艾芊. 直流微电网建模与稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(2): 86-90.
SHI Jie, ZHENG Zhang-hua, AI Qian. Modeling of DC micro-grid and stability analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 86-90.
- [12] 邢小文, 张辉, 支娜, 等. 直流微电网中变换器阻抗特性及系统稳定性研究[J]. 低压电器, 2014(4): 26-31.
XING Xiao-wen, ZHANG Hui, ZHI Na, et al. Impedance analysis and system stability studies of converter in DC microgrid[J]. Low Voltage Equipment, 2014(4): 26-31.
- [13] 张犁, 孙凯, 吴田进, 等. 基于光伏发电的直流微电网能量变换与管理[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 248-254.
ZHANG Li, SUN Kai, WU Tian-jin, et al. Energy conversion and management for DC microgrid based on photovoltaic generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 248-254.

- [14] 王晶, 李瑞环, 束洪春. 基于智能多代理的能量协调控制在直流微网中的应用[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(7): 132-138.
WANG Jing, LI Rui-huan, SHU Hong-chun. Energy coordination control based on intelligent MAS for DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7): 132-138.
- [15] 赵阳. 含多种储能的直流母线电压控制策略[J]. 电源技术应用, 2013(12): 16-17.
ZHAO Yang. DC-link voltage control method with multiple energy storages[J]. Power Supply Technologies and Applications, 2013(12): 16-17.
- [16] 姜喆, 尹忠东. 基于 F-AHP 的直流微电网电能质量综合评价[C] // 第三节全国电能质量学术会议暨电能质量行业发展论坛论文集, 2013, 8: 41-46.
JIANG Zhe, YIN Zhong-dong. DC microgrid power quality evaluation system based on F-AHP[C] // The Third National Power Quality Conference, 2013, 8: 41-46.
- [17] 郭红卫. 新型牵引供电系统保护装置的软硬件设计[J]. 电气化铁道, 2012(5): 23-26.
GUO Hong-wei. A new type of urban rail transit traction power supply system of DC protection device[J]. Electrical Railway, 2012(5): 23-26.
- [18] 王瑞合, 叶建华, 欧善科. 基于逆变型分布式电源微电网保护的研究[J]. 低压电器, 2012(18): 23-35.
WANG Rui-he, YE Jian-hua, OU Shan-ke. Research on a protection for micro-grid based on control strategy of inverter interface distributed generator[J]. Low Voltage Equipment, 2012(18): 23-35.
- [19] 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 Jian-guo. Present status of DC solid-state circuit breaker and its potential application[J]. System Protection and Control, 2009, 37(19): 145-150.
- [20] MU J, WANG L, HU J. Research on main circuit topology for a novel DC solid state circuit breaker[C] // 2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, TaiChung: IEEE, 2010: 926-930.
- [21] 王峰, 张旭隆, 何凤有, 等. 基于复合模型预测控制策略的三电平 APF 研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 79-85.
WANG Feng, ZHANG Xu-long, HE Feng-you, et al. Research of three-level shunt APF control method based on composite model predictive control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 79-85.
- [22] 张政华, 裴云庆, 陈锋, 等. 基于 SVPWM 的三电平逆变器中点电压控制方法[J]. 电力电子技术, 2013, 47(12): 39-41.
ZHANG Zheng-hua, PEI Yun-qing, CHEN Feng, et al. Neutral voltage control method of three-level inverter based on SVPWM[J]. Power Electronics, 2013, 47(12): 39-41.
- [23] 陈雪亮, 张新民. 风光柴互补发电系统中三电平充电技术的研究[J]. 船电技术, 2014, 34(2): 1-5.
CHEN Xue-liang, ZHANG Xin-min. Research on three-level charge and discharge in a wind-solar-diesel hybrid power system[J]. Ship Electrical Technologies, 2014, 34(2): 1-5.
- [24] 季小康, 廖勇. 直驱风力发电系统三电平变换器控制策略研究[J]. 电源学报, 2014, 3(2): 78-85.
JI Xiao-kang, LIAO Yong. Control strategy study on three-level NPC converters of direct-driven wind power generation system[J]. Journal of Power Supply, 2014, 3(2): 78-85.
- [25] 宋香荣, 舒杰, 张先勇, 等. 基于三电平变流器的光伏微电网及其控制策略研究[J]. 新能源进展, 2014, 2(1): 25-30.
SONG Xiang-rong, SHU Jie, ZHANG Xian-yong, et al. The control strategy of PV microgrid based on three-level converters[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2014, 2(1): 25-30.

收稿日期: 2014-06-28; 修回日期: 2014-10-25

作者简介:

周逢权(1969-), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统保护与控制、分布式发电与微电网技术、电动汽车充换电技术; E-mail:zhoufq2001@qq.com

黄伟(1983-), 男, 高级工程师, 主要从事新能源发电与微电网技术研究。