



移动阅读

王浩.煤层气井排采设备供电的直流微电网优化与控制关键技术[J].煤炭学报,2019,44(S1):355-361.doi:10.13225/j.cnki.jccs.2019.0442

WANG Hao.Key technologies of optimization and control of DC micro-grid for drainage equipment of CBM well[J].Journal of China Coal Society,2019,44(S1):355-361.doi:10.13225/j.cnki.jccs.2019.0442

煤层气井排采设备供电的直流微电网优化与控制关键技术

王 浩

(河南理工大学 电气工程与自动化学院 河南 焦作 454000)

摘 要:近年来,国家大力推进煤层气勘探开发行动计划,有效促进了煤层气产业的快速发展。一方面,当前基于交流的煤层气地面排采供电网络,电费支出占生产成本一半以上,极大地制约了煤层气产业的可持续发展;另一方面,直流微电网以其控制方式简单、电能变换环节少、不存在无功功率和频率稳定等优势,已成为未来微电网的发展趋势。为解决目前基于交流的煤层气地面排采供电网络存在的用电严重不合理问题,本文拟对煤层气地面排采供电网络进行直流化改造。首先,对应用于煤层气地面排采供电网络的无功补偿装置和周期性变工况条件下的电动机节能途径进行了梳理;其次,在建立包含分布式电源、储能装置和煤层气井排采设备的直流微电网基础上,围绕其拓扑结构、优化配置、模型建立、电压稳定控制及协调运行等方面,对用于煤层气井排采设备供电的直流微电网优化与控制关键技术进行了详细阐述;最后,从拓扑结构与系统优化配置相互作用关系、双向能流下的系统稳定性判据、计及源-网-荷多因素耦合作用的电压稳定控制等关键技术进步,以及用于煤层气井排采设备供电的直流微电网应用发展前景两方面进行了展望,指出相关优化与控制关键技术的进步可为煤层气地面排采供电网络直流化提供科学依据和理论指导。

关键词:煤层气;排采机构;直流微电网;优化与控制

中图分类号:TD611 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2019)S1-0355-07

Key technologies of optimization and control of DC micro-grid for drainage equipment of CBM well

WANG Hao

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In recent years, the Chinese government has vigorously promoted the coalbed methane (CBM) exploration and development action plan, effectively promoting the rapid development of CBM industry. On the one hand, the current AC-based power supply network for CBM surface drainage accounts for more than half of the production cost of electricity, which greatly restricts the sustainable development of CBM industry. On the other hand, DC micro-grid has become the development trend of micro-grid in the future because of its advantages such as simple control mode, fewer energy conversion links, no existence of reactive power and frequency stability. To solve the serious problem of power consumption in the current AC power supply network for CBM surface drainage, the DC transformation of power supply network for CBM surface drainage was proposed in this paper. Firstly, the reactive power compensation devices applied to the power supply network for CBM surface drainage and the energy-saving ways of the drainage equipment motor in CBM well under the periodic dynamic alternating load characteristics were reviewed. Secondly, based on the establish-

收稿日期:2019-04-10 修回日期:2019-05-16 责任编辑:郭晓炜

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61703144);河南省高等学校重点科研资助项目(19B470003);河南理工大学博士基金资助项目(B2018-27)

作者简介:王浩(1988—),男,河南焦作人,讲师,博士。E-mail: wangh@hpu.edu.cn

ment of DC micro-grid including distributed energy resources (DERs) ,energy storage units and the drainage equipment in CBM well ,the key technologies of optimization and control of the DC micro-grid for the drainage equipment of CBM well were emphatically expounded in terms of topological structure ,optimal configuration ,model establishment , voltage stability control and coordinated operation.Finally ,from the aspects of key technological progress including the interaction between topological structure and system optimal allocation ,system stability criterion under bidirectional energy flow and voltage stability control considering source-network-load coupling were analyzed ,and the future development and application of the DC for the drainage equipment of CBM well was also given.It was pointed out that the progress of related key technologies can provide a scientific basis and theoretical guidance on the DC micro-grid for drainage equipment of CBM well.

Key words: coalbed methane; drainage equipment of CBM well; DC microgrid; optimization and control

煤层气资源赋存于煤系地层中,主要成分以甲烷为主,是一种清洁高效能源。自然资源部最新油气资源勘探结果表明,我国埋深 2 000 m 以浅的煤层气地质资源量为 30.05 万亿 m^3 ,可采资源量为 12.50 万亿 m^3 ^[1]。近年来,国家大力推进煤层气勘探开发行动计划(2014—2020 年),有效促进了煤层气产业的快速发展。另一方面,当前基于交流的煤层气地面排采供电网络,电费支出占生产成本一半以上,极大地制约了煤层气产业的可持续发展。具体表现在:① 周期性变工况条件下,驱动煤层气井排采机构运行的电动机在空载、轻载和重载之间交替变化,导致逆变器直流供电侧母线电压波动范围大;② 电压大范围波动会造成由直流供电侧电容处理的无功功率变大,导致网侧功率因数变低;③ 交流供电网络中配电变压器的大量使用将产生涡流损耗,无功环流亦不可忽略;④ 变频器等电力电子装置的高比例渗透,造成交流供电网络谐波污染与电磁干扰问题日趋严重。

微电网以其灵活高效、易于接纳分布式电源逐渐成为未来配电网络的主要形式。考虑到微电网内的分布式发电和负荷多为直流,直流微电网将是较理想的方案^[2]。因此,建立用于煤层气井排采设备供电的直流微电网能解决上述问题:① 直流微电网不存在涡流损耗、无功环流、频率和功角稳定性等问题;② 直流微电网与交流主网通过 PWM 整流器连接,可实现网侧单位功率因数运行,且 PWM 整流器能有效隔离交流主网扰动;③ 直流微电网用一级变换器实现与分布式电源和负荷的连接,电能变换环节少,功率密度和系统效率高;④ 直流微电网运行模式灵活,可在并网和离网模式间任意切换。

目前,国内外学者围绕含电阻性负荷或恒功率负荷的典型直流微电网进行了研究。但考虑到煤层气井排采设备电动机负荷周期性动态交变特性,以及煤

层气资源开发的地质特征、资源潜力和成藏条件等因素,建立用于煤层气井排采设备供电的直流微电网应结合使用环境、负荷属性和电压等级等因素,相关研究及工程应用仍处于起步阶段。笔者首先对应用于煤层气地面排采供电网络的无功补偿装置和周期性变工况下的电动机节能途径进行了梳理;其次,在建立用于煤层气井排采设备供电的直流微电网基础上,围绕其拓扑结构、优化配置、模型建立、电压稳定及协调运行等方面着重阐述用于煤层气井排采设备供电的直流微电网优化与控制的关键技术;最后,结合优化与控制关键技术进步和应用发展前景两方面展望用于煤层气井排采设备供电的直流微电网,指出其优化与控制技术的进步可为煤层气地面排采供电网络直流化提供科学依据和理论指导。

1 煤层气地面排采供电网络节能研究现状

1.1 无功补偿装置应用研究

无功补偿对改善网侧功率因数与电能质量具有重要作用。目前,用于煤层气地面排采供电网络的无功补偿装置主要有 3 种:

(1) 机械开关投切电容器组(MSC):适用于负荷波动不太频繁的场所,但是不属于动态无功补偿^[3]。

(2) 静止无功补偿(SVC):包括晶闸管投切电容器型(TSC)^[4]、固定电容-晶闸管控制电抗器型(FC-TCR)^[5]、晶闸管投切电容器-晶闸管控制电抗器型(TSC-TCR)^[6]等。优点是响应速度快,可连续调节;缺点是铜损和铁损较大,输出到交流系统中的高次谐波较多。

(3) 静止无功发生器(SVG):SVG分为电压型和电流型 2 种,其实质是基于补偿原理和瞬时无功功率构成的交流换相器。电压型 SVG 以其控制方便、损耗小,因而被广泛使用。已有学者设计出一种基于三电平中点嵌位(NPC)电压型逆变器拓扑的 SVG,并在煤层气井排采现场取得了良好效

果^[7]。SVG 相较于 SVC 优势: ① 能够实现快速实时补偿; ② 能够满足按需补偿; ③ 欠压条件下的无功调节能力较强, 调节范围较宽; ④ 通过调节桥式电路交流侧输出电压相位和幅值, 可以减少输出侧高次谐波。

1.2 周期性变工况下电动机节能途径研究

周期性动态交变负荷作用下, 驱动煤层气井排采设备运行的电动机在相当长的一段时间内处于空载和发电状态, 力能指标低下(效率和功率因数乘积)。此外, 由于负荷启动困难, 电动机额定功率大于实际运行功率, “大马拉小车”现象严重。目前, 在实际中主要通过以下 4 种途径实现电机节能:

(1) 星角转换控制: 前提是星接的最大电磁功率大于周期性动态交变负荷的最大机械功率, 可将绕组由角接变为星接^[8]。星角转换控制方法简单, 节能效果明显; 缺点是星角转换节点不易把握。

(2) 最优调压控制: 即利用控制器实时监测负荷变化, 采集输入功率和负荷转矩求得最优电压曲线, 通过功率开关器件调节电源电压。其中, 技术手段最成熟、应用范围最广的一种方法是晶闸管调压^[9], 但是这种调压方法谐波含量大, 无法实现无谐波调压。

(3) 断续供电控制: 在一个周期内分段施加零电压, 即空载和发电状态断电运行, 动能释放完毕的某个时刻重新通电运行, 是一种特殊的调压控制^[10]。该方法优点是可避免断电时段电动机内部各项损耗的能量流失; 缺点是重新通电时涌流会造成较大损耗和机电冲击, 无法实现快速软投入。

(4) 基于煤层气井排采设备运行特性的节能新途径: 考虑周期性动态交变负荷特性和四连杆机构运动规律, 有学者提出基于变频器变频-恒频分段协调工作的煤层气井排采设备电动机节能控制新方法^[11], 该方法将一个周期重新划分为变频区间和恒频区间, 通过不同区间交替改变电动机供电模式实现节能, 具有较强通用性, 是一种潜力较大的节能途径。

2 用于煤层气井排采设备供电的直流微电网优化与控制关键技术

2.1 拓扑结构

目前, 直流微电网主要有双极性(Bipolar-type)、多电压等级(Multi-voltage level)和多母线(Multi-bus)等拓扑结构。双极性拓扑中应用最多的是双极性三线制结构^[12], 该结构中交直流互联端口采用 2 个容量相同的 PWM 整流器, 以及直流微电网中的 2 个储能单元 DC/DC 变换器, 皆通过一极直流母线连

接, 其本质是在直流微电网内构成双供电回路。优点是可靠性高, 缺点是成本高昂, 存在直流正负极母线电压不平衡问题。多电压等级拓扑能够灵活适应不同容量、电压等级和类型的储能, 以及分布式电源和负荷的接入^[13], 不同电压等级通过基于模块化多电平技术(modular multilevel converter, MMC)的直流变压器^[14]实现互联, 该直流变压器借助交流变压器实现两侧直流系统隔离, 电压变换过程包括 DC/AC 和 AC/DC 两级变换, 因此整体体积和损耗较大。

随着直流微电网容量和规模的不断增大, 可采用可靠性更高的多母线拓扑, 如图 1 所示^[15]。当某处直流母线发生故障, 或某交流网络出现故障导致 PWM 整流器退出运行时, 可通过快速隔离故障区域, 使其余母线仍能保证直流微电网正常运行。鉴于多母线拓扑兼具经济、灵活、可靠等特点, 其可作为用于煤层气井排采设备供电的直流微电网拓扑结构的一种优选方案。在构建用于煤层气井排采设备供电的直流微电网多母线拓扑基础上, 如何建立以分布式电源和储能容量、电压等级、使用环境、负荷属性为约束条件, 以供电可靠性和系统总成本为目标的系统优化配置数学模型, 深入探究拓扑结构与系统优化配置之间的相互作用关系, 是下一步首先要开展的重点工作。

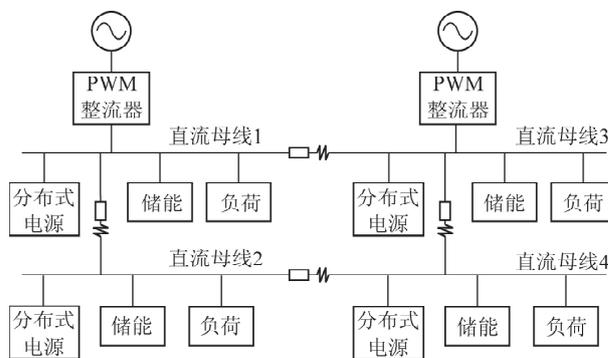


图 1 多母线拓扑结构

Fig. 1 Multi-bus topology

2.2 系统建模与稳定性分析

目前, 国内外学者主要采用小信号分析法对直流微电网系统建模展开研究, 通过状态空间平均建模, 小信号法能够满足稳定性分析与控制器设计^[16]。然而, 这种通过状态空间平均得到的系统线性频域模型, 建模精度不高, 大信号扰动下抗扰能力不强。由于单纯依靠传统线性系统理论无法精确反映复杂系统的动态行为, 1986 年美国 Santa Clara 大学召开的高级控制会议上首次提出混杂系统(Hybrid System)概念, 混杂系统将连续时间动态与离散事件动态有机结合, 很快引起学术界的广泛关注。切换系统

(Switched System) 是混杂系统的一种特殊形式,由多个子系统和协调子系统之间的切换规则组成^[17]。由于切换规则可以替代混杂系统的离散动态细节,使得切换系统模型在不限制其能力和适用范围的同时较混杂系统模型大大简化^[18]。近年来切换系统以其模型精确、易于分析而受到越来越多关注,已成为混杂系统理论研究的重要方向^[19]。由于功率开关器件的存在,大部分电力电子变换器都表现出明显的切换特性,利用切换系统理论对其建模和分析更贴近真实的物理开关过程,可有效解决线性系统分析的局限性^[20]。目前,已有不少文献将切换系统理论应用于电力电子变换器建模与分析中。文献[21]提出了基于 Boost 电路切换系统模型的参数辨识方法。文献[22]建立了面向储能节能系统的双向 DC/DC 变换器切换系统模型,通过构造系统 Lyapunov 函数,推导出系统切换控制律。文献[23]通过建立双向 AC/DC 变换器切换动态模型,提出了一种双向 AC/DC 切换控制方法。文献[24]基于三相 SPWM 逆变器周期切换模型,提出了一种新型稳定性分析方法。但是,将切换系统理论应用于多变换器级联系统建模,目前公开的文献还不多。已有学者在前期开展了一定的可行性研究,指出用于煤层气井排采设备供电的直流微电网本质上是一类多变换器级联系统,属于典型的切换系统,为准确分析用于煤层气井排采设备供电的直流微电网的动态特性,建立其切换系统模型不失为一种有效建模手段^[25]。

目前直流微电网稳定性分析大多围绕恒功率负荷展开^[26-27],方法是简化源侧变换器与负荷侧变换器级联的形式,利用阻抗比判据^[28]分析系统稳定性。针对稳定性控制的问题,不少文献从阻抗匹配角度给出稳定性控制方法,主要分为无源阻尼和有源阻尼。文献[29]给出了 RL 并联、RL 串联和 RC 并联 3 种无源阻尼电路降低变换器输出阻抗峰值的方案。文献[30]通过增加阻尼电阻改变负载阻抗特性,以提高直流微电网稳定性。另一方面,有源阻尼由于没有硬件电路,因而不产生损耗。为了改变变换器等效输出阻抗,文献[31]提出一种基于低通滤波的有源阻尼方法,以提高直流微电网稳定性。文献[32]提出一种基于并网变换器直流电流前馈的有源阻尼方法,有效解决了恒功率负荷高渗透率下的直流微电网稳定性问题。但是,对于由煤层气井排采设备电动机周期性动态交变负荷接入直流微电网引起的系统稳定性问题,公开的文献很少且研究尚不深入。目前已有学者进行了初步的研究,即在建立由源侧输出阻抗和负荷侧输入阻抗组成的用于煤层气井排采设备供电的

直流微电网系统全局小信号模型基础上,提出一种基于虚拟阻抗的有源阻尼控制方法(图 2),通过改变系统阻尼使主导极点趋向稳定区域^[33]。

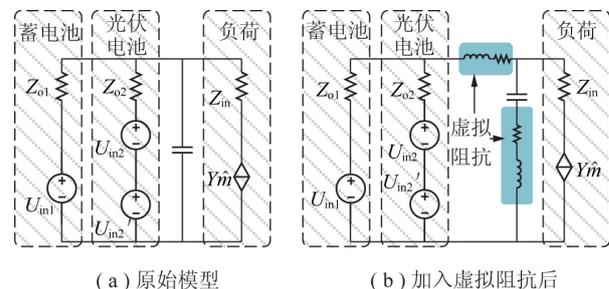


图 2 系统稳定性控制

Fig. 2 System stability control

2.3 电压稳定与协调运行

直流微电网稳定运行取决于直流母线电压稳定与否。根据产生机理不同,文献[34]将直流母线电压波动分为扰动型波动和振荡型波动 2 种。针对分布式电源功率波动、交直流电网功率交换不平衡等扰动型波动,多数文献通过在并网接口变换器^[35]或储能接口变换器^[36]的控制回路中引入前馈实现直流母线电压稳定控制。针对多变换器系统级联相互作用引起的振荡型波动,有学者采用母线电压调节器^[37]、纹波消除器^[38]和纹波能量储存器^[39]等装置,实质是通过滤除母线电流的交流分量,实现直流母线电压稳定。上述研究主要从分布式电源功率波动、交直流电网功率交换不平衡以及多变换器系统级联相互作用等方面对直流母线电压波动展开研究,而对于由煤层气井排采设备电动机周期性动态交变负荷引起的直流母线电压波动,相关研究尚未全面展开。目前已有学者进行了前期研究,提出一种基于煤层气井排采设备电动机运行最优速度曲线的电压稳定控制方法,初步揭示了煤层气井排采设备电动机周期性动态交变负荷作用下的直流母线电压波动机理^[40]。

目前,用于煤层气井排采设备供电的直流微电网电压稳定控制研究主要是围绕网内单台煤层气井排采设备展开,当网内有多台煤层气井排采机构同时运行时,直流母线电压波动会随着多台排采设备之间的无序运行而进一步加剧。对于直流微电网供电的多台煤层气井排采设备协调运行控制,已开展了一定的前期研究^[41]。由于网内多台煤层气井排采设备同时运行时,即考虑负荷周期性动态交变特性外,又要考虑负荷之间运行的时序性和方向性。因此,下一步应建立包含时序性、方向性和周期性动态交变特性的煤层气井排采设备电动机负荷综合不确定性模型,揭示负荷综合不确定性模型作用下的直流母线电压波动机理,提出多台排采设备协调运行控制方法。

3 用于煤层气井排采设备供电的直流微电网展望

3.1 优化与控制关键技术展望

(1) 结合煤层气井排采设备电动机周期性动态交变负荷特性,考虑系统规模、分布式电源与负荷接入容量、并网和孤岛运行模式等因素,从供电可靠性和控制灵活性的角度构建煤层气地面排采直流微电网多母线拓扑结构,建立以分布式电源和储能容量、电压等级、使用环境、负荷属性为约束条件,以供电可靠性和系统总成本为目标的系统优化配置数学模型,深入探究拓扑结构与系统优化配置的相互作用关系,是未来用于煤层气井排采设备供电的直流微电网优化配置研究方向。

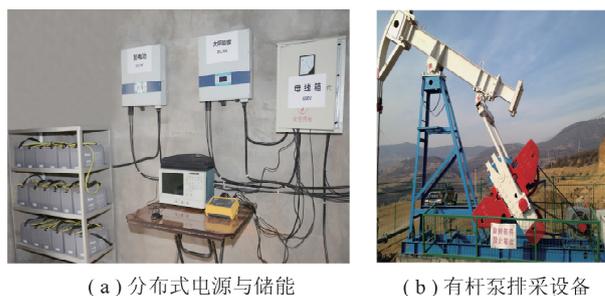
(2) 综合考虑分布式电源、储能、负荷以及交直流接口单元的非线性特征,建立用于煤层气井排采设备供电的直流微电网切换动态模型,揭示切换系统稳定性与各子系统稳定性及切换规则之间的作用机制,探索双向能流的切换系统稳定性规律,提出一种适用于双向能流的直流微电网系统稳定性判据,是未来用于煤层气井排采设备供电的直流微电网系统稳定性分析的发展方向。

(3) 结合用于煤层气井排采设备供电的直流微电网内分布式电源出力随机性、煤层气井排采机构电动机负荷周期性动态交变特性以及交直流电网能量交换不平衡等源-网-荷不确定性因素,揭示上述源-网-荷不确定性因素耦合作用下的直流母线电压波动机理,提出一种计及源-网-荷多因素耦合作用的电压稳定控制方法,是未来用于煤层气井排采设备供电的直流微电网电压稳定控制研究的重要课题。

3.2 用于煤层气井排采设备供电的直流微电网应用前景展望

目前,用于煤层气井排采设备供电的直流微电网优化与控制关键技术仍处于理论分析与实践应用的初始阶段,相关示范项目与工程应用逐步展开。本课题组联合山西蓝焰煤层气有限公司,开始搭建用于煤层气井排采设备供电的直流微电网试验平台,系统硬件组成主要包括:10 kW 光伏电池板及 Boost 变换器模块、100 Ah/12V 蓄电池及双向 Buck/Boost 变换器模块、三相并网 PWM 整流器模块、2 台额定功率 11 kW 电动机驱动 CYJY4-1.5-9HB 型煤层气井有杆泵排采设备,相关进展如图 3 所示。

综合考虑用于煤层气井排采设备供电的直流微电网使用环境、负荷属性和电压等级等因素,借助直流配电技术在舰船电力、数据中心、机车牵引和电动



(a) 分布式电源与储能

(b) 有杆泵排采设备

图 3 现场试验平台搭建

Fig. 3 Field test prototype

汽车等领域的应用^[42-45],从拓扑结构、系统建模、电压稳定控制及排采机构协调运行等方面深入开展用于煤层气井排采设备供电的直流微电网优化与控制关键技术研究,掌握其模型建立、稳定性分析、电压稳定控制及协调运行的关键技术,充分挖掘直流微电网在改善电能质量、更高效可靠接纳分布式电源以及有效隔离交流侧扰动或故障等方面的综合潜力,是一个十分重要而又有相当难度的研究课题,具有广泛应用前景,相关关键技术的进步可为煤层气地面排采供电网络直流化提供科学依据和理论指导,并对丰富拓展直流微电网理论体系、解决交流系统用电严重不合理问题、促进煤层气产业可持续发展、推进能源供给侧结构性改革等方面均具有重要理论和现实意义。

4 结 语

本文着重从拓扑结构、优化配置、模型建立、电压稳定控制及协调运行等方面对用于煤层气井排采设备供电的直流微电网优化与控制关键技术进行了阐述,结合优化与控制关键技术进步和应用发展前景两方面展望了用于煤层气井排采设备供电的直流微电网,指出其优化与控制技术的进步可为煤层气地面排采供电网络直流化提供科学依据和理论指导。本文所做的探讨,是对目前国内外学者和本课题组前期研究工作的归纳和思考,以期能对用于煤层气井排采设备供电的直流微电网进一步发展提供借鉴和帮助。

参考文献(References):

- [1] 张道勇,朱杰,赵先良,等.全国煤层气资源动态评价与可利用性分析[J].煤炭学报,2018,43(6):1598-1604.
ZHANG Daoyong, ZHU Jie, ZHAO Xianliang, et al. Dynamic assessment of coalbed methane resources and availability in China [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1598-1604.
- [2] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids - a general approach toward standardization [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.
- [3] DIXON J, MORAN L, RODRIGUEZ J, et al. Reactive power compen-

- sation technologies: state-of-the-art review [J]. Proceedings of the IEEE 2005, 93(12): 2144-2164.
- [4] 巩庆, 晶闸管投切电容器动态无功补偿技术及其应用[J]. 电网技术 2007, 31(S2): 118-122.
GONG Qing. Thyristor switched capacitor dynamic VAR compensation technology and its application [J]. Power System Technology, 2007, 31(S2): 118-122.
- [5] 孙晓波, 温嘉斌. TCR+FC 型静止无功补偿装置的研究[J]. 电力电子技术 2011, 45(5): 43-45.
SUN Xiaobo, WEN Jiabin. Study on TCR+FC static VAR compensator [J]. Power Electronics 2011, 45(5): 43-45.
- [6] 张瑞君. TSC+TCR 组合补偿技术及仿真分析[J]. 电力电容器与无功补偿 2015, 36(6): 23-26.
ZHANG Ruijun. TSC+TCR compensation technology and simulation analysis [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(6): 23-26.
- [7] 白利军, 王振狮, 庄园, 等. 煤层气开采采用游梁式抽水机静止无功发生器设计[J]. 煤炭科学技术 2014, 42(11): 77-80.
BAI Lijun, WANG Zhenchong, ZHUANG Yuan, et al. Design on static VAR generator of beam type water pump applied to coalbed methane mining [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(11): 77-80.
- [8] 王爱霞, 朱传琴, 闫敬东, 等. 电动机 Δ -Y 切换技术及在抽油机上的应用[J]. 电工技术杂志 2000(3): 33-35.
WANG Aixia, ZHU Chuanqin, YAN Jingdong, et al. Application of motor's Δ -Y changover technology for oil-pump [J]. Electrotechnical Application 2000(3): 33-35.
- [9] FUCHS E F, HANNA I J. Measured efficiency improvements of induction motors with thyristor/triac controllers [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion 2002, 17(4): 437-443.
- [10] LUO Y L, CUI X S, ZHAO H S, et al. A multifunction energy-saving device with a novel power-off control strategy for beam pumping motors [J]. IEEE Transactions on Industry Applications 2011, 47(4): 1605-1611.
- [11] 白利军, 王浩, 王聪, 等. 煤层气井抽水机电动机变频-恒频分段节能控制策略[J]. 煤炭学报 2016, 41(8): 2136-2142.
BAI Lijun, WANG Hao, WANG Cong, et al. Segmented energy-saving control strategy based on variable-constant frequency of beam pump motor for CBM wells [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(8): 2136-2142.
- [12] KAKIGANO H, MIURA Y, ISE T. Low-voltage bipolar-type DC microgrid for super high quality distribution [J]. IEEE Transactions on Power Electronics 2010, 25(12): 3066-3075.
- [13] BOROYEVICH D, CVETKOVIC I, DONG D, et al. Future electronic power distribution systems: A contemplative view [A]. 2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment [C]. Basov, Romania, 2010: 1369-1380.
- [14] 李斌, 张伟鑫. 新型模块化多电平动态投切 DC/DC 变压器[J]. 中国电机工程学报 2018, 38(5): 1319-1328.
LI Bin, ZHANG Weixin. A novel modular multilevel dynamic DC/DC transformer [J]. Proceedings of the CSEE 2018, 38(5): 1319-1328.
- [15] EKNELIGODA N C, WEAVER W W. A game theoretic bus selection method for loads in multibus DC power systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2014, 61(4): 1669-1678.
- [16] 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 Zhanghua, AI Qian. Modeling of DC micro-grid and stability analysis [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 86-90.
- [17] LIBERZON D, MORSE A S. Basic problems in stability and design of switched systems [J]. IEEE Control Systems Magazine, 1999, 19(5): 59-70.
- [18] LIN H, ANTSAKLIS P J. Stability and stabilizability of switched linear systems: a survey of recent results [J]. IEEE Transactions on Automatic Control 2009, 54(2): 308-322.
- [19] KRUSZEWSKI A, JIANG W, FRIDMAN E, et al. A switched system approach to exponential stabilization through communication network [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology 2012, 20(4): 887-900.
- [20] Deaecto G S, Geromel J C, Garcia F S, Pomilio J A. Switched affine systems control design with application to DC-DC converters [J]. IET Control Theory and Applications 2010, 4(7): 1201-1210.
- [21] 任磊, 龚春英. 基于修正混杂系统模型的 Boost 变换器 LC 参数辨识方法[J]. 中国电机工程学报 2018, 38(22): 6647-6654.
REN Lei, GONG Chunying. A LC parameter identification method for boost converter based on modified hybrid system model [J]. Proceedings of the CSEE 2018, 38(22): 6647-6654.
- [22] 李继方, 汤天浩, 姚刚. 基于切换系统的储能节能系统双向 DC-DC 变换器建模与控制[J]. 电工电能新技术 2011, 30(4): 21-25.
LI Jifang, TANG Tianhao, YAO Gang. Modeling and control for energy storage bi-directional DC-DC converter based on switching system [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy 2011, 30(4): 21-25.
- [23] 田崇翼, 李珂, 张承慧, 等. 基于切换模型的双向 AC-DC 变换器控制策略[J]. 电工技术学报 2015, 30(16): 70-76.
TIAN Chongyi, LI Ke, ZHANG Chenghui, et al. Control strategy for bi-directional AC-DC converter based on switched model [J]. Transactions of China Electrotechnical Society 2015, 30(16): 70-76.
- [24] 韩璐, 肖建, 邱存勇. 三相 SPWM 逆变器的切换模型与稳定性分析[J]. 电机与控制学报 2014, 18(2): 21-27.
HAN Lu, XIAO Jian, QIU Cunyong. Modeling and stability analysis of three-phase SPWM inverter based on switched system theory [J]. Electric Machine and Control 2014, 18(2): 21-27.
- [25] 王浩. 构建煤层气地面抽采直流微电网系统的关键技术与可行性分析[J]. 煤炭学报 2018, 43(9): 2653-2660.
WANG Hao. Key technologies and feasibility analysis of DC micro-grid system for CBM ground extraction [J]. Journal of China Coal Society 2018, 43(9): 2653-2660.
- [26] MARX D, MAGNE P, NAHID-MOBARAKEH B, et al. Large signal stability analysis tools in DC power systems with constant power loads and variable power loads—a review [J]. IEEE Transactions on Power Electronics 2012, 27(4): 1773-1787.
- [27] 李玉梅, 查晓明, 刘飞, 等. 带恒功率负荷的直流微电网母线电

- 压稳定控制策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 57-64.
LI Yumei, ZHA Xiaoming, LIU Fei, et al. Stability control strategy for DC microgrid with constant power load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 57-64.
- [28] MIDDLEBROOK R, CUK S. Input filter considerations in design and application of switching regulators [A]. IEEE Industrial Applications Society Annual Meeting [C]. Chicago, USA, 1976: 366-382.
- [29] CESPEDES M, XING L, SUN J. Constant-power load system stabilization by passive damping [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(7): 1832-1836.
- [30] 张辉, 杨甲甲, 支娜, 等. 基于无源阻尼的直流微电网稳定性分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(9): 3100-3109.
ZHANG Hui, YANG Jiajia, ZHI Na, et al. Stability analysis of DC microgrid based on the passive damping method [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(9): 3100-3109.
- [31] 郭力, 冯悻彬, 李霞林, 等. 直流微电网稳定性分析及阻尼控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 927-936.
GUO Li, FENG Yibin, LI Xialin, et al. Stability analysis and research of active damping method for DC microgrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 927-936.
- [32] 季宇, 王东旭, 吴红斌, 等. 提高直流微电网稳定性的有源阻尼方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 370-379.
JI Yu, WANG Dongxu, WU Hongbin, et al. The active damping method for improving the stability of DC microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(2): 370-379.
- [33] 王浩, 王聪, 马勇, 等. 煤层气抽采直流微网建模与稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(14): 194-204.
WANG Hao, WANG Cong, MA Yong, et al. Modeling and stability analysis of DC microgrid for coal bed methane extraction [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(14): 194-204.
- [34] 王成山, 李微, 王议锋, 等. 直流微电网母线电压波动分类及抑制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 84-97.
WANG Chengshan, LI Wei, WANG Yifeng, et al. DC bus voltage fluctuation classification and restraint methods review for DC microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 84-97.
- [35] DONG D, CVETKOVIC I, BOROYEVICH D, et al. Grid-interface bidirectional converter for residential DC distribution systems-part one: high-density two-stage topology [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1655-1666.
- [36] 张国驹, 唐西胜, 周龙, 等. 基于互补 PWM 控制的 Buck/Boost 双向变换器在超级电容器储能中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 15-21.
ZHANG Guoju, TANG Xisheng, ZHOU Long, et al. Research on complementary PWM controlled Buck/Boost bi-directional converter in supercapacitor energy storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 15-21.
- [37] 杜韦静, 张军明, 钱照明. Buck 变流器级联系统直流母线电压补偿控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 135-142.
DU Weijing, ZHANG Junming, QIAN Zhaoming. Compensation methodology for DC bus voltage of cascaded system formed by Buck converters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 135-142.
- [38] CAO X, ZHONG Q C, MING W L. Ripple eliminator to smooth DC-bus voltage and reduce the total capacitance required [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4): 2224-2235.
- [39] WANG R, WANG F, BOROYEVICH D, et al. A high power density single-phase PWM rectifier with active ripple energy storage [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(5): 1430-1443.
- [40] 王聪, 王浩, 白利军. 煤层气抽采机感应电机运行最优速度曲线控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 75-83.
WANG Cong, WANG Hao, BAI Lijun. Research on control strategy based on optimal speed curve of induction motor for CBM-well pumping units [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(11): 75-83.
- [41] 王聪, 王浩, 白利军. 直流微网供电煤层气抽采机协调运行策略研究[J]. 电力电子技术, 2016, 50(7): 63-65.
WANG Cong, WANG Hao, BAI Lijun. Research on strategy based on coordinated operation of beam pump unit in DC microgrid for coal bed methane extraction [J]. Power Electronics, 2016, 50(7): 63-65.
- [42] 肖晗, 叶志浩, 纪锋. 考虑电动机启动的舰船直流区域配电系统最大供电能力计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 1-10.
XIAO Han, YE Zhihao, JI Feng. Analysis and calculation of total supply capability of vessel DC zonal electric distribution system during motor start-up [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 1-10.
- [43] SALOMONSSON D, SODER L, SANNINO A. An adaptive control system for a DC microgrid for data centers [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 24(12): 165-170.
- [44] MING M, YANING Y, MINGWEI G, et al. A novel DC microgrid based on photovoltaic and traction power supply system [A]. 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific) [C]. Beijing, 2014: 1-4.
- [45] 王闪闪, 赵晋斌, 毛玲, 等. 基于电动汽车移动储能特性的直流微网控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 31-38.
WANG Shanshan, ZHAO Jinbin, MAO Ling, et al. A control strategy based on mobile energy storage characteristic of electric vehicles in DC micro-grid [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 31-38.