

低压直流配电网电压等级序列的经济性研讨

王建渊¹, 贾灵贤¹, 蒋琪², 蒋勃², 郝伟², 杨文字³, 张旭³

(1. 西安理工大学 电气工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 国网陕西省电力公司培训中心, 陕西 西安 710032; 3. 国网陕西省电力公司, 陕西 西安 710048)

摘要: 直流微网作为实现能源互联网的重要支持, 近年来发展迅速, 国内外也有很多在研的示范工程, 但是所研究的直流微网没有统一的配电网电压等级, 这影响了直流微网的进一步发展。参照交流电压等级序列的约束条件以及规则, 参考低压直流现有的电压等级序列的确定准则, 考虑到影响智能园区电压等级序列选择的特殊要素, 推荐了一组适用于智能园区直流配电网的电压等级序列, 并对电压等级序列的推荐值的经济性进行了分析和探讨。证明了所选取的低压直流电压等级序列的正确性和适用性。

关键词: 直流配电网; 电压等级序列; 智能园区

中图分类号: TM71 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd21542

Economic Study on Voltage Grade Sequence of Low Voltage DC Distribution Network

WANG Jianyuan¹, JIA Lingxian¹, JIANG Qi², JIANG Bo², HAO Wei², YANG Wenyu³, ZHANG Xu³

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China;
2. State Grid Shaanxi Electric Power Company Training Center, Xi'an 710032, Shaanxi, China;
3. State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

Abstract: As an important support of energy internet, DC microgrid has developed rapidly in recent years, and there are many projects researched at home and abroad. However, the DC microgrid does not have a general voltage level, which affects the further development of DC microgrid. The limitation factors and rules of the AC voltage level sequence were referenced, and the determination principle of the existing voltage level sequence of low voltage DC was also referenced, and considering the special factors affecting the selection of the voltage level sequence of the intelligent park, the voltage suitable for DC distribution network in intelligent park was given. Then the economics for the recommended value of the voltage rank sequence was analyzed and discussed. The correctness and applicability of the selected low voltage DC voltage level sequence were proved.

Key words: DC distribution network; voltage level sequence; intelligent park

随着分布式能源、储能以及直流负荷大批接入电网, 直流微网成为近年来的研究热点。因为电力电子技术的飞速发展, 直流输配电系统中的难题逐步得以攻克, 直流输配电的技术优势也已经逐步呈现^[1]。与交流配电网相比, 直流配电网能够显著地提高输配电的运行水平, 公共直流母线的接入使得大量的换流环节得以释放, 直流配电网还具有输配电成本低、损耗小以及不存在调节功角稳定、滤除电网谐波、解决三相不平衡这些交流电网的固有问题。直流配电网是将来电

网的发展趋向, 但仍有一系列问题急需解决。如断路器和限流器的开发, 指导直流配电网布局、建设和运行的理论和办法等。

规范直流电压等级序列是推进直流配电网发展的基础环节, 电压等级的选择一定要得到理论科学选择的支持。这样才能够合理地防止电压等级的混杂, 减少电力电子变换器的投入, 减少建设成本, 提高直流配电网运行效率和安全性, 避免产生损失和不利的影晌^[2]。

园区指规划建设配套设施齐全、布局合理的

建筑群,包含住宅小区、企业园区、教育园区、会展文化中心、工业园区、商业中心和政府建设等,2017年国内已经有120多万个园区。近年来,随着城市的智能化发展和国家政策的引导,园区经济发展迅速,呈现出产值集中、覆盖面不断扩大、国内生产总值(GDP)贡献占比加大的趋势。随着物联网、云计算、人工智能、边缘计算等新技术的急速发展和深化运用,园区智能化革新已成为将来发展的必然方向。园区信息化建设是必由之路,规范化经营使园区发展迅速。从智能中国的战略愿景到智能城市的结构设想,从智能建筑的微观实践到智能园区的产业协调,对智能商业运作的探索已经在行业热点上如火如荼地展开。

智能园区的概念也渗入了科技型、产业型和工业型产业领域,实现了运营信息化、数字智能化、服务平台化及社区移动化。其中关键技术包含智能交通、智能物联网设备以及智能园区建筑信息模型(building information modeling, BIM)技术应用。

物联网、云计算、5G、大数据、人工智能等现代技术的快速发展,为智能园区的建设和发展提供了强有力的技术保证。依照功用和需求,智能园区可分为高科技园区、物流园区、工业园区、软件园、文化园区、创业园区、综合园区等。

典型的智能园区建设可概括为基础设施建设、云服务平台建设(园区数据中心云计算)、智能应用系统建设、运营模式设计等。完善的基础设施层是智能园区建设的首要条件,也是园区信息化建设的硬件根底层。园区基础设施建设主要包含智能基础设施、园区信息基础设施、园区安全设施、园区消防设施、数据中心设施和公共基础设施、通讯网络设施。园区必须进行通讯网络的总体规划和总体设计,完成园区管理走廊、光纤网络、WiFi热点等的建设,以满足园区的基本通讯需求。智能园区的负荷需求丰富且多样。园区的智能化与数字化的升级使得升级后的智能园区成为了低压直流配电的典型应用场景,具体相关的负荷特性分析在文中的第2节涉及。

本文将剖析影响智能园区电压等级的要素,研讨并提出一种确定智能园区直流配电网电压等级序列的方法,并对确定电压等级序列进行评价和分析,从而验证选择的合理性和适用性。

1 影响智能园区电压等级的要素

本节将对影响直流配电电压等级的要素进

行探讨,为以后对直流配电电压等级的确定和评价的分析研讨提供依据^[1]。

1.1 内部要素

系统安全性和经济性是影响电压等级的内在要素。电力系统的安全稳定是电力系统运行的基本要求。虽然提高直流配电电压是为了降低电网的电压损耗和防止输电线路末端电压下降,是提高线路电压质量的有效途径。但是这同时也会导致对线路绝缘等级的高要求,从而导致设备成本投入加大、空间资源占用更多的问题^[3-4]。此外,较高的直流配电电压水平意味着线路上的负载也明显增加,故障发生的概率也会增加,故障时更多负荷会遭遇停电风险,因而配电电压等级不宜过高。从以上分析电压质量、电气绝缘、供电可靠性与电压等级的关系能够看出,这些都是影响电压等级的内在要素。

电网运行经济是判断直流电压等级选择是否合理的标准以及最终的目标。具体来说,电压等级的选择不但要保障系统的安全牢靠运行,而且要保证电能质量达到标准,提高发电效率和输电效率,降低线损。在直流配电网中,高电压能够提高线路的供电能力。因而我们希望在满足安全性的要求下,尽量提高直流电压水平,从而保证线路的供电能力和提高线路的传输距离^[5]。

因为直流配电系统规模大、投资大,投资经济性对直流配电网建设的影响至关重要。而投资经济性又和直流设备、线路及电能损耗费用息息相关。因而,投资经济性是影响电压水平的重要内部要素。

1.2 外部要素

随着经济的持续发展,电力需求持续增加,电力系统需要传输更多的容量。为了使电力满足国民经济发展的需求、减少系统损耗、提高用电效率,选择合适的电压等级发挥着十分重要的作用。所以,社会经济发展是影响配电电压水平的外部要素。

电力电子技术的发展影响着直流配电的推广和运用^[6],直流设备的研发技术决定了设备的额定参数和建设直流配电网的技术可行性。储能装置自身以直流方式工作,在低压配电网中,接入设备和控制技术都相对简单,主要用作应急电源、接入用户侧、增加备用容量、提高电能质量及供电可靠性。因而,电力电子技术、直流设备研发技术和储能技术的发展也是影响电压水平

的外部要素^[7]。

到2020年,分布式发电装机容量将大幅增加,分布式能源主要连接到配电网。未来20~50年间,配电网将会逐渐接纳大批的分布式能源发电和储能装置并网,它将分布式能源与微电网相结合,发展成为有源配电网。因为分布式能源(光伏、蓄电池、燃料电池、超级电容等)输出电能的形式为直流,所以应该选用合理的电压等级,为分布式电源的接入提供更便捷的配电环境。因而,电源也是影响电压水平的外部要素之一^[4,8]。

综上,用图1可视化影响电压水平的内、外部因素。

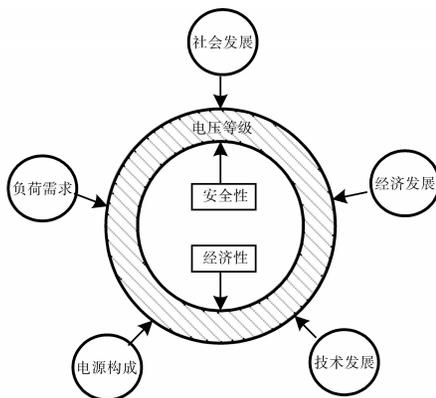


图1 电压等级影响要素示意图

Fig.1 Schematic diagram of voltage level influence factors

在国家电动汽车政策的鼎力支持下,电动汽车的数量在逐年增加。电动汽车作为直流负荷,将占据电力系统网络中直流负荷的很大一部分比例。其次,随着信息技术的不停发展和5G技术的战略部署,大批的微处理器、计算机、传感器、通讯设备和智能终端将耗费更多的直流电源能量^[9]。发光二极管(LED)作为节能的直流负荷也具有光明的发展前景。因而,须要充分考虑负荷的需要,制订合理的电压等级,以满足国家的用电需求。

2 智能园区低压直流配电电压等级研讨

2.1 智能园区低压直流配电网电压等级序列推荐值

智能园区的供电系统的电压等级须要满足不同的供电需求。因为我国的交流配电系统电压是220 V,直流设备,如加热设备和LED能够继续工作在220 V电压水平,而不需要辅助设备或者是进行设备本身的变动。因而,选取DC 220 V

能够继续满足原有设备的供电需求,节省了投入成本。若采用相电压的峰值DC 310 V进行直流配电,那么设备的改动也很小,而且,它能最大限度地兼容原电缆的绝缘等级,不需要对电缆进行升级,节省了大批量投资^[4,10]。

DC 380 V可用于向空调系统、加热系统、厨房和其他大型家用电器供电。且DC 380 V直流配电技术在这个世界上已有先例,欧洲电信标准协会建议数据中心和电动汽车的直流电压等级为DC 400 V。国内外专家学者建议将DC 380 V列为建筑供电系统直流电压等级。因而,我们应该协调国内和国际要素,能够选择DC 380 V作为一级供电等级^[11]。

从个人和设备安全的角度来看,DC 48 V不需要任何保护,甚至能够直接接触DC 48 V的带电部分,可以用于向小型家电供电。因为DC 48 V不但能够提高计算机等低压设备的供电安全性,还能够节省电源适配器。因而,它也是通讯部门使用的电压等级。使用这个电压等级能够直接使用一些支持设备,不需要进行设备更迭。

直流配电网依照母线数量能够分为单极性和双极性。单极性直流配电网只含有正、零2条母线,双极性微网含有正线、负线和零线3条母线。由于直流负载的种类繁多,因此所需要的供电电压也需要多种等级,采用双极性直流配电网能够满足比单极性更多的负荷对电压等级的需求,从而能够减少能量转化时的能量损耗^[12]。

综上所述,得到智能园区低压直流配电网电压等级序列的推荐值为 $\pm 48/110/220/310/380$ V。

2.2 推荐值的理论验证

电压等级的配置主要遵照“几何均值”原则^[12]。电网的运行需要效益最大化,既要满足电力系统安全可靠运行又要保证运行的综合费用最低。在两个标准电压 U_i 和 U_{i+1} 之间有一个经济带,因而,经济电压不必然等于标准电压。经济电压和标准电压存在“几何均值”关系^[2]。在相同的负荷密度、供电半径和电网结构下,相邻的两个标准电压能够是等效的经济电压。假如电压等级序列中的每一个电压值都是经济电压,就能满足配电网运行综合费用最低。

$$U_j = \sqrt{U_i U_{i+1}} \quad (1)$$

式中: U_j 为经济电压。

利用“几何均值”原则对本文给出的推荐值进行理论验证,验证图如图2所示。图2中,验证

过程呈现多层结构。位于底层的数值部分即为本文给出的推荐值,第2层的数值是推荐值利用“几何均值”得到的计算值,对比于第1层的推荐值,可以得到推荐值满足“几何均值”原则的结论。

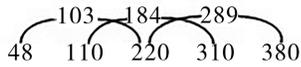


图2 “几何均值”验证图

Fig.2 Geometry mean verification chart

验证计算如下:

$$\sqrt{48 \times 220} = 103 \approx 110$$

$$\sqrt{110 \times 310} = 185 \approx 220$$

$$\sqrt{220 \times 380} = 289 \approx 310$$

验证结果表明,上文所确定的电压等级序列满足理论要求。推荐值中的每一个电压都近似等于经济电压,能够有效地降低电网运行的经济费用。

3 智能园区直流配电电压等级序列经济性评价

在确定电压等级序列后,依然需要通过必然的评价方法对直流配电电压等级进行综合评价。评价方法须要科学、一致、系统、独立、实用、适应性强,并结合直流配电网的特点。直流配电网电压等级的评价指标是可靠性、经济性和适应性,其中,可靠性评价指标主要有:换流站可靠性、直流配电线路可靠性;经济性评价指标有:运行经济性和建设投资经济性;适应性的评价指标有:负荷发展的适应性、电源接入的适应性、研发制造技术的适应性以及社会发展的适应性^[2]。鉴于篇幅的限制,本文主要通过经济性评价指标来评价所选直流配电网的电压等级。

已有文献对配电网中压等级进行经济性评估^[13],但是鲜有对低压等级经济性的评估,故本文将借鉴中压等级经济性评估的方法来对智能园区低压直流配电网电压等级序列进行经济性的评估。

3.1 供电物理模型

直流配电网络的设备主要包含变电站、换流站、电缆、断路器、变压器和逆变器。根据调研,低压配电网的常见负荷分类如下:低压直流负荷(供暖设备、白炽灯、供热系统、空调系统、厨房及其他大型家电、楼宇供电系统、数据中心和电动

汽车)与低压交流负荷两类。图3为低压配电网结构示意图。

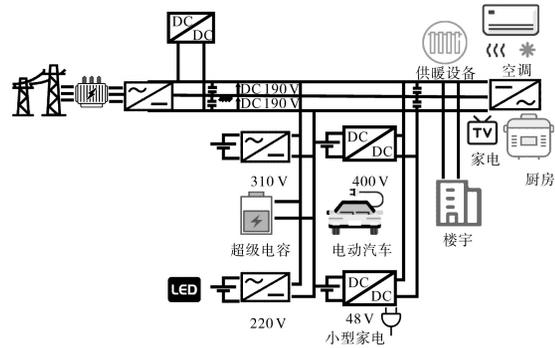


图3 低压配电网结构示意图

Fig.3 Low-voltage distribution network structure diagram

3.2 经济模型

建立配电网的经济模型,以单位负荷年度总成本为目标:

$$F = \frac{C + U}{P} \quad (2)$$

式中: F 为单位负荷年总成本; C 为施工成本; U 为年运行成本; P 为总负荷。

其中

$$C = qI = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} I \quad (3)$$

$$U = L + I_0 = L + k_Y I \quad (4)$$

$$P = \pi R^2 \sigma \quad (5)$$

综上,目标函数可表示为

$$F = \frac{C + U}{P} = \frac{qI + (L + k_Y I)}{\pi R^2 \sigma} = \frac{(q + k_Y)I + L}{\pi R^2 \sigma} \quad (6)$$

式中: q 为资金回收系数,依照国家财务法规 $q=1.0\sim 1.4$,本文取为1.1; I 为方案总投资; i 为折现率; n 为方案建设年限; L 为电能年损耗费用; I_0 为年运行维护费用,年运行维护费用依照总投资必然比例提取; k_Y 为提取比例,依照国家财务法规选取为1.5%; R 为圆形供电区域半径; σ 为负荷密度(单位 MW/km^2 ,以下省略)。

3.3 目标函数求解

求解目标函数需要确定低压直流配电方案总投资金额、电能年损耗费用、年运行维护费用、电网线路的供电区域半径以及负荷密度。

据文献[5]中分析,方案总投资包含:变电站本体投资、换流站本体投资以及直流配电线路建设投资。投资成本和变电站的容量成正相关的关系。直流配电容量值参考《T/CEC107—2016直流配电电压》标准,具体的传输容量和电压等级的关系见表1,直流配电传输容量计算的基准

环境温度依照+25 °C,最高允许温度依照+70 °C考虑。

表1 ±1 500 V至±110 V直流配电传输容量
Tab.1 ±1 500 V to ±110 V DC power distribution transmission capacity

电压等级/V	传输容量/kW
±1 500	500~2 000
±750	200~800
±380	80~300
±110	20~70

低压直流配电网的总投资金额、每年损耗的电能费用以及每年进行运行维护的费用均以陕西省西安市某智慧产业创业园的案例为参考。电网线路的供电区域半径和负荷密度按照《20 kV配电网规划与改造》在符合经济性的范围内进行选取。选取到合适值之后将确定的数值带入到目标函数中去,之后在Matlab中进行编程求解,单位负荷年总费用计算结果如图4所示。从图4中能够看出,随着低压等级的增加,负荷密度增加,说明线路带载能力增强;随着低压等级的增加,单位负荷运行的年总费用增加;随着负荷密度的增加,单位负荷运行的年总费用减少。17< σ <30时,48 V线路年总费用最小,110 V方案次之,220 V方案最差;30< σ <45时,110 V线路年总费用最小,220 V方案次之;60< σ <70时,310 V线路年总费用最小,380 V方案次之。

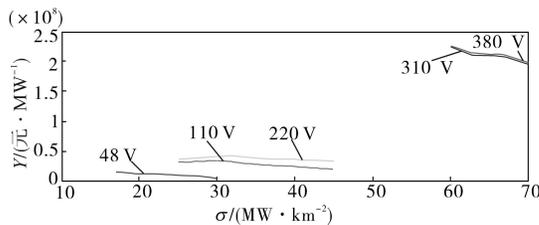


图4 各电压等级单位负荷年总费用
Fig.4 Total annual cost of each voltage level unit load

根据图4目标函数的求解结果来看,当25< σ <30时,48 V,110 V,220 V 3种电压等级的单位负荷年运行总费用不同;30< σ <45时,110 V,220 V的单位负荷年运行总费用不同;60< σ <75时,310 V,380 V的单位负荷年运行总费用不同。因而,25< σ <30时,以48 V方案的单位负荷年运行费用为基准,计算其与110 V,220 V方案费用的差值,如图5所示。

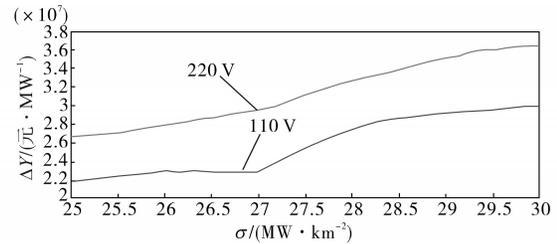


图5 不同电压等级单位负荷年运行费用差
Fig.5 Annual operating cost difference for unit load of different voltage levels

随着 σ 的变化,110 V与48 V方案的年费用差值在 $\sigma=27$ 时最大,110 V与48 V方案的年费用差值随着 σ 的增加而平稳增加;30< σ <45时,以110 V方案的单位负荷年运行费用为基准,计算其与220 V方案费用的差值,如图6所示,220 V与110 V方案的年费用差值随着 σ 的增加而平稳增加;60< σ <70时,以310 V方案的单位负荷年运行费用为基准,计算其与380 V方案费用的差值,如图7所示:380 V与310 V方案的年费用差值随着 σ 增加而平稳增加。

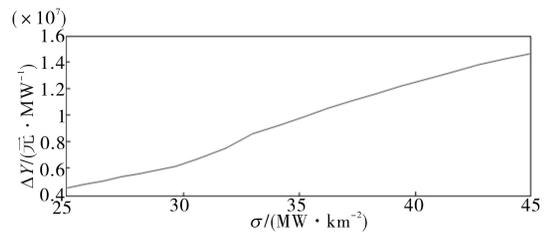


图6 220 V和110 V单位负荷年运行费用差
Fig.6 Annual operating cost difference of 220 V and 110 V unit load

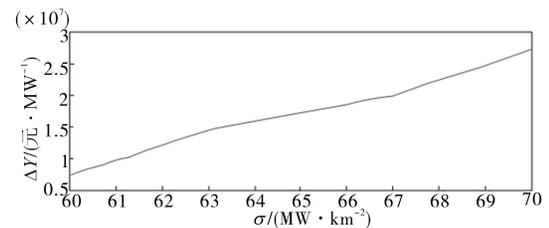


图7 380 V和310 V单位负荷年运行费用差
Fig.7 Annual operating cost difference of 380 V and 310 V unit load

4 结论

本文在智能园区物理模型的基础上,于Matlab中建立了其经济数学模型,以单位负荷年度总成本最低为目标进行求解。由所得到的结果可知:在10< σ <70的范围内,低压等级的配电网具有较高的经济效益,具有很大的应用前景。

(下转第75页)

5 结论

文章在能源互联网背景下,提出将共享储能与园区微网结合的模式框架,主要讨论“源-网-荷-储”的能量优化运行,将减少运营成本,为园区微网的发展以及提高分布式电源的利用率提供了思路。

在模型的构建以及优化的方式、算法上,还存在以下几个问题:

1)涉及到负荷的多样性,文章在这方面构建的模型略简单,考虑到的问题不完善。

2)文章只是在电能一种能源的优化上进行了讨论,对于能源互联网应该是多种能源合理运用,如热(冷)能的运用,这样才能做到能源最大化利用。

电力作为现阶段用户用能的最主要来源,它能够将能源供应侧与需求侧连接起来,而“源-网-荷-储”运营模式则可将能源互联网扩大化,形成泛在物联的新模式。

参考文献

- [1] FREEDM Systems Center. Project factsheet: green energy hub [EB/OL]. (2014-04-16) [2015-08-19]. <http://www.freedm.ncsu.edu/index.php?s=3&p=439&i=159>
- [2] E-Energy. Smart grids for Germany, Austria and Switzerland [EB/OL]. (2014-10-11) [2015-08-19]. <http://www.e-energy.de/en/1247.php>

~~~~~  
(上接第69页)

### 参考文献

- [1] 董密,张心露,杨建,等. 孤岛模式下多源直流微电网经济运行的协调优化控制策略[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(5): 51-58.
- [2] 蔡瀛森. 直流配电电压等级影响因素与评价指标研究[D]. 北京:华北电力大学, 2014.
- [3] 许阔,蔡冰倩,朱永强,等. 海岛直流微电网电压等级序列选择的研究[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(1): 52-58.
- [4] 蔡冰倩,贾利虎,朱永强,等. 直流微电网电压等级序列选择的影响因素研究[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(12): 45-51.
- [5] 杨琪羽. 适应未来发展的直流配电电压等级序列研究[D]. 北京:华北电力大学, 2014.
- [6] 段建东,魏朝阳,周一,等. 未来直流配电网电压等级序列研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(12): 3538-3545.

- [3] Mehleri E, Sarimneis H, Markatos N, *et al.* A mathematical programming approach for optimal design of distributed energy systems at the neighborhood level[J]. Energy, 2012, 44: 96-104.
- [4] 刘敦楠,徐尔丰,许小峰. 面向园区微网的“源-网-荷-储”一体化运营模式[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 681-689.
- [5] 刘涤尘,马恒瑞,王波,等. 含冷热电联供及储能的区域综合能源系统运行优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 113-120, 141.
- [6] 王成山,武震,李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
- [7] Reza Aboli, Maryam Ramezani, Hamid Falaghi. Joint optimization of day-ahead and uncertain near real-time operation of microgrids[J]. IEEE, Electrical Power and Energy Systems, 2019, 107: 34-46.
- [8] 甘霖,陈瑜玮,刘育权,等. 含可再生能源的微网冷-热-电多能流协同优化与案例分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 275-281.
- [9] 王仕俊,平常,薛国斌. 考虑共享储能的社区综合能源系统协同优化研究[J]. 中国电力, 2018, 51(8): 77-84.
- [10] Massaeli M, Javadian S A M, Khalesi N. Environmental benefits of DGs and comparing their generation costs with thermal power plants considering production pollution on human health [C]//International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Malaga, Spain: IEEE, 2011: 1-6.
- [11] 刘方,杨秀,时珊珊,等. 考虑不确定因素下含充换储一体化电站的微网能量优化[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 669-676.
- [12] 米阳,李战强,吴彦伟,等. 基于两级需求响应的并网微电网双层优化调度[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1900-1905.

收稿日期:2020-02-06

修改稿日期:2020-04-21

- [7] 李莎. 直流配电网电压等级序列研究[D]. 杭州:浙江大学, 2017.
- [8] 刘梦婷. 城市低压直流配电网的架构研究[D]. 北京:华北电力大学, 2016.
- [9] 江晨. 直流微网中DC/DC变换器并联技术研究[D]. 北京:北京交通大学, 2016.
- [10] 黄双萍. 基于级联型电力电子变压器的楼宇微网研究[D]. 长沙:湖南大学, 2016.
- [11] 张祖平,刘思革,梁惠施. 电力储能技术在不同电压等级配电网中的应用[J]. 供用电, 2012, 29(1): 1-4.
- [12] 陈艳芳. 20 kV单相配电系统研讨[D]. 北京:北京交通大学, 2011.
- [13] 程杰,向铁元,张贺,等. 20 kV电压等级经济性比较论证[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(5): 125-130.

收稿日期:2020-02-28

修改稿日期:2020-04-28