

多电压等级直流供电在模块化数据中心的应用

庄岭¹,李叶飞²,杨斌¹,郑海雁²,杜先波²

(1. 国网江苏省电力有限公司,南京 211106;2. 江苏方天电力技术有限公司,南京 210000)

Applications of multi-voltage grade DC power supply in modular data centers

ZHUANG Ling¹, LI Yefei², YANG Bin¹, ZHENG Haiyan², DU Xianbo²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 2. Jiangsu Fangtian Electric Power Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

摘要:随着直流供电相关技术的发展与成熟,直流供电模式在可靠性、经济性等方面都展现了优于交流供电模式的潜力,成为了当前数据中心建设与改造的重要方向。然而在中国,直流数据中心的电压等级仍未形成统一的标准。基于目前的多站融合新模式提出了一种混合供电架构以及评估方法,从线损、可靠性、升级潜力、设备制造水平、负荷需求等多个方面对3种直流供电架构进行了综合对比,对比结果证明了所提混合通信架构综合性能的先进性。提出的研究方法及结论对于直流数据中心电压等级的标准化以及目前多站融合新模式的建设有重要的参考意义。

关键词:高压直流;数据中心;多站融合;电压等级

Abstract: With the development and maturity of direct current (DC) power supply technologies, DC power supply mode has shown its potential to be superior to AC power supply mode in terms of reliability and economy, and has become an important direction for construction and renovation of current data centers. However, in China, there is still no unified standard for voltage level of DC data centers. A reasonable framework and a evaluation method based on the current new mode of multi-station integration are put forward. Comprehensive comparison has been carried out from aspects of line loss, reliability, upgrade potential, equipment manufacturing level and load demand of the three DC power supply frameworks. Based on the comparison results, the advanced comprehensive performance of the proposed hybrid communication architecture is proved. The research methods and conclusions proposed have important reference significance for the standardization of voltage level of DC data center and the construction of new mode of multi-station fusion.

Key words: high voltage direct current; data center; multi-station integration; voltage level

0 引言

数据中心承担着实现电力调配以及数据共享等关键任务^[1],在探索“多站融合”新模式、优化综合能源服务、构建能源网络中起着不可替代的作用。为了应对新时代节能环保的要求,亟需对数据中心的供电架构展开进一步优化探索。目前数据中心的供电架构主要分为电网直供系统、交流不间断电源(uninterruptible power supply, UPS)供电系统以及直流供电系统^[2-3],以往的研究主要对直流、交流供电模式的优缺点进行分析^[4-6],但针对直流供电模式的具体电压等级并未形成统一标准。目前中国国内通信行业直流供电模式的电压等级主要分为240 V与48 V 2种。48 V直流配电架构已在电信行业进行应用^[7],国际上诸如谷歌、Facebook等也采用该类数据中心^[8]。240 V高压直流供电系列,在腾讯、阿里巴

巴等公司的数据中心中得到了广泛应用,中国通常采用240 V作为高压直流数据中心通用标准。目前针对240 V和48 V电压等级的研究多为试点性的建设与探索,尚未形成明确的综合性对比。

本文从线损^[9-10]、负荷需求、可靠性^[11]、升级潜力^[12]、成本等方面对3种数据中心直流架构进行评估,首先介绍了对目前数据中心典型直流系统架构,并且基于目前多站融合的架构提出了一种混合供电架构;继而从优质性、可靠性、经济性等方面提出直流架构评估方法;最后,从线损、负荷需求、可靠性、升级潜力、成本等多个方面对3种供电模式进行了对比和分析,并对3种架构进行层次分析和综合分析。

1 直流系统架构

1.1 数据中心典型直流系统架构

数据中心的电力消耗设备主要有空调设备、照明设备、消防设备以及信息技术(information technology, IT)设备。伴随着数据中心的迅速发展,数据中心机

收稿日期:2020-11-24;修回日期:2021-01-20

基金项目:国家电网公司科技项目(J2020087)

柜密度迅速提高^[13],亟需优化供电结构^[14],提高能效。

模块化与标准化是当前数据中心发展的重要趋势。标准的电压等级对数据中心的前期建设、使用期维修、后期扩容有着显著意义。直流系统典型架构如图1所示,一般直流系统存在多回路冗余架构。直流系统前端接入交流电,油机电作为备用。交流电经过变压模块,利用变压器将高压或特高压输入交流电转换为低压送入整流模块,利用整流模块实现交直流转换、功率因数校正、滤波、隔离等功能。最后一级为服务器模块,服务器主板的服务器电源装置(power supply unit, PSU),负责将送入的直流电转换成12 V等电压等级的直流电,给服务器主板供电。48 V直流系统架构与240 V总体相似,差异在于整流后电压等级差异。

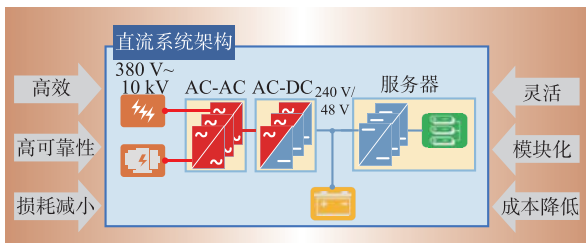


图1 直流供电架构

Fig. 1 DC power supply framework

1.2 数据中心直流供电混合架构

随着多站融合、直流微网^[15]等新技术的研究与实践,数据中心逐渐参与到备用、柔性响应等电力调控业务^[16-17]。240 V数据中心可通过一级直流变换完成对直流微网的接入,48 V则需多级变换完成。

240 V近服务器侧的高电压对绝缘、电磁屏蔽、运维等有更高的要求,48 V方案广泛用于IT设施侧。结合高压和低压配电的优势,本文提出一种混合配电架构,将240 V作为中间级电压,基础设施侧运用240 V配电,在服务器侧前端将240 V直流电转换成48 V直流,如图2所示。该混合架构与传统直流48 V的架构的区别在于,基础设施采用电压等级不同,混合架构基础设施侧采取240 V全直流配电,例如空调系统、照明系统等。该混合架构与传统240 V直流架构的区别在于,混合架构服务器侧采用48 V接入而非240 V直接接入。

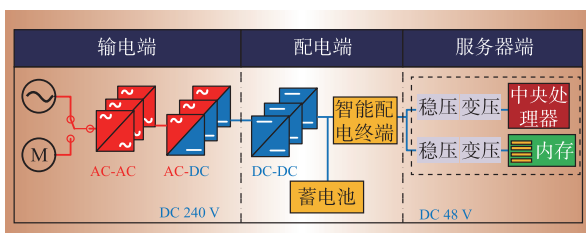


图2 多电压等级融合体系架构

Fig. 2 Multi-voltage level fusion framework

2 直流架构评估方法

从优质性、可靠性、经济性3个维度进行240 V、48 V以及混合架构的综合对比。其中优质性的指标集主要反映系统潜力,由线损、负荷需求、效率、升级潜力组成;可靠性指标集主要反映系统的可靠性,由储能系统可靠性、其他元件的可用性组成;经济性主要反映成本,由线缆成本、建设成本、维护成本组成,如图3所示。

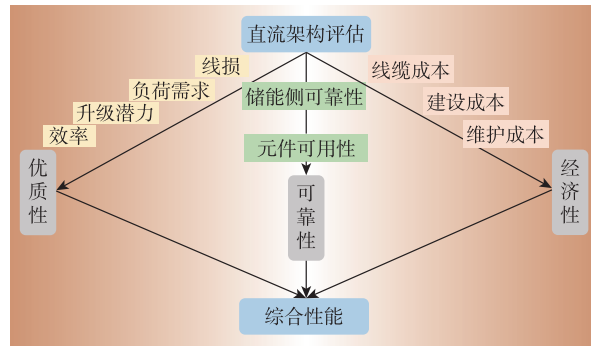


图3 直流架构评估体系

Fig. 3 Evaluation system of DC framework

2.1 优质性

2.1.1 线损

服务器机柜密度增大带来的功率提升,对数据中心供电环节能量承担能力提出了更高要求。本节从线路损耗的角度对240 V与48 V的供电效率进行研究。

线路允许功率的计算公式如下

$$P = \Delta V(E - \Delta V) / (r \cdot l) \quad (1)$$

式中: P 为功率; ΔV 为允许的压降; E 为供电电压; r 为每个线缆单位长度的电阻; l 为线路长度。

直流线路损耗由式(2)给出^[18]

$$P_{\text{Dloss}} / P'_0 = 0.036 J l / U_{\text{DC}} \quad (2)$$

式中: P_{Dloss} 为直流电缆的有功损耗; P'_0 为电缆的末端输送功率; J 为电流密度, A/mm^2 ; l 为线路长度; U_{DC} 为直流线电压。

2.1.2 负荷需求

负荷需求的量化方法主要从安全(Z_1)、绝缘水平(Z_2)、电磁抗干扰能力(Z_3)、以及断路器的带载切断能力(Z_4)等方面综合考虑。具体分数由对比得出最终得分经过标么化处理,得到的最终指标为

$$H_m = \frac{\sum_{j=1}^n \lambda Z_j}{Z} \quad (3)$$

式中: λ 为指标优势权重; Z_j 为得分; Z 为基准值。

2.1.3 升级潜力

升级势力量化主要从设备制造水平(Z_1)、接入潜力(Z_2)、市场成熟度(Z_3)等方面综合考虑。

2.2 可靠性

2.2.1 储能系统

(1) 连接方式

直流系统可靠性主要受器件的连接方式、系统元件的可用率,以及设备的寿命损耗率。从图1、图2可知,几种直流供电架构连接方式的差异集中在储能侧,显著影响系统可靠性水平,计算公式为

$$R = 1 - (1 - r^x)^y \quad (4)$$

式中: R 为系统可靠性水平; r 为单个元器件的可靠性指标; x 为并联组数; y 为串联个数。

(2) 寿命

储能设备的寿命损耗率反映储能设备的使用情况,计算公式为

$$\mu_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^{N_i} \frac{N_i}{N_0^2} \times 100\% \quad (5)$$

式中: N_i 为第 i 次充放电时折算到满充放下的最大循环次数; N_0 为满充放下的最大循环次数; N_i 为已完成充放电次数。

2.2.2 元件可用性

供电架构的可靠性评估也包括了电气元件可靠性分析,直流架构中元件的可用率计算公式

$$\text{Availability} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (6)$$

式中: $MTBF$ 为设备的运行时间; $MTTR$ 为设备故障时间。

2.3 经济性

2.3.1 线缆铺设成本

线缆价格计算公式如下

$$C = \rho \cdot s \cdot l \cdot C_{\text{Cu}} + C_{\text{P}} + C_{\text{OT}} \quad (7)$$

式中: ρ 为铜的密度; s 为线缆尺寸; l 为铺设长度; C_{Cu} 为单位重量铜的价格; C_{P} 为铠装材料的价格; C_{OT} 为其他价格,例如:人工费。

2.3.2 建设成本

建设成本为各设备造价之和,即

$$C_1 = \sum_{i=1}^n K_{\text{con},i} \quad (8)$$

式中: $K_{\text{con},i}$ 为各设备造价; n 为设备总数。

2.3.3 维护成本

维护成本主要考虑运行维护时产生的各项费用,包括水电、人工、网络通信、管理、保险、维修等,一般是根据工程经验所得。

3 直流架构评估分析

为验证本文所提混合架构的有效性,基于所提的直流架构评估方法,搭建仿真模型,在仿真系统

上从优质性、可靠性、经济性等方面对3种架构的性能进行对比分析。

3.1 优质性分析

3.1.1 线损分析

假设所允许的传输功率损失为2%,如图4所示,在相同的功率损失限制下,相同传输距离下240 V所需线缆半径约为48 V的1/10,240 V在能量传输效率上明显优于48 V。

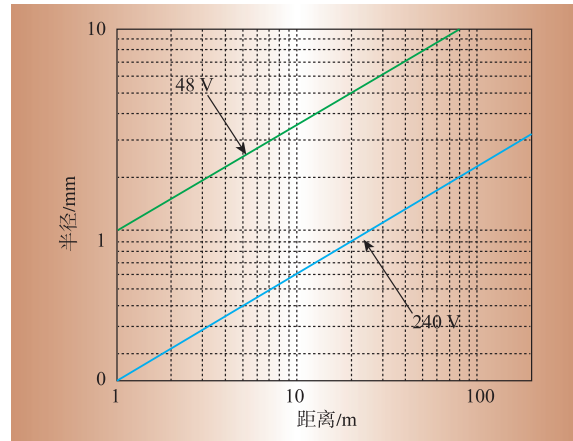


图4 相同传输容量下不同电压等级线缆耗材对比

Fig. 4 Comparison of cable consumables of different voltage grades under the same transmission capacity

假定负载为50 kW,传输距离为50 m,2种电压等级所需导线尺寸(理论计算情形)如表1所示。

表1 不同电压等级下的导线所需尺寸

Table 1 Required cable dimensions of different voltage levels

电压/V	电流/A	电缆尺寸/mm ²
48	1 041.66	986
240	210.44	40

设定混合架构的240 V-48 V DC-DC变换器在服务器机柜内部,由此得到单条线路损耗比值如表2所示,240 V的线路损耗最小,混合架构其次,48 V线路损耗最大。随着线缆条数增多,输出功率的增加,不同架构的线路损耗差异会成倍增加,损耗的差异会更加明显。

表2 单条线路损耗比值

Table 2 Single line loss ratio

架构类型	48 V	240 V	混合架构
单条线路损耗比值	0.039 61	0.039 45	0.039 47

3.1.2 负荷需求分析

假定负荷需求中,混合系统架构服务器设备侧电磁抗干扰能力与48 V一致,而在服务器前端的断路器的带载切断能力与240 V架构一致,得到的最

终指标如表3所示,其中直流48 V架构的负荷需求指标值最高,混合架构其次,240 V架构最低。

表3 负荷需求指标
Table 3 Load demand indicator

架构类型	48 V	240 V	混合架构
负荷需求指标	7.27	6.41	6.83

3.1.3 升级潜力分析

随着能源互联网的推进,数据中心逐渐呈现出迎合广泛、灵活接入与调控的负荷发展需求。240 V与交流电压220 V电压等级类似,两者的多数供电设备经过稍加改造即可通用,在数据中心布局、运维、人员培训等方面都有着可转移借鉴的潜力。此外,风能、太阳能等可再生能源的电压等级多为750 V或480 V,240 V可直接通过增加中性点等方式直接接入相应系统,节省大量的变换环节。

48 V已形成完整的产业生态,在服务器电源模块已研发出无需前级PSU,48 V直流电直接送入中央处理器(central processing unit,CPU)的电源架构,将48 V直流电转换成CPU需求的直流电,减少供电环节损耗。

考虑到电压降、电缆的允许电流、功耗、供电距离,240 V系统适用于除信息通信技术(information and communication,ICT)以外的行业,图5列出了功耗距离的关系,240 V系统应用行业相较于48 V系统更广泛,48 V直流系统在低功耗系统也有其独特优势,混合架构囊括了这些优势。

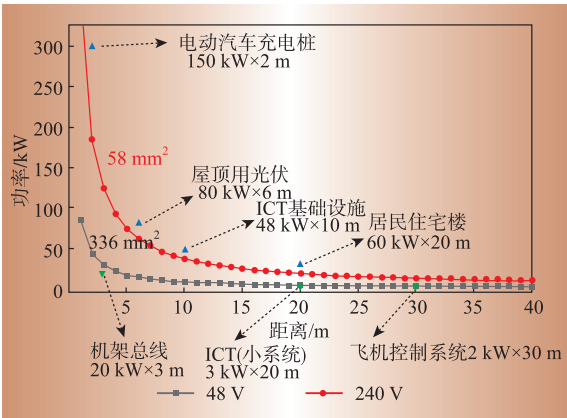


图5 升级潜力对比
Fig. 5 Comparison of upgrade potential

3.2 可靠性分析

3.2.1 储能侧可靠性分析

目前大部分数据中心的主流储能系统以多路铅酸蓄电池冗余配置为主。假设单个铅酸蓄电池的电压等级为2 V,不考虑电池的浮充和放电,理想情况下,48 V直流配电系统需串联24个铅酸蓄电池,240 V需要串联120个。假设单个2 V的铅酸蓄

电池单元的可靠性 $r=0.99$,为达到可靠性99.999%要求,需要48 V直流配电系统并联8组,240 V并联33组。240 V直流系统需要更多的蓄电池来达到规定的可靠性水平。240 V直流电池系统的储能系统建设成本、寿命损耗、复杂度以及维护困难度都高于48 V直流配电系统。

3.2.2 元件可用性分析

根据直流架构中元件串并联关系如图6所示,相较于典型直流架构,混合架构增设了240 V-48 V直流变换器。根据表4可计算出元件可用性^[19]。

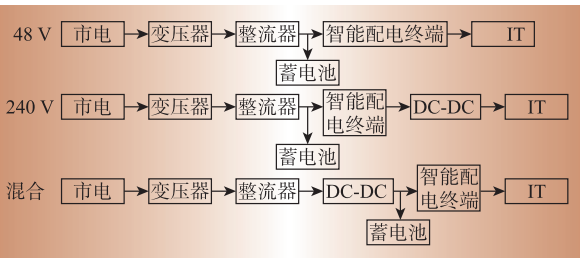


图6 供电架构元件组成
Fig. 6 Components of power supply framework

表4 单体设备或元件的可靠性参数

Table 4 Reliability parameters of singular equipment or component

h		
设备	设备运行时间	设备故障时间
市电	8.03×10^3	5
断路器	1.00×10^6	2
整流器	2.00×10^4	2
DC-DC变换器	5.00×10^4	2
蓄电池	2.40×10^5	8
变压器	7.80×10^6	6
智能配电终端	4.38×10^6	4

考虑到240 V和混合架构中的直流断路器的设备制造水平,假设240 V架构以及混合架构的可靠性下降0.01%,得到结果如表5所示,48 V元件可用性最高,240 V架构其次,混合架构最低。

表5 元件可用性

Table 5 Component availability

架构类型	48 V	240 V	混合架构
元件可用性	0.999 277 026	0.998 277 748	0.998 237 819

3.3 经济性分析

假定数据中心容量为200 kW,供电系统主体由一架交流配电屏,一架直流分配屏,2架直流变换设备,2架直流列头柜,16架服务器机柜组成,混合架构需增设240 V-48 V直流变换器。根据工程经验,以及表6中直流架构产品费用估算,考虑产品的容量、市场成熟度以及定制化需求,计算时将各直流架构设备费用增加或降低一定的百分比。

表6 直流供电架构费用估算表

Table 6 Cost estimate of DC power supply framework

设备	单价
交流分配屏/(万元·台 ⁻¹)	10.00
列头柜/(万元·台 ⁻¹)	10.00
配电箱/(万元·台 ⁻¹)	3.80
柴油发电机以及系统柜/(万元·台 ⁻¹)	390.00
油罐以及供油系统/(万元·项 ⁻¹)	180.00
变压器/(万元·台 ⁻¹)	32.00
直流屏/(万元·台 ⁻¹)	10.00
蓄电池/(万元·块 ⁻¹)	0.32
整流机架/(万元·台 ⁻¹)	5.80

计算成本如图7所示,只考虑直流供电系统主体,从建设成本来看,240 V直流架构偏高,48 V直流架构较低,混合架构居中;从线缆成本上来看,48 V直流架构较高,240 V直流架构和混合架构偏低;从维护成本来看,混合架构成本较高,48 V成本较低,而240 V架构成本居中。

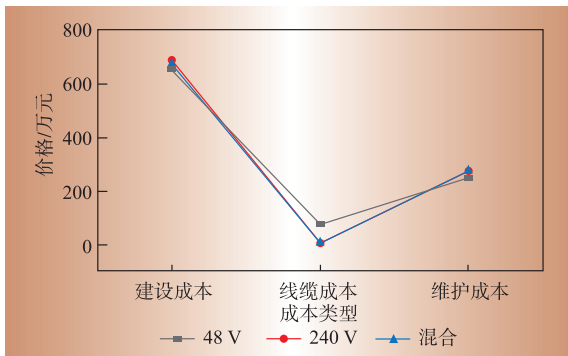


图7 3种供电架构成本对比

Fig. 7 Cost comparison of three power supply frameworks

3.4 直流架构综合性能分析

根据表7中各直流架构的指标值,应用环比分析(decision alternative ratia evaluation system, DARE)^[20]综合评价方法计算各架构层次评价结果及综合评价结果,DARE法根据经验将相邻指标综合对比得出重要性暂定系数,接着进行重要性修正,将最后一个修正系数定为1,进行归一化处理,算出指标权重。归一化方程为

$$U_m = \frac{Y_i}{\sum_{i=1} Y_i} \quad (10)$$

基于直流架构的评估结果差异程度各直流架构进行打分,满分为10分。3种架构的评估结果如表7和图8所示。

由于直流系统的相似性,3种架构最后评估得到的经济性指标并没有较大差异。

(1) 混合架构综合性能评价最优,其优质性高于48 V供电架构,可靠性高于240 V供电架构,在保证可

表7 3种供电架构优势对比

Table 7 Comparison of the advantages of three power supply frameworks

指标集	权重	指标值		
		48 V	240 V	混合
优质性	负荷需求	0.045	0.405	0.360
	线损	0.092	0.644	0.874
	效率	0.137	1.165	1.302
可靠性	升级潜力	0.045	0.315	0.405
	储能连接	0.136	1.224	0.952
	储能寿命	0.045	0.405	0.360
经济性	元件可用性	0.136	1.224	1.183
	线缆成本	0.091	0.637	0.865
	建设成本	0.182	1.547	1.365
	维护成本	0.091	0.819	0.774
综合指标		8.385	8.439	8.452

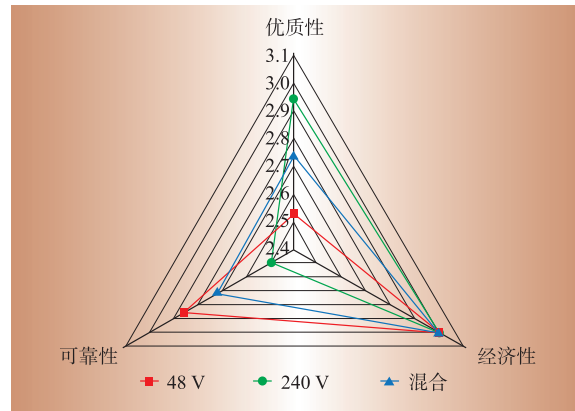


图8 3种供电架构评估结果

Fig. 8 Evaluation results of three power supply frameworks

靠性的同时也拥有较为出色的升级潜力及供电质量。

(2) 240 V的综合性能排名居中,其优质性评分最高,240 V系统更加高效、升级潜力更优,但240 V直流供电架构的可靠性表现最差。

(3) 48 V综合性能排名最低,但其可靠性方面最具有优势,后期也更好维护,升级潜力较差。

4 结束语

本文从线损、负荷需求、可靠性、升级潜力、成本等方面对3种数据中心直流架构进行评估:

(1) 240 V直流架构优质性指标值最高,潜力最大,240 V可作为基础侧电压,拥有线路损耗小、传输功率高等优点。有利于与分布式能源、储能站等直流对象对接,促进资源深度融合共享。

(2) 48 V直流架构的可靠性指标值最高,可作为通信设备侧电压,拥有对通信设备干扰小、可靠性高、安全性好等优势。将48 V作为配电侧集中电压有利于减少电能变换器数量,节省空间及成本。

(3) 240 V输电与48 V配电结合的混合直流供电架构综合性能最优,保证可靠性的同时也拥有较

为出色的升级潜力。

本文研究对建立规范化数据中心电压标准、促进直流相关产品商业化与成熟化有一定参考价值。D

参考文献:

- [1] 周伏秋,谷立静,孟辉.数据中心节能和优化布局研究[J].电力需求侧管理,2011,13(3):1-3.
ZHOU Fuqiu, GU Lijing, MENG Hui. Power supply and distribution scheme of fault tolerant data center[J]. Power Demand Side Management, 2011, 13(3): 1-3.
- [2] 张玮.某容错级数据中心的供电方案[J].电力需求侧管理,2014,16(2):45-48.
ZHANG Wei. Power supply and distribution scheme of fault tolerant data center[J]. Power Demand Side Management, 2014, 16(2): 45-48.
- [3] 杨玲,王丽.数据中心IT设备供电系统方案探讨[J].通信电源技术,2019,36(11):189-192.
YANG Ling, WANG Li. Discussion on power supply system of IT equipment in data center[J]. Telecom Power Technology, 2019, 36(11): 189-192.
- [4] TALAPKO D. Telecom datacenter power infrastructure availability comparison of DC and AC UPS[C]//Intelec 2012. September 30, 2012, Scottsdale, AZ, United States: 1-5.
- [5] TANAKA T, MATSUMORI H, HANAOKA N, et al. The HVDC power supply system implementation in NTT group and next generation power supply system[C]//2014 IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC). September 28, 2014, Vancouver, BC, Canada: 1-6.
- [6] 董浩.数据中心高压直流UPS供电系统研究[J].通信电源技术,2020,37(11):14-16.
DONG Hao. Research on high voltage DC UPS power supply system in data center[J]. Telecom Power Technology, 2020, 37(11): 14-16.
- [7] 李昭桦.变电站-48 V电力通信直流电源系统扩容安全性分析[J].信息通信,2020(7):199-201.
LI Zhao-hua. Safety analysis of substation -48 V power communication DC power system expansion[J]. Information & Communications, 2020(7): 199-201.
- [8] 李典林,陈历忠.48 V架构在数据中心的崛起——记谷歌数据中心供电能效发展之路[J].电子产品世界,2016,23(7):79.
LI Dianlin, CHEN Lizhong. The rise of 48 V architecture in data center: the road to energy efficiency development of Google data center[J]. Electronic Engineering & Product World, 2016, 23(7): 79.
- [9] TANAKA T, HANAOKA N, TAKAHASHI A, et al. Concept of new power supply system topology using 380 V and 48 V DC bus for future datacenters and telecommunication buildings[C]//2015 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC). October 18, 2015, Osaka, Japan: 1-6.
- [10] LISY S M, SONNENBERG B J, DOLAN J. Case study of deployment of 400 V DC power with 400 V/-48 V DC conversion[C]//2014 IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC). September 18, 2014, Vancouver, BC, Canada: 1-6.
- [11] PAN S, WANG C, JAIN P. Structure and implementation of a hybrid 48 V/380 V DC UPS for IT datacenters[C]//2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). September 23, 2018, Portland, OR, United States: 3 851-3 856.
- [12] LAZZARIN T B, BHARATIRAJA C, LEHMAN B. Direct 48 V to 1 V step-down DC-DC converter[C]//2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). December 18, 2018, Chennai, India: 1-6.
- [13] TANAKA T, HIROSE K, MARQUET D, et al. Analysis of wiring design for 380 V DC power distribution system at telecommunication sites[C]//Intelec 2012. September 30, 2012, Scottsdale, AZ, United States: 1-5.
- [14] 韦涛,张伟,崔艳娟,等.直流配电系统典型供用电模式研究[J].供用电,2020,37(10):10-15.
WEI Tao, ZHANG Wei, CUI Yanyan, et al. Research on typical power supply and consumption mode of DC distribution system[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(10): 10-15.
- [15] 于国星,宋蕙慧,侯睿,等.柔性直流互联孤岛微网群的分布式频率协同控制[J].电力系统自动化,2020,44(20):103-111.
YU Guoxing, SONG Huihui, HOU Rui, et al. Distributed cooperative frequency control for flexible DC interconnected island microgrid cluster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 103-111.
- [16] 黄强,陈亮,袁晓冬,等.多端直流配电系统工程仿真分析及示范应用[J].供用电,2018,35(6):24-32,82.
HUANG Qiang, CHEN Liang, YUAN Xiaodong, et al. Multi-terminal DC distribution system engineering simulation analysis and demonstration application[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(6): 24-32, 82.
- [17] 蔡志文,曾光辉,刘伟斌,等.面向数据中心的交直流混合配电网示范工程[J].供用电,2020,37(10):35-43,50.
CAI Zhiwen, ZENG Guanghui, LIU Weibin, et al. Demonstration project of AC-DC hybrid distribution network for data center[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(10): 35-43, 50.
- [18] 郑欢,江道灼,杜翼.交流配电网与直流配电网的经济性比较[J].电网技术,2013,37(12):3 368-3 374.
ZHENG Huan, JIANG Daozhuo, DU Yi. Economic comparison of AC and DC distribution system[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3 368-3 374.
- [19] SHRESTHA B R, TAMRAKAR U, HANSEN T M, et al. Efficiency and reliability analyses of AC and 380 V DC distribution in data centers[J]. IEEE Access, 2018, 6: 63 305-63 315.
- [20] 卫泽晨,赵凤展,王佳慧,等.网格化中低压智能配电网评价指标体系与方法[J].电网技术,2016,40(1): 249-255.
WEI Zechen, ZHAO Fengzhan, WANG Jiahui, et al. Gridding evaluation index system and method of MV and LV intelligent distribution network[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 249-255.

作者简介:

庄岭(1973),男,江苏徐州人,高级工程师,研究方向为信息技术、数据中心、网络安全等。

(责任编辑 徐文红 赵雨昕)