

9-14-2020

Optimization scheme of AC / DC distribution network considering voltage sags

Fei LI

Shenzhen Power Supply Bureau Co , Ltd , Shenzhen 518000 , China

Zhiyu ZHENG

Shenzhen Power Supply Bureau Co , Ltd , Shenzhen 518000 , China

Zhaocheng ZHANG

Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240 , China

Qian AI

Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240 , China

Chong CAI

Shenzhen Power Supply Bureau Co , Ltd , Shenzhen 518000 , China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

LI, Fei; ZHENG, Zhiyu; ZHANG, Zhaocheng; AI, Qian; CAI, Chong; and LI, Yaqian (2020) "Optimization scheme of AC / DC distribution network considering voltage sags," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 35: Iss. 3, Article 16.

DOI: 10.19781/j.issn.16739140.2020.03.016

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol35/iss3/16>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

Optimization scheme of AC / DC distribution network considering voltage sags

Authors

Fei LI, Zhiyu ZHENG, Zhaocheng ZHANG, Qian AI, Chong CAI, and Yaqian LI

考虑电压暂降影响的交直流配网优选

李 飞¹, 郑志宇¹, 张昭丞², 艾 芊², 蔡 翀¹, 李雅倩¹

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 上海交通大学电气系, 上海 200240)

摘 要: 直流配网作为一种新型的配电结构, 适用场景的规划需要与交流配网进行可靠性、经济性的详尽对比。考虑到近年来电压暂降问题越发突出, 首先研究直流配电网在缓解敏感用户电压暂降问题中的作用。以此为基础, 综合考虑经济性和可靠性, 建立交直流配电网的全生命周期成本模型, 结果表明, 在直流负荷占比 50% 的情况下, 尽管直流配电网在可靠性和初始投资方面不占优势, 但较低的损耗成本以及缓解电压暂降损失的能力使得其全生命周期成本优于交流配电网。在此基础上, 进一步提出针对不同直流负荷占比、电力电子器件故障率条件下的交直流配电网优选方法。

关 键 词: 电压暂降; 直流配电网; 全生命周期成本; 优选模型

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.03.016 中图分类号: TM72 文章编号: 1673-9140(2020)03-0120-07

Optimization scheme of AC / DC distribution network considering voltage sags

LI Fei¹, ZHENG Zhiyu¹, ZHANG Zhaocheng², AI Qian², CAI Chong¹, LI Yaqian¹

(1. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518000, China; 2. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: As a new scheme of the distribution networks, the DC distribution network should be compared in detail with the AC distribution network in planning and design stage. Mean while, the voltage sags problems are also dominated in recent years. Under this circumstance, this paper studies the effect of DC distribution network which can relieve voltage sags occurs of the sensitive customers. Then, the life cycle cost (LCC) model of AC/DC distribution network is established by considering the economic and reliability impacts. It is shown that, in the case of 50% DC loads, even the DC distribution network has more initial cost and lower reliability, the LCC of DC distribution networks is better due to its ability to mitigation voltage sags and less loss. At last, the optimization method of AC/DC distribution network under different DC load ratios and power electronic device failure rate is proposed.

Key words: voltage sags; DC distribution network; life cycle cost; optimization scheme

随着城市规模的不断扩大、直流负荷占比不断提高, 以及城市敏感用户对于电能质量需求的不断提升, 现有的交流配电网开始面临线路损耗大、供电

半径短、供电走廊紧缺等一系列问题^[1]。

随着电力电子技术的不断发展, 基于柔性直流输电技术的直流配电网引起了国内外专家学者的广

收稿日期: 2018-01-19; 修回日期: 2018-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(51577115)

通信作者: 郑志宇(1969-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统规划研究; E-mail: 13802283691@163.com

泛关注。相比于交流配电网,直流配电网在输送容量、系统可控性、电能质量控制等方面具有明显的优势^[2-3]。目前针对直流配电网,国内外专家学者针对拓扑设计^[4]、电压等级选取^[6]、运行控制^[6]、保护特性^[7]等方面展开了研究。

作为一种新型的配电结构,在规划设计的时候需要与交流配电网进行详尽的比较,确定适用场景。文献[8]对交直流配电网的可靠性进行了分析,得出目前条件下直流配电网可靠性低于交流配电网的结论;文献[9]对交直流配电网的经济性进行了研究,提出直流配电网投资成本高于交流配电网,但损耗小于交流配电网。实际上,在配电网建设的过程中需要同时兼顾规划结果的可靠性和经济性^[10],这就需要对规划方案整个生命周期进行评估,而目前罕有文献从这方面进行考虑。同时,随着现代工业中敏感设备的大量使用,配电网中敏感负荷的电压暂降损失也不容忽视。柔性直流技术可以快速提供无功支持,可以在一定程度上隔离故障,缓解敏感负荷的电压暂降问题,而现有的研究成果对直流配电网在电压暂降治理上的优势考虑不足,因此在交直流配电网优选上无法作出全面的判断。该文基于全生命周期成本分析,考虑到直流配电网在缓解敏感负荷电压暂降上的优势,对交直流配电网的可靠性、经济性进行比较分析,提出了针对不同直流负荷占比、电力电子器件故障率条件下的交直流配电网优选方法,可为实际配电网规划设计提供一定的参考建议。

1 直流配网对电压暂降的影响分析

柔性直流换流器可以快速提供无功支持,因此能够缓解敏感用户的电压暂降问题。为分析直流配网对电压暂降的影响,该文建立了“手拉手”双端供电直流配网的 PSCAD 模型,其中一个换流站采用定直流电压、定无功功率控制策略;而另外一个采用定有功功率、定无功功率控制策略,且只有当另一个换流站退出运行后才变换为定直流电压控制。在此假设交流系统发生 0.5 p. u.、0.3 s 的电压暂降。

由仿真结果图 1 可以看出,由于采用双端供电模式,当一端交流侧发生电压暂降时,另一端交流系统能够提供功率支持,因此,直流母线可以稳定在设定值,有效地将电压暂降进行隔离。

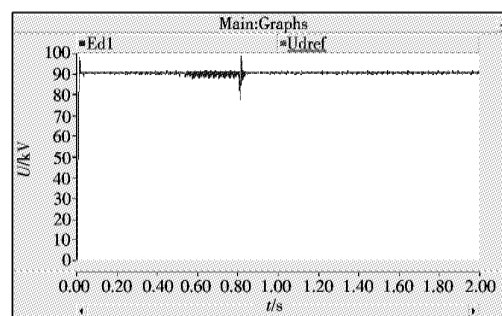


图 1 “手拉手”供电系统直流电压

Figure 1 DC voltage of hand-in-hand system

2 交直流配网网架选择与可靠性计算

2.1 交直流配网网架结构选择

目前,针对可靠性要求较高的城市配网,中国中压配网网架一般选用环网设计、开环运行的“手拉手”拓扑结构,文献[8]在 IEEE RTBS BUS5 拓扑结构的基础上,分别针对交直流配网设计了配电网,如图 2~3 所示。该文在此基础上,假设负荷 LP3、

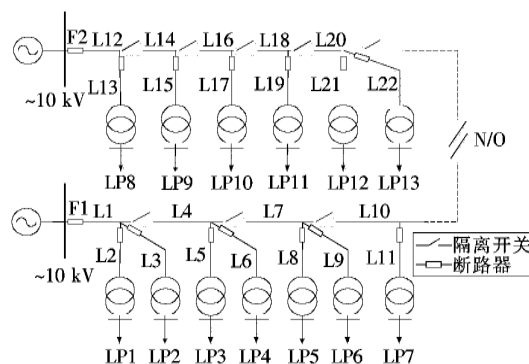


图 2 交流配电网拓扑

Figure 2 AC distribution network structure

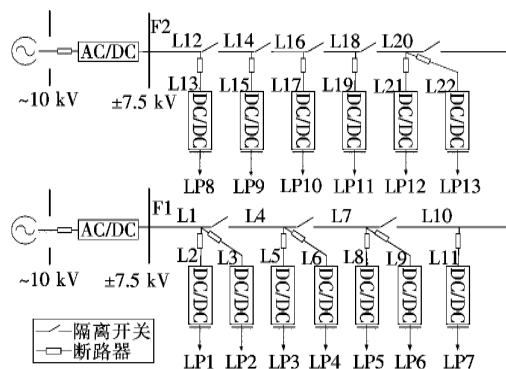


图 3 直流配电网拓扑

Figure 3 DC distribution network structure

LP5、LP8 为工业敏感负荷,其余参数如线路长度、负荷点类型和容量等详见文献[8,11-12]。为方便比较,假设每个负荷点直流负荷所占比重为 50%。

2.2 交直流配网可靠性评价

工程上常用的配电网可靠性评估方法总体上可分为模拟法和解析法 2 类。解析法模型准确、原理简单,且便于针对不同元件性能对配电网可靠性的影响进行分析,因此,解析法在配电系统可靠性评估中具有广泛的应用。

该文选用解析法中的最小割集法分别对交直流配网可靠性进行评价。该文仅考虑 $N-1$ 故障,参考文献[11]提出的直流配网元件可靠性参数,可靠性计算结果如表 1 所示。

表 1 交直流配网可靠性

Table 1 Reliability of AC / DC distribution network

可靠性 指标	SAIFI/ (次/a)	SAIDI/ (h/a)	ASAI/ %	ENS/ (MW·h)
交流	0.125 9	4.551 7	99.95	25.748
直流	0.657 3	6.934 1	99.92	37.136

可以看出,对于目前的电力电子器件可靠性来说,直流配电系统可靠性明显差于交流系统,但考虑到直流配电系统在抑制电压暂降上的作用,以及未

来电力电子器件可靠性不断提升的趋势,需要对交直流配网进行经济性、可靠性的全面比较。

3 交直流配网的经济性成本

3.1 基于 LCC 成本的经济性分析

全寿命周期成本(life cycle cost, LCC)是指在工程寿命过程中,可能发生的所有费用的总和^[13]。配网的规划设计需要综合平衡规划方案的初始投资成本和运营维护成本,考虑敏感用户短时电压需求的交直流配网全生命周期成本可以分解为图 4 所示。

由于资金具有时间价值,需要进行折算,该文采用折算为现值的方法。交直流配网规划方案的 LCC 成本数学模型可以表述为

$$C = C_1 + \sum_{t=0}^n \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} (C_{mt} + C_{Rt} + C_{sag}) + \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} C_D \quad (1)$$

式中 C_1 为初始投资成本, C_m 为运维成本, C_R 为可靠性成本, C_{sag} 为电压暂降成本, C_D 为报废成本, r 为折现率; n 为工程寿命周期; t 为年份。

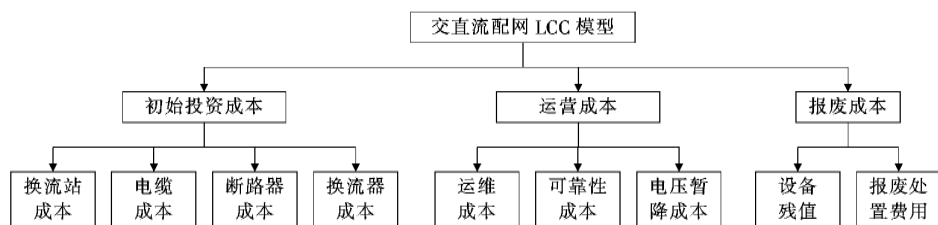


图 4 交直流配网 LCC 模型

Figure 4 LCC model of AC/DC distribution network

3.2 初始投资成本分析

针对该文所设计的交直流配网结构,初始投资成本主要包括变电站(换流站)、电缆、断路器、变压器和整流器(逆变器)等设备成本以及基建人工成本等,为介绍方便,该文将基建及人工成本归算到设备成本中进行考量。

参考现有研究中对交、直流配网设备经济性评价的成果^[14-16],针对该文仿真案例,初始投资成本估算结果如表 2、3 所示。

表 2 交流配网初始投资成本

Table 2 Initial investment cost of AC

设备	单价	数量	总价/万元
中压变电站	60 万元/(MV·A)	6 MV·A	360.0
低压变电站	8 万元/(MV·A)	4 MV·A	32.0
电缆	20.4 万元/km	14.3 km	291.7
断路器	2 万元/台	2 台	4.0
换流器	40 万元/(MV·A)	1 MV·A	40.0
合计			727.7

表 3 直流配网初始投资成本

Table 3 Initial investment cost of DC

设备	单价	数量	总价/万元
中压换流站	100 万元/MV·A	6 MV·A	600.0
低压换流站	50 万元/MV·A	4 MV·A	200.0
电缆	13.6 万元/km	14.3 km	194.5
断路器	45 万元/台	3 台	135.0
换流器	40 万元/MV·A	1 MV·A	40.0
合计			1 169.5

3.3 运行维护成本分析

交直流配网运行成本主要包括变电设备损耗和电缆线路损耗,其中,变电设备损耗率如表 4 所示^[17]。

表 4 变电设备损耗率

Table 4 loss rate of substation equipment %

设备(交流)	损耗率	设备(直流)	损耗率
变电站	1	换流站	1.8
中压整流器	5	中压逆变器	3
低压整流器	10	低压逆变器	7
低压变压器	2	低压变压器	2.8

电缆线路损耗的计算可由配电网潮流计算得到,目前配电网潮流计算方法多选用成熟的前推回代法,该文不再做过多介绍。

损耗成本计算:

$$C_{\text{loss}} = P_{\text{loss}} \cdot T_O \cdot u \quad (2)$$

式中 C_{loss} 为损耗成本; T_O 为年运行时间; u 为外购电价。

根据运行经验,年维护成本:

$$C_{\text{mt}} = f_m \cdot C_1 \quad (3)$$

式中 f_m 为工程维护率,交流系统一般选用 1.5%,而直流系统由于电力电子装置的可靠性较差,选用 2.1%^[18]。

3.4 可靠性成本分析

可靠性成本主要指用户因停电产生的停电损失费用。不同类型用户的用电特性、停电特性各不相同,但同一类型用户的停电损失随时间变化的趋势和范围是近似的。因此,同一类用户的停电损失可以选用相同的损失成本。通过调研数据的拟合^[19],得到住宅、商业、工业负荷的停电损失成本曲线,如图 5 所示。

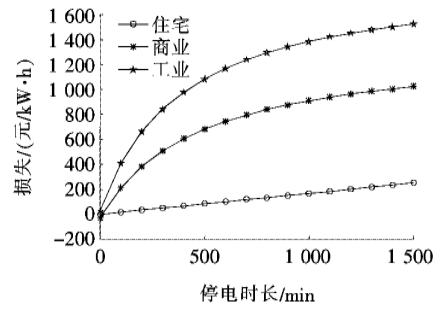


图 5 负荷停电损失曲线

Figure 5 Loss curve of load interruption

在第 2 节交直流配网可靠性计算的基础上,计算得到交直流配网可靠性成本:

$$C_r = C_{\text{load}} \cdot P \cdot u \quad (4)$$

式中 C_{load} 为停电损失成本,由曲线拟合而来; P 为损失电量; u 为停电时间。

3.5 电压暂降损失成本

变电站出口母线上每年发生的电压暂降事件整理如表 5 所示^[20]。

表 5 电压暂降数据

Table 5 Voltage sag data s

p. u.	<0.1	0.1~0.3	0.3~0.6	0.6~0.8
0.8~0.9	9.0	10.8	2.6	0.5
0.7~0.8	3.8	4.2	0.8	0.2
0.6~0.7	2.0	2.3	0.5	0.1
0.5~0.6	1.2	1.4	0.3	0.1
<0.5	2.1	2.5	1.0	0.1

由于交流配网正常状态为开环运行,因此可以认为负荷点经历的电压暂降特征与 PCC 点相同。

敏感负荷的电压耐受曲线一般分为正常工作区、故障区和不确定区,为表示方便,该文不考虑不确定区,假设当发生 0.7 p. u., 100 ms 的电压暂降,敏感负荷就不能工作,从而得出每年因电压暂降造成的负荷停运 8.3 次,假设每次造成的损失为 20 万元,则 LP3、LP5、LP8 等 3 个负荷每年因电压暂降造成的经济损失达 498 万元。

实际上,目前交流配网中电压暂降的治理手段也趋于完善,以动态电压恢复器 DVR 为代表的补偿设备获得了广泛应用。

采用 DVR 补偿后的电压可由式(5)求得:

$$V_s = V_{\text{sag}} + V_{\text{DVR}} \quad (5)$$

其中, V_s 表示 DVR 补偿后的电压暂降幅值; V_{sag} 表示 DVR 补偿前的电压暂降幅值; V_{DVR} 表示 DVR 的补偿电压。

DVR 的补偿策略包括同相补偿、完全补偿和最小能量补偿, 该文主要采用同相补偿, 即 V_{sag} 和 V_{DVR} 同相位。

由于电压暂降具有随机性, DVR 补偿容量的配置需要考虑全生命周期成本进行优化, 该文选用 DVR 设备成本为 1.25 万元/kV·A (含设备安装费), 每年的维护成本取初始成本的 10%, 使用寿命 20 年, 折现率 5%。

以治理成本投入最小为目标, 得到 DVR 最优配置方案如表 6 所示, 此时治理设备与电压暂降损失的 LCC 成本为 66 368 万元。

表 6 DVR 配置方案

Table 6 Planning Scheme with DVR

节点	配置容量/(kV·A)
3	130
5	130
8	130

由第 2 节分析结果可以看出, 双端供电的直流配电网由于环网运行, 可以有效支撑直流母线电压, 隔绝交流系统故障引起的敏感用户电压暂降, 因此, 该文假设直流配网中发生电压暂降的可能性很小, 只存在可靠性损失。

3.6 交直流配网经济性比较

对交流配电网与直流配电网的投资成本进行估算, 结果如表 7 所示。其中, C_1 为初始投资成本, C_{mt} 为每年的运维成本, C_{Rt} 为每年的可靠性成本, C_{sag} 为每年的电压暂降损失成本, C_{lcc} 为配网系统 LCC 成本。

表 7 投资成本比较

Table 7 Comparison of investment costs

	C_1	C_{mt}/a	C_{Rt}/a	C_{sag}/a	C_{lcc}^1	C_{lcc}^2
AC ¹	727.7	215.5	340	498	84 473	159 550
AC ²	1 199.9	262.6	340	108	—	108 330
DC	1 169.5	143.2	509	—	99 569	99 569

注: 1. AC¹ 为不考虑电压暂降治理的投资成本; 2. AC² 为装设 DVR 后的投资成本; 3. C_{lcc}^1 为不考虑电压暂降的 LCC 成本; 4. C_{lcc}^2 为考虑电压暂降的 LCC 成本

可以看出, 如果不考虑电压暂降影响, 在目前技术水平下, 无论是初始投资成本还是全生命周期成本, 交流配网在经济性上都优于直流配网。但考虑到电压暂降对敏感用户的影响, 直流系统每年将节省 498 万元的电压暂降损失成本。尽管目前交流系统中针对电压暂降的治理已趋于成熟, 但 DVR 等治理设备作为电力电子设备价格相对较高, 全生命周期成本层面上, 相对直流配网经济性略占劣势。

4 灵敏度分析

随着直流负荷占比提升和电力电子器件可靠性提高, 直流配网相对交流配网将占据更多优势, 何种场景下直流配网更具优势还需进一步量化。

4.1 直流负荷占比

由图 6 可以看出, 当直流负荷占比不断提升的时候, 直流系统的 LCC 成本逐渐下降, 而交流系统的 LCC 成本逐渐上升, 直流负荷占比临界点约在 0.5, 与前文计算结果相符。

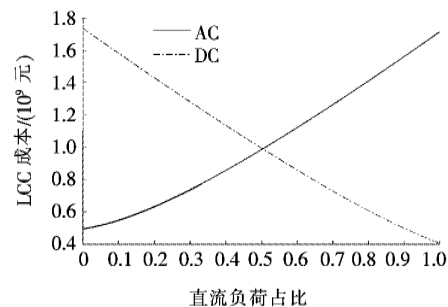


图 6 直流负荷占比敏感度

Figure 6 Sensitivity of DC load ratio

4.2 电力电子器件可靠性

由图 7 可以看出, 随着电力电子器件的故障率不断降低, 直流系统和交流系统的 LCC 成本都在不同程度的降低, 直流系统的 LCC 成本降低更快。

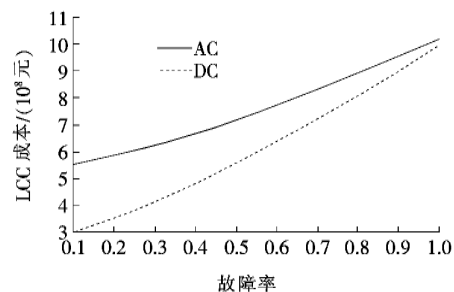


图 7 电力电子器件故障率敏感度

Figure 7 Sensitivity of power electronics failure ratio

4.3 方案优选

综合交直流配网 LCC 成本与直流负荷占比、电力电子器件故障率的关系,得到任意直流负荷占比和电力电子器件故障率下的交直流配网优选结果,如图 8 所示。

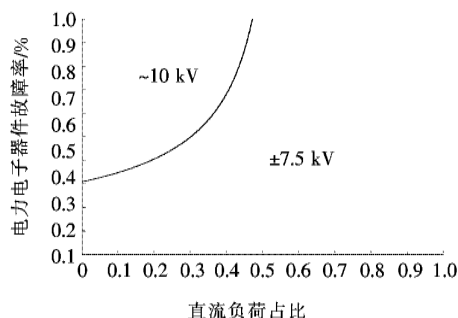


图 8 交直流配网优选方案

Figure 8 Optimization result of distribution network scheme

由图 8 可以看出,在当前电力电子故障率下(详见表 1),直流配电网适合于直流负荷占比高的工况,交直流配网之间的临界直流负荷占比约为 0.48;随着电力电子故障率下降,交直流配网之间的临界直流负荷占比也在不断下降,当达到目前故障率的 27% 以下时,针对任意负荷,直流配网方案都将具有经济优势。

5 结语

随着城市电网敏感负荷的不断增多,配电网在规划阶段需要对电压暂降问题给予足够的重视,因此,在交直流配网优选过程中需要考虑直流配网在缓解电压暂降问题中的优势。该文基于全生命周期成本,考虑到敏感负荷的电压暂降损失成本,综合考虑经济性和可靠性,对交直流配网进行了比较,得出结论:

1) 针对所设计的网架结构,直流配电网在初始投资成本和可靠性上均不占优势,但运行成本低于交流配电网,而且可以缓解电压暂降损失成本。因此,从全生命周期成本的角度来看,直流配电网更具优势;

2) 随着直流负荷占比提高,直流配电网的 LCC 成本逐渐降低,而交流配电网的 LCC 成本则在增

加。随着电力电子器件故障率的降低,交直流配电网的 LCC 成本都有不同程度的下降,其中直流配电网下降的更快。考虑到电力电子技术的发展,电力电子器件的故障率会逐渐降低,而直流负荷占比会不断提升,因此,直流配电网将具有更广阔的应用;

3) 值得注意的是,直流配电网在消纳分布式电源方面也具有独特的优势,在进行交直流配电网优选的时候也需要考虑分布式电源的影响。但分布式电源具有出力波动性和随机性的特征,这将增加分析的复杂度,有待于进一步研究。

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+5.
SONG Qiang,ZHAO Biao,LIU Wenhua,et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(25):9-19+5.
- [2] 孙鹏飞,贺春光,邵华,等. 直流配电网研究现状与发展[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):64-73.
SUN Pengfei, HE Chunguang, SHAO Hua, et al. Research status and development of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016,36(6):64-73.
- [3] 姚钢,茆中栋,殷志柱,等. 楼宇直流配电系统关键技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(15):156-170.
YAO Gang, MAO Zhongdong, YIN Zhizhu, et al. Key technologies of building DC power distribution system: an overview[J]. Power System Protection and Control, 2019,47(15):156-170.
- [4] Suryanarayana H, Sudhoff S D. Design paradigm for power electronics based DC distribution systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2016,5(1):51-63.
- [5] 王丹,柳依然,梁翔,等. 直流配电网电压等级序列研究[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):19-25+47.
WANG Dan, LIU Yiran, LIANG Xiang, et al. DC distribution network voltage class series[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(9):19-25+47.
- [6] Hamad A A, Farag H E, El-Saadany E F. A novel multi-agent control scheme for voltage regulation in dc dis-

- tribution systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 6(2): 534-545.
- [7] 陈丽安, 赵航, 肖业湘, 等. 交直流混合有源配电系统保护方案研究[J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30(3): 31-39.
CHEN Lian, ZHAO Hang, XIAO Yexiang, et al. Protection scheme for hybrid AC/DC power distribution system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(3): 31-39.
- [8] 曾嘉思, 徐习东, 赵宇明. 交直流配电网可靠性对比[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2582-2589.
ZENG Jiasi, XU Xidong, ZHAO Yuming. Reliability comparison of ac and dc distribution network[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2582-2589.
- [9] 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): 3368-3374.
ZHENG Huan, JIANG Daozhuo, DU Yi. Economic comparison of AC and DC distribution system[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3368-3374.
- [10] 赵晓慧, 梁标, 李海波, 等. 城市配网自动化可靠性评估与成本效益分析[J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30(1): 73-79.
ZHAO Xiaohui, LIANG Biao, LI Haibo, et al. Reliability assessment and cost-benefit analysis of urban distribution network automation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(1): 73-79.
- [11] Billinton R, Jonnavithula S. A test system for teaching overall power system reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 1670-1676.
- [12] Allan R N, Billinton R, Sjarief I, et al. A reliability test system for educational purposes-basic distribution system data and results[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 813-820.
- [13] 黄道姗. 基于设备全寿命周期的配电系统可靠性评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(2): 72-78.
HUANG Daoshan. Reliability evaluation method of distribution system based on electrical equipment life-cycle theory[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(2): 72-78.
- [14] 刘振亚. 国家电网公司输变电工程通用造价[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [15] 中国南方电网有限责任公司. 中国南方电网公司 10 kV 和 35 kV 配网典型造价[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [16] 于立杰, 董沛毅. 多端柔性直流配电网运行策略优化研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(9): 72-78.
YU Lijie, DONG Peiyi. Operation strategy optimization of multi-terminal flexible DC distribution network[J]. Smart Power, 2018, 46(9): 72-78.
- [17] Pang H, Lo E, Pong B. DC electrical distribution systems in buildings[C]//2006 2nd International Conference on Power Electronics Systems and Applications. Hong Kong, China: IEEE, 2006.
- [18] 王锡凡, 刘沈全, 宋卓彦, 等. 分频海上风电系统的技术经济分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3): 43-50.
WANG Xifan, LIU Shenquan, SONG Zhuoyan, et al. Technical and economic analysis on offshore wind power system integrated via fractional frequency transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3): 43-50.
- [19] 李蕊, 李跃, 苏剑, 等. 配电网重要电力用户停电损失及应急策略[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 170-176.
LI Rui, LI Yue, SU Jian, et al. Power supply interruption cost of important power consumers in distribution network and its emergency management[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 170-176.
- [20] Chang C S, Yu Z. Distributed mitigation of voltage sag by optimal placement of series compensation devices based on stochastic assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(2): 788-795.