

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190982

多类型分布式电源接入下的低压交流与直流配电网运行经济性对比

赵政嘉¹, 李海波², 赵宇明³, 刘国伟³, 杨超², 蒋世用⁴, 李雨桐⁵

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 清华四川能源互联网研究院, 四川 成都 610213;
3. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518020; 4. 珠海格力电器股份有限公司, 广东 珠海 519070;
5. 深圳市建筑科学研究院股份有限公司, 广东 深圳 518049)

摘要: 配电网运行经济性是配电网经济评估的重要组成部分, 直接影响着用户用电效益。随着直流配电网的快速发展以及多类型分布式电源接入低压配电网, 如何定量评估低压交流与直流配电网运行损耗, 进而对比二者运行经济性, 对于未来低压配电系统的规划和运行具有重要指导意义。根据含有多类型分布式电源接入的低压交流与直流配电系统典型拓扑结构, 建立了基于系统全环节功率损耗的交直流运行经济性对比评估模型, 并以运行经济性为优化目标建立考虑储能充放电状态的配网运行策略优化模型。最后基于深圳中美中心低压直流配网示范工程实际数据对系统典型运行日的功率损耗进行分类统计, 对比了交流与直流配网运行经济性的差异以及储能接入的影响。结果表明, 在多类型分布式电源接入下, 系统功率损耗呈现明显的时空分布差异性, 且长期运行下低压直流配电网运行经济性具有一定优势。

关键词: 直流配电网; 交流配电网; 分布式电源; 功率损耗; 运行经济性

Operational economic comparison of low voltage AC and DC distribution networks with multi-type distributed generation integration

ZHAO Zhengjia¹, LI Haibo², ZHAO Yuming³, LIU Guowei³, YANG Chao², JIANG Shiyong⁴, LI Yutong⁵

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610213, China; 3. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518020, China; 4. Zhuhai Geli Electrical Appliances Co., Ltd., Shenzhen 519070, China; 5. Shenzhen Institute of Building Research Co., Ltd., Shenzhen 518049, China)

Abstract: The operational economy of a distribution network is an important part of its economic evaluation. It directly affects the power efficiency of consumers. With the rapid development of the DC distribution network and the integration of multi-type distributed generation to a low-voltage network, how to quantitatively evaluate the operational loss of LVAC (low voltage AC) and LVDC (low voltage DC) distribution networks and further compare their operational economy have important guiding significance for the planning and operation of the future low-voltage distribution system. Given a typical topological structure of LVAC and LVDC distribution networks with multi-type distributed generation, an operational economy comparison evaluation model between LVAC and LVDC based on the whole system power loss is established. Then taking the operational economy as an objective, an optimization model of the operation strategy considering the charge-discharge state of energy storage is proposed. Finally, based on the data of the demonstration project of Shenzhen China-US Center LVDC distribution network, the power loss in the typical operation day is calculated and classified. Then the operational economy of AC and DC distribution networks is compared, while the impact of energy storage is discussed. The results show that the power loss of the system is different in spatial and temporal distribution with multi-type distributed generation integration, and the LVDC distribution network has certain advantages in operational economy under long-term operation.

This work is supported by Key Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company (No. 090000KK52180116), National Key Laboratory of Power System (No. SKLD19KZ04), and Sichuan Provincial Science and Technology Project (No. 2019YJ0631).

Key words: DC distribution network; AC distribution network; distributed generation; power loss; operational economic

0 引言

随着配电网安全可靠运行水平的不断提高, 如何在此基础上科学合理地提升配电网经济性受到了较多关注, 而低压配电网靠近用户侧, 其运行经济性直接关系到用户的用电效益, 因此提升低压配电网运行经济性具有重要意义^[1-5]。除了固定的运维成本, 影响配网运行经济性的因素主要为系统电能损耗。直流配电技术以其损耗低、传输能力强等优势, 在轨道交通、数据中心、工业用电等多个场景得到了广泛应用, 近几年在民用场景也逐渐开展了直流配电示范工程建设^[6-10]。在低压配电侧, 采用直流技术虽然减少了分布式电源及直流负载接入的换流环节, 但是在电源入口侧增加了 AC-DC 换流环节。从定性角度分析, 将设备侧多个效率较低的换流设备集成为一个效率较高的 AC-DC 设备, 可降低系统运行损耗, 进而提升运行经济性, 但考虑到系统损耗与分布式资源配置及运行工况均有较大关联, 上述结论仍需严格的理论论证^[11-13]。因此, 如何定量评估低压交流与直流配电网在不同分布式电源配置与可变运行工况下的时序动态运行损耗, 进而对比二者运行经济性, 对于未来低压配电系统的规划和运行具有重要指导意义。

目前国内外已有相关专家学者从多个角度针对配电网经济性评估开展了研究。在经济性评价方面, 有的专家通过将配电网经济参数与技术参数相结合的方式, 基于传统财务评价指标, 构建了配电网综合评估指标体系^[14]。在供电模式经济性研究方面, 不同专家学者则分别研究了中压配电网不同接线模式、供电方式对经济性或可靠性的影响^[15-17]。在配电系统运行状态方面, 有学者针对配电网存在的不确定性因素, 采用区间运算理论, 研究了配电网合环点安全性与经济性的评估方法^[18]。然而, 上述研究仅针对传统交流配电网开展研究, 没有涉及到直流配电网经济性评估。部分研究从投资成本和运行成本两个角度, 对交流配电网与直流配电网的经济性进行了比较, 但对于分布式电源接入后系统损耗的整体统计不足^[19]。

如上所述, 配电网的运行经济性主要受损耗影响, 其损耗主要分为线路损耗、变压器损耗以及电力电子器件损耗, 这些损耗受线路实时功率、器件转换效率以及电压等级等多种因素影响, 不仅位置分散不易统计且由于用户用电特征的多变使得负荷侧的功率损耗往往被忽视。随着多类型分布式电源接入低压配网, 运行损耗的组成成分与变化规律更加复杂多变, 亟需要研究在多类型电力电子装置接

入下的低压交流与直流配电网损耗计算模型, 进而对二者运行经济性进行对比。

从分布式电源侧损耗构成角度上, 光伏与储能并入直流配电网只需要经过 DC-DC 转换过程, 而并入交流配电网还需要在此基础上进行 DC-AC 逆变过程, 产生了额外的器件损耗。部分学者采用模拟法, 先后对于包含电池储能的建筑、全直流建筑(住宅和商业)、全直流住宅建筑等场景进行了能效定量评估, 模拟结果表明对于民用场景以及商业场景, 直流建筑均可达到一定程度的节电效果^[20-22]。同时, 还有部分专家学者采用实验法, 先后对于 LED 直流系统(无电池)、全直流办公建筑(电池、电动车)和全直流建筑(电池、电动车)进行了能效定量评估, 实验结果表明对于市政场景以及办公场景, 直流供电的节电效果均较为可观^[23-26]。同时, 直流配电网为直流负荷供电需要经过 DC-DC 过程将±375 V 的电压转换至不同用电设备所需的工作电压等级, 而交流配电网为直流负荷供电需要先将 380 V 的交流电转换为直流电再进行电压等级的变化, 对于电子产品而言, 减少交流为其供电过程中的 AC-DC 转换步骤可以提高效率并有利于谐波的处理。对于直流负荷比例日趋增长的用电结构而言, 直流配电在直观上要优于交流配电, 且随着直流配电电压等级的不断规范化、统一化, 直流配电网为负荷供电过程中产生的 DC-DC 损耗将得到一定控制。但这一直观的认知并没有得到完整的实施与验证, 使得对于交流与直流低压配电网在运行过程中产生的损耗统计与相应的经济性评估仍不完善。

本文首先构建了低压交流与直流配电网标准对比模型, 定义了常见的负荷类型。其次, 考虑交流与直流低压配电系统的实际拓扑情况, 以运行过程中产生的损耗费用为研究重点, 建立低压交流与直流配电网经济性对比模型, 提出了线路损耗、电力电子器件损耗计算模型, 并分析储能运行模式与系统损耗之间的关系。再次, 基于分时电价和储能运行策略, 建立了以运行经济性最优为目标的低压配电网优化运行模型。最后, 以深圳某实际低压直流建筑为分析对象进行仿真分析, 结果表明, 在多类型分布式电源和直流负荷接入情况下, 交流和直流配电网的运行经济性均有明显改善, 同时直流配网运行经济性整体优于交流配网。

1 含有分布式电源的低压配电网模型

1.1 低压交流与直流配电网拓扑结构

含有分布式电源的交流与直流低压配电网简

单的拓扑形式如图 1 所示,主要由不同类型的负荷、可再生能源以及电网主线路构成,其中分布式电源主要供给本地负荷,不足部分通过主线路由电网供应。比较之下,交流配电网涉及更多的功率变换环节,直流配电网在负荷侧及可再生能源并网侧简化了功率变换环节,减少了可再生能源并网及负荷侧功率损耗,但主线路侧需要增加 AC-DC 换流器,相比之下增加了主线路侧的功率损耗。

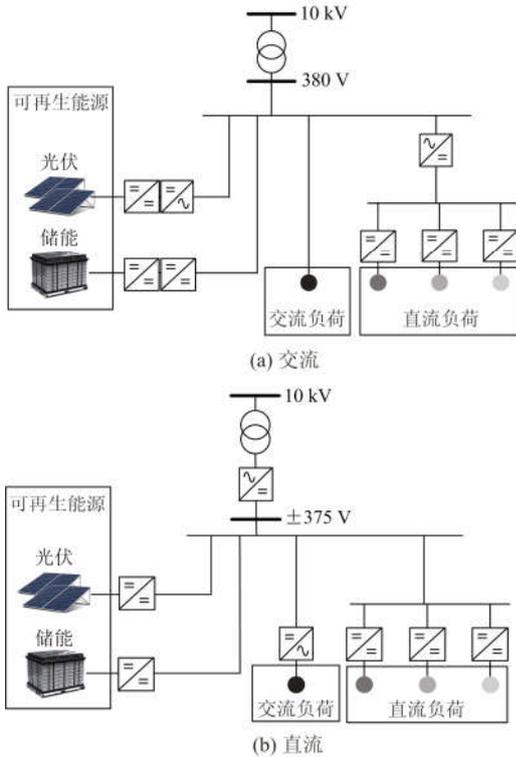


图 1 低压交流与直流配电网拓扑结构

Fig. 1 Low voltage AC and DC distribution network topology

1.2 负荷类型

商业负荷与居民负荷作为低压配电网用电主体用电特征不尽相同,将负荷分为交流负荷与直流负荷两大类,其中交流负荷主要为直接利用交流供电的电动机以及利用变频技术的空调、冰箱等;直流负荷包括直流充电桩及电脑、手机等电子产品。

2 低压交流与直流配电网运行经济性对比模型

低压配电网运行经济性受负荷特性、电网结构、电压等级、设备参数及其运行状态以及电价政策等多种因素影响,其运行费用主要包括运行维护成本、损耗费用与因故障等因素产生的额外费用。实际经济性建模中,如无特殊情况,一般可认为每年度的运维成本、故障抢修成本相同。

考虑到交流与直流配电网在运维与故障修复

成本方面相差不大,而配电网功率传输过程中产生的传输损耗是产生运行费用的一个重要组成部分,由于受到上述各类复杂因素影响,交流与直流系统中的传输损耗可能相差较大,不仅直接影响配电网运行的经济性,更从侧面反映了系统整体的运行效率。因此,本文在拓扑结构相同的情况下,以配电网功率传输过程中产生的损耗费用为主,对交流与直流配电网的运行经济性进行评估与比较。

配电网运行过程中产生的功率损耗主要由两个部分组成,配电线路损耗与电力电子器件损耗。通常负荷侧的适配器件功率损耗由于额定容量低、数量大、分散性高而被忽略或是没有得到精确地统计。而分布式电源并网过程中由于外部条件(光照、温度)的变化使得其出力变化幅度巨大,且多数时间与其直接相连的换流器件处于较低的运行效率。以上过程产生的功率损耗对于低压交流配电网经济运行均为不利因素,且随着直流负荷比例逐渐增加与分布式电源的大量接入愈加明显。因此,为了更为完整客观地对交流与直流配电网的运行经济性进行评估,应结合既有网络结构着重考虑系统全环节运行过程中产生的功率损耗。

将配电网在运行过程中产生的总损耗费用表示为 F_L , 则有

$$F_L = \sum_{t=1}^T F_E(t) \cdot P_{\text{loss}}(t) \quad (1)$$

式中: $F_E(t)$ 为不同时刻的售电电价; $P_{\text{loss}}(t)$ 为系统实时产生的总功率损耗; T 为统计周期时段数。由于交流与直流配电系统线路损耗计算流程与不同支路的换流器运行方式均存在差异,因此实时功率损耗也不尽相同。利用式(2)对二者经济性差异进行比较。

$$\Delta F_L = \sum_{t=1}^T F_E(t) \cdot (P_{\text{loss_AC}}(t) - P_{\text{loss_DC}}(t)) = \sum_{t=1}^T F_E(t) \cdot \Delta P_{\text{loss}}(t) \quad (2)$$

式中: ΔF_L 为交流与直流损耗费用差值; $P_{\text{loss_AC}}(t)$ 、 $P_{\text{loss_DC}}(t)$ 、 $\Delta P_{\text{loss}}(t)$ 分别表示交流与直流配电系统的实时功率损耗以及二者差值的绝对值。

由此可知,当售电电价为已知量且对交流与直流配电网保持一致时,由损耗费用引起的经济运行问题本质上与功率损耗的统计计算密切相关。因此本节将从三个部分对系统损耗计算的建模进行阐述。

为了进一步体现运行过程中损耗的组成及交流与直流配电系统的差异,依前文所述按照损耗产生位置与类型对其进行分类,不同组分的表达式如表

1. 其中, 为了体现储能装置充放电状态对系统损耗的差异性, 将储能部分产生的损耗从可再生能源部分中分离出来单独考虑。

表 1 配电系统损耗组成

Table 1 Loss composition of distribution system		
损耗产生位置	损耗类型	
	线路	电力电子器件
负荷侧	$\Delta Line_{load}(t)$	$\Delta Con_{load}(t)$
可再生能源(光伏)侧	$\Delta Line_{pv}(t)$	$\Delta Con_{pv}(t)$
储能侧	充电状态	$\Delta Line_{es_ch}(t)$
	放电状态	$\Delta Line_{es_dis}(t)$
主线路	$\Delta Line_s(t)$	$\Delta Con_s(t)$

2.1 线路损耗计算

中低压配电网线路损耗通常指线路载荷损耗, 与载流量、运行电压、线路型号、传输距离以及负荷沿线分布情况有关。利用式(3)、式(4)可分别求解交直流线路损耗。其中: $P_{item}(t)$ 表示不同部分的实时功率; r 为单位阻值; l 为线路长度; U 为线路电压; $\cos\phi$ 为功率因数。

$$\text{DC: } \Delta Line_{item}(t) = \frac{P_{item}(t)^2}{2 \cdot U^2} r l \quad (3)$$

$$\text{AC: } \Delta Line_{item}(t) = \frac{P_{item}(t)^2}{U^2 \cos^2\phi} r l \quad (4)$$

2.2 电力电子器件损耗评估模型

电力电子器件的损耗计算方式与配电系统是交流配电形式还是直流配电形式没有必然联系, 器件功率损耗只受输入功率大小与其自身功率-效率转换特性影响。设电力电子器件输入功率、输出功率以及额定功率分别为 $P_{in}(t)$ 、 $P_{out}(t)$ 以及 P_n , 则输入功率与额定功率的比值 P_{ratio} 可表示为 $P_{ratio} = P_{in}(t)/P_n$, 不同时刻器件的转换效率 $E(t)$ 可表示为 $E = P_{out}(t)/P_{in}(t)$ 。

通过改变 P_{ratio} 可以实测得到一系列不同测量点处的转换效率, 对其进行统计可基本了解该器件的运行特性, 为了进一步体现器件在整个运行范围内的效率情况, 可以利用效率点数据拟合得到曲线方程。不同器件的曲线方程如式(5), $item$ 表示不同的器件类型。根据效率曲线方程可以计算得到不同情况下的器件损耗 $\Delta Con_{item}(t)$, 如式(6)所示。

$$E_{item}(t) = e_{item}(P_{ratio,item}) = e_{item}\left(\frac{P_{in,item}(t)}{P_{n,item}}\right) \quad (5)$$

$$\Delta Con_{item}(t) = P_{out,item}(t) - P_{in,item}(t) \quad (6)$$

对于光伏侧, 功率传输方向与损耗计算方向一

致, 则有

$$\Delta Con_{pv}(t) = P_{pv}(t) - P_{pv}(t) \cdot e_{pv}\left(\frac{P_{pv}(t)}{P_{n,pv}}\right) \quad (7)$$

式中: $P_{n,pv}$ 为与光伏组件相连的 DC-DC 直流转换器的额定功率; e_{pv} 为对应的器件转换效率。对于负荷侧, 功率传输方向与损耗计算方向相反, 此时负荷侧的器件损耗为

$$\Delta Con_{load}(t) = \frac{P_{load}(t)}{e_{load}\left(\frac{P_{load}(t)}{P_{n,load}}\right)} - P_{load}(t) \quad (8)$$

式中: $P_{n,load}$ 为与负荷侧直接相连的换流器件的额定功率, 对于中压直流负荷, 这部分损耗可以忽略不计; 对于 48 V、36 V 等低压直流负荷, $P_{n,pv}$ 表示 DC-DC 适配器等, 对于部分中低压交流负荷, $P_{n,pv}$ 表示与其对接的 DC-AC 逆变器件。

2.3 计及储能运行模式的系统整体损耗计算模型

以直流配电网为例, 依据表 1 的分类原则并结合功率传输方向可以得到不同损耗的具体表达方式。其中损耗推导方向分为与功率传输方向相同和相反两种情况, 如图 2、图 3 所示。

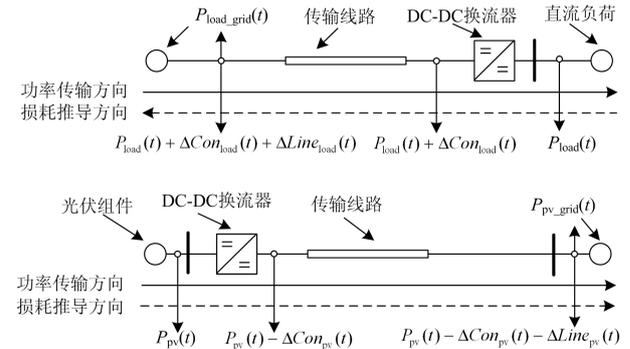


图 2 损耗推导计算方向

Fig. 2 Direction of loss derivation and calculation

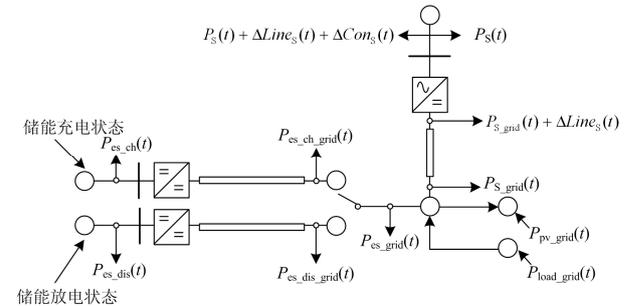


图 3 包含储能的主线路损耗推导计算

Fig. 3 Derivation and calculation of main line loss including energy storage

其中, $P_{pv_grid}(t)$ 与 $P_{load_grid}(t)$ 分别为光伏侧与负荷侧并网节点处的实时功率, 分别为

$$P_{pv_grid}(t) = P_{pv}(t) - \Delta Con_{pv}(t) - \Delta Line_{pv}(t) \quad (9)$$

$$P_{load_grid}(t) = P_{load}(t) + \Delta Con_{load}(t) + \Delta Line_{load}(t) \quad (10)$$

主线路的推导方式与上述类似, 由于储能装置不能同时充放电, 因此总损耗计算结果随储能装置运行状态变化而存在差异。

当储能处于充电状态时可将其视为直流负荷, 器件损耗为

$$\Delta Con_{es_ch}(t) = \frac{P_{es_ch}(t)}{e_{es_ch} \left(\frac{P_{es_ch}(t)}{P_{n.es_ch}} \right)} - P_{es_ch}(t) \quad (11)$$

储能线路并网功率为 $P_{es_ch_grid}(t)$, 主线路并网功率为 $P_{S_grid}(t)$, 表达式分别如式(12)、式(13)所示。

$$P_{es_grid}(t) = P_{es_ch}(t) + \Delta Con_{es_ch}(t) + \Delta Line_{es_ch}(t) \quad (12)$$

$$P_{S_grid}(t) = P_{load_grid}(t) + P_{es_grid}(t) - P_{pv_grid}(t) \quad (13)$$

当储能处于放电状态时, 器件损耗为

$$\Delta Con_{es_dis}(t) = P_{es_dis}(t) - P_{es_dis}(t) \cdot e_{es_dis} \left(\frac{P_{es_dis}(t)}{P_{n.es_dis}} \right) \quad (14)$$

储能线路并网功率 $P_{es_dis_grid}(t)$ 与主线路并网功率 $P_{S_grid}(t)$ 分别如式(15)、式(16)所示。

$$P_{es_grid}(t) = P_{es_dis}(t) - \Delta Con_{es_dis}(t) - \Delta Line_{es_dis}(t) \quad (15)$$

$$P_{S_grid}(t) = P_{load_grid}(t) - P_{es_grid}(t) - P_{pv_grid}(t) \quad (16)$$

对于主线路器件损耗而言, 计算方式与式(8)类似, 功率传输方向与损耗计算方向相反, 则主线路AC-DC产生的功率损耗为

$$\Delta Con_s(t) = \frac{P_{S_grid}(t) + \Delta Line_s(t)}{e_s \left(\frac{P_{S_grid}(t) + \Delta Line_s(t)}{P_{n.S}} \right)} - (P_{S_grid}(t) + \Delta Line_s(t)) \quad (17)$$

结合主线路线路损耗推导公式(3)可以得到电网总功率 $P_S(t)$ 为

$$P_S(t) = P_{S_grid}(t) + \Delta Con_s(t) + \Delta Line_s(t) \quad (18)$$

结合上述推导可以分别得到储能充、放电模式下配电网总损耗($item=load, pv, S, es_ch, es_dis$)。

$$P_{loss}(t) = \sum \Delta Line_{item}(t) + \sum \Delta Con_{item}(t) \quad (19)$$

由以上推导可知, 影响系统总损耗的因素复杂多变。其中光伏出力主要受环境影响, 负荷侧受用电特性及用户自主性等因素影响, 难以实现针对性地调配。而储能装置以其双向功率传输的特性为配电网整体的灵活控制提供了可能。

2.4 长期运行下的经济性分析

配电网在长期运行时, 除因线路损耗与器件损耗产生的损耗费用, 运行维护费用同样是影响配电网运行经济性的主要因素。运行维护费用主要包括为保证配电网稳定可靠运行而产生的设备更换、维护以及检修等费用。对于低压配电网而言, 交流与直流系统运维费用的组成大体相同, 但相比于交流配电网, 直流配电网中的换流站设备多、结构复杂、造价高、损耗大, 对运维提出了更高的要求。

配电网长期运行时, 可将总运行费用表示为

$$F_M = \left(\sum_{d=1}^D F_L + F_C \cdot D_m \right) \cdot \sum_{y=0}^{Y-1} D_f^y \quad (20)$$

式中: F_M 表示年总运行费用; d 为典型日统计天数; D 为统计时长; F_C 为配电网投资建设成本; D_m 为系统运维率; y 表示运行年数; Y 为设备的使用寿命; D_f 为设备生命周期内所取的折现系数。

除此之外, 为体现储能装置的接入对配电网整体经济性的作用, 应对配电网运行中从主电网购电的总费用进行统计, 并折合至单位成本进行储能接入前后的比较。配电网在设备生命周期内运行时产生的总购电费用表示为

$$F_B = \sum_{y=1}^Y Y \cdot \left(\sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T F_E(t) \cdot P_S(t) \right) \cdot \sum_{y=0}^{Y-1} D_f^y \quad (21)$$

式中: $P_S(t)$ 由式(18)统计得到; F_B 为运行 Y 年所产生的购电总费用。

同时, 对配电网的单位成本进行统计, 假设配电网已经建设完成, 在不考虑已有配电网一次投资的条件下。运行中每度电成本应包括运行维护费用以及相应的购电费用, 储能接入后应考虑储能装置的投资成本。运行单位成本 F_P 为

$$F_P = \frac{\left(F_B + \sum_{d=1}^D F_C \cdot D_m \right) \cdot \sum_{y=0}^{Y-1} D_f^y}{\sum_{y=1}^Y Y \cdot \left(\sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T P_{load}(t) \right) \cdot \sum_{y=0}^{Y-1} D_f^y} \quad (22)$$

3 低压配电网经济运行优化模型

由运行经济性评估方法可知, 在负荷侧功率与光伏出力功率已知的情况下, 两个部分产生的器件损耗与线路损耗均可通过既定的参数直接计算得到, 而此时储能的运行方式成为影响系统整体运行经济性的关键。本文以储能运行策略遵循系统损耗费用(F_L)最低为原则展开, 同时利用相关指标对模型的优化效果进行更为全面的评定。

3.1 储能运行策略对系统损耗影响模型

依据损耗费用最低原则, 在对器件损耗进行计

算时, 需对电力电子器件的功率-效率曲线的函数表达式进行确定, 本文所采用的器件效率曲线依据不同情况进行指数函数以及高次多项式的拟合, 以DC-DC换流器为例, 实测数据点以及拟合后的曲线如图4所示, 拟合得到的曲线表达式如式(23)。

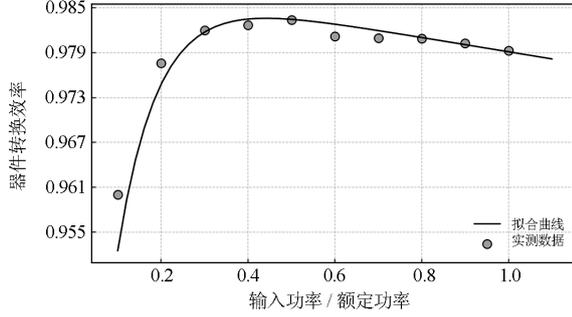
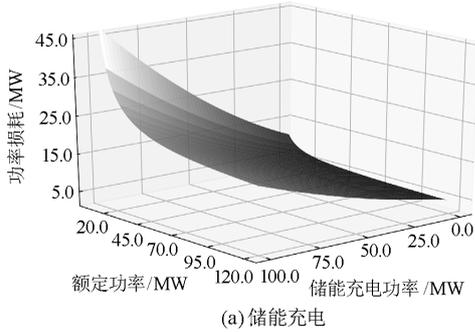


图4 DC-DC适配器实测数据与拟合曲线

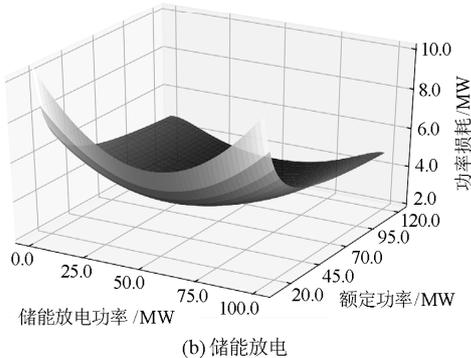
Fig. 4 Measured data and fitting curve of DC-DC adapter

$$E_{\text{DC-DC}} = 0.989e^{-0.0098 \frac{P_{\text{in}}(t)}{P_n}} - 0.1035e^{-10.75 \frac{P_{\text{in}}(t)}{P_n}} \quad (23)$$

当忽略储能装置内部的组成形式, 将其视为整体模块时, 可以将配电网整体损耗简化成以器件效率特性、储能运行情况为变量的表达形式, 如图5。



(a) 储能充电



(b) 储能放电

图5 储能额定功率处于不同运行状态时的总功率损耗

Fig. 5 Energy storage rated power and total power loss under different operating conditions

从图5可以看出, 当储能处于充电状态时所产生的功率损耗随其器件输入侧的实时功率增加而增

加, 这对于损耗的控制是一个不利因素。同时, 在一个调度周内, 储能装置充放电总量应基本保持一致, 因此充电状态的确定依赖于外部条件, 如填谷线的阈值、充电次数、充电功率幅值等。

与充电状态不同, 当受线路损耗与换流器件效率曲线特性影响时, 储能装置处于放电状态时所产生的功率损耗存在局部极小值, 而这一极值受多种因素影响, 如削峰程度、负荷波动等。

3.2 削峰填谷模式下储能经济运行控制策略

结合输配电系统对负荷削峰填谷的需求, 应充分利用储能的优势提高分布式电源接入的灵活可靠性, 以此为背景在满足基本平抑要求的条件下, 对储能运行策略进行完善。以一天24h为储能装置充放电调度的一个周期, 储能优化控制数学模型如式(24)~式(33)所示。

$$\min F_L = \min \left(\sum_{t=1}^T F_E(t) \cdot P_{\text{loss}}(t) \right) \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } P_{\text{loss}}(t) = & \Delta \text{Line}_{\text{load}}(t) + \Delta \text{Con}_{\text{load}}(t) + \\ & \Delta \text{Line}_{\text{pv}}(t) + \Delta \text{Con}_{\text{pv}}(t) + \\ & \Delta \text{Line}_{\text{es_ch}}(t) + \Delta \text{Con}_{\text{es_ch}}(t) + \\ & \Delta \text{Line}_{\text{es_dis}}(t) + \Delta \text{Con}_{\text{es_dis}}(t) + \\ & \Delta \text{Line}_s(t) + \Delta \text{Con}_s(t) \end{aligned} \quad (25)$$

$$P_s(t) < P_s^{\text{max}} \quad (26)$$

$$P_s(t) \leq \frac{4U^2}{rl} \cdot 7\% \quad (27)$$

$$P_{\text{es_ch}}(t) \cdot P_{\text{es_dis}}(t) = 0 \quad (28)$$

$$0 \leq P_{\text{es_ch}}(t) \leq P_{n,\text{es}} \quad (29)$$

$$0 \leq P_{\text{es_dis}}(t) \leq P_{n,\text{es}} \quad (30)$$

$$\sum_{t=1}^T P_{\text{es_ch}}(t) = \sum_{t=1}^T P_{\text{es_dis}}(t) \quad (31)$$

$$E_{\text{ES}(t+1)} = E_{\text{ES}(t)} + \left(P_{\text{es_ch}}(t)n_{\text{es_ch}} - \frac{P_{\text{es_dis}}(t)}{n_{\text{es_dis}}} \right) \Delta T \quad (32)$$

$$E_{\text{ESmin}} \leq E_{\text{ES}(t)} \leq E_{\text{ESmax}} \quad (33)$$

式(24)中, F_L 为单目标函数, 表示总运行费用, 由功率损耗与实时电价相乘求和得到, 其中配电系统功率损耗 $P_{\text{loss}}(t)$ 的组成结构如式(25)所示, 在表1中已详细介绍。除了目标函数, 在系统运行过程中还存在相关约束条件, 式(26)、式(27)为联络线功率约束, 而 $P_s(t)$ 的计算方式如式(18)所示, 为电网总功率, 结合各部分功率损耗推导得到, P_s^{max} 为主线路的最大运行功率限制, 同时配网允许偏差为±7%, 这两个条件在优化过程中影响着配电网的最大供电能力。式(28)~式(30)为储能运行约束, 储能应满足

不能同时充、放电，且充放电功率不能超过其额定功率。式(31)为储能容量约束，在一个调度周内储能总充电功率应与放电功率近似相等。式(32)为储能运行状态约束，其中 $E_{ES}(t)$ 表示储能装置在时刻 t 具有的储电量； n_{es_ch} 、 n_{es_dis} 分别表示储能充、放状态下的运行效率； ΔT 为单位时长。式(33)为储能装置的储电量约束，应时刻满足储能容量保持在一定范围内。

3.3 求解算法

本文所涉及的能效最优配置模型为含有约束条件的非线性规划问题，利用单目标进化遗传算法，采用精英保留策略，结合实值编码，通过简化的遗传过程实现对复杂搜索空间的启发式搜索，最终实现在较大的概率下找到全局最优解。其中算法流程如图 6 所示。

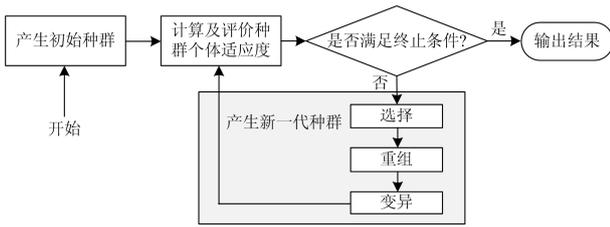


图 6 遗传算法求解流程图

Fig. 6 Flow chart of genetic algorithm solution

初始阶段，获取配电系统的相关参数如线路长度、负荷功率等。对储能功率等决策变量进行编码，并随机产生初始种群，结合参数设置与目标函数表达式对产生种群的适应度进行计算与评价。通过判断是否达到设置的最大遗传代数，不断进行个体的选择、重组以及变异，在约束条件内不断对储能决策变量进行寻优。最终得到满足目标函数即总运行费用最低且符合约束条件的储能决策变量。

3.4 优化运行评价指标

依据前文，对于低压配电系统的运行经济性而言，功率损耗的数值大小与不同分布时序均是影响因素，因此引入了以下评价指标，分别从损耗数值以及结合分时电价的时序性角度对优化结果进行评估。

1) 损耗削减率

对储能配置前后配电系统的总损耗进行统计后，可以计算得到损耗削减率 $R_{lossred}$ ，表征储能接入对系统整体损耗的影响程度，表达式为

$$R_{lossred} = \frac{\sum_{t=1}^T P_{loss_ex}(t) - \sum_{t=1}^T P_{loss}(t)}{\sum_{t=1}^T P_{loss_ex}(t)} \times 100\% \quad (34)$$

式中： $P_{loss}(t)$ 为前文定义过的考虑储能配置的系统实时损耗； $P_{loss_ex}(t)$ 为未考虑储能配置的系统实时损耗。

2) 损耗费用节约率

根据储能运行策略制定时的目标，对配电系统功率损耗产生的运行费用进行统计，结合分时电价 $F(t)$ 计算得到交直流配电网的损耗费用节约率 $R_{losscos}$ ，表达式为

$$R_{losscos} = \frac{\sum_{t=1}^T P_{loss_ex}(t) \cdot F(t) - \sum_{t=1}^T P_{loss}(t) F(t)}{\sum_{t=1}^T P_{loss_ex}(t) F(t)} \times 100\% \quad (35)$$

4 算例分析

以深圳中美中心示范工程为研究对象，利用其设备参数与典型日负荷及光伏出力数据展开讨论。按照示范工程的设计要求，储能主要分为集中式、分散式以及末端配置三种类型，本文以集中式储能为研究对象，对其运行模式及能效特性进行讨论。

算例采用的电价情况如表 2 所示，为深圳地区商业分时电价。

表 2 分时电价

Table 2 Time-sharing tariff

	峰	平	谷
电量电价/ (元/kWh)	1.025	0.672 4	0.228 4
用电时段	09:00—11:30、 14:00—16:30、 19:00—21:00	07:00—09:00、11:30—14:00、 16:30—19:00、21:00—23:00	23:00— 次日 07:00

典型日负荷曲线以及光伏出力曲线如图 7 所示。负荷具有较为典型的办公区域用电特征，负荷较为集中地分布在工作时间(08:00—20:00)，且随着休息时间(21:00—次日 07:00)的到来明显减小。同时，通风与部分照明 24 h 不断电工作，但总量较小。

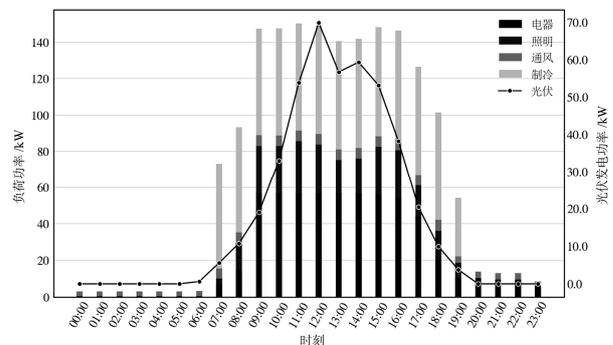


图 7 典型日负荷及光伏用电特征

Fig. 7 Typical daily load and photovoltaic characteristic

交流与直流配电系统的总投资成本以建设初期所设计的容量为标准, 综合考虑换流站、断路器与线路等设备的造价可以得到交流与直流配电网的投资建设费用 F_{C_AC} 与 F_{C_DC} 分别取 46.14 万元与 59.98 万元。

4.1 未配置储能时交流与直流配电系统损耗比较

根据系统实时负荷需求及光伏出力曲线可计算得到, 当未计及储能接入时, 交流与直流配网中主线路各时刻的实际并网功率 ($P_{load_grid}(t) - P_{pv_grid}(t)$) 及损耗功率如图 8 所示。

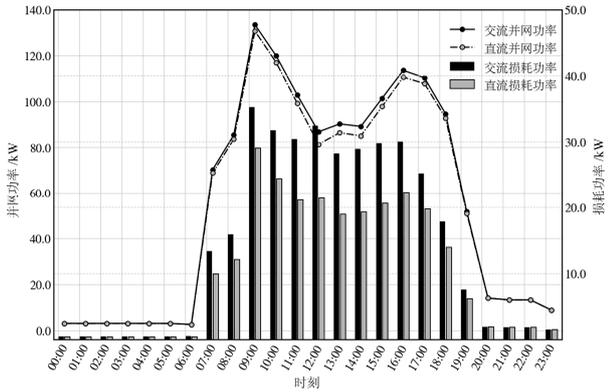


图 8 交流与直流并网功率及损耗功率

Fig. 8 AC and DC grid-connected power and loss power

可以看出, 交流并网功率大于直流并网功率, 同时交流配电网的损耗整体大于直流配电网, 损耗总体趋势与不同时间节点的负荷功率与光伏出力相关。对两个系统中各部分的损耗进行分解, 可以得到如图 9、图 10 所示的损耗组成情况。

由图 9 系统损耗时间分布结果可知, 各时刻直流配网的整体损耗水平均低于交流配网。两个系统典型日内各时刻总损耗的变化趋势与日负荷曲线呈

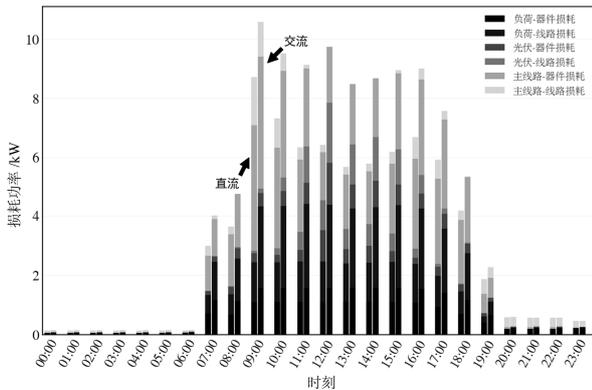


图 9 低压交流与直流配网不同时刻损耗功率组成

Fig. 9 Loss power composition of low voltage AC and DC distribution networks at different time

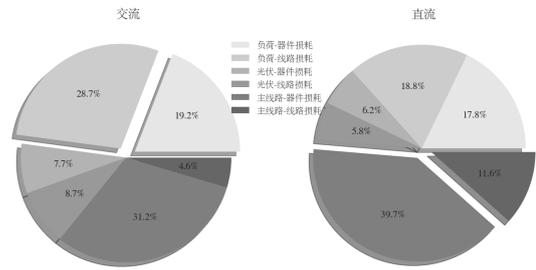


图 10 典型日交流与直流配网总损耗功率组成情况

Fig. 10 Total loss power composition of AC and DC

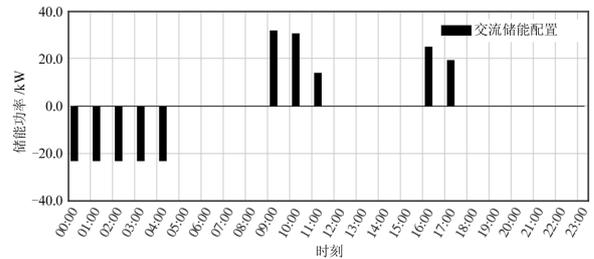
distribution networks on typical day

现明显的相关性, 在损耗组成方面, 随着光伏出力的增加, 光伏器件和线路部分的损耗占比明显增加, 体现了系统损耗组成的时空分布差异特性。

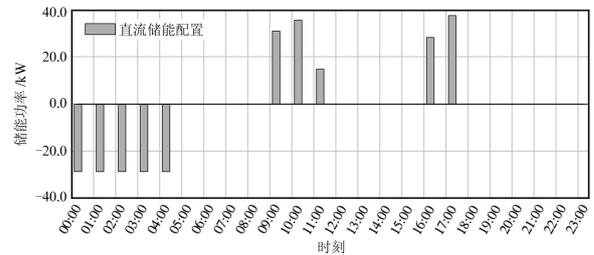
由图 10 系统总体损耗统计情况可知, 对于交流配电系统, 由负荷侧器件产生的功率损耗占主要部分, 而对于直流配电系统, 负荷侧、光伏侧损耗占比较低, 但主线路产生的器件损耗较大, 这是由于直流换流环节少、效率较高, 且同等输送功率下线路损耗较低, 但是相比于交流配电系统, 直流配网需要在主线路增加 AC-DC 换流环节, 因此主线路损耗占比相应增加。

4.2 储能接入后交流与直流配网运行优化结果

考虑系统接入额定容量为 40 kW/150 kWh 的储能设备, 基于仿真系统数据以及分时电价策略, 分别对交流与直流配网中的储能运行策略进行优化, 结果如图 11 所示。



(a) 交流



(b) 直流

图 11 交流与直流配电网储能优化运行结果

Fig. 11 Energy storage optimized operation results of AC and DC distribution networks

由图 11 的优化结果可知,在分时电价策略驱动下,交流与直流配网中储能充放电时段基本相同,但是在运行成本最优目标下,2 个系统中各时段储能充放电功率有一定差异。可以看出,满足经济性最优的前提下,直流系统中储能的最优充放电功率均大于交流系统,即在直流配网中配置更多的储能有利于提升系统整体运行经济性。

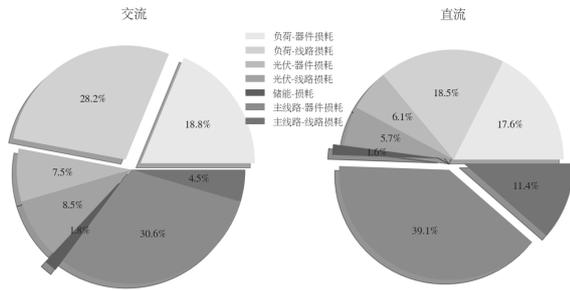


图 12 储能配置后的典型日交流与直流配网总损耗功率组成情况

Fig. 12 Total loss power composition of AC and DC distribution networks on typical day after energy storage configuration

由图 12 损耗功率组成情况可知,系统各部分损耗组成比例没有显著变化,但总损耗略有减小。

4.3 交流与直流配电网配置储能前后运行指标对比

根据式(32),统计后可以得到交流与直流配电系统的损耗削减率分别为 0.59%与 2.73%。对于直流配电系统而言,储能未接入时,占总损耗比例最大的为主线路部分(图 10),储能的接入对于负荷侧与光伏侧的损耗没有影响,但减小了来自主线路的实际并网功率,使得主线路损耗得到一定削减。同时储能的接入增加了储能侧的器件损耗与线路损耗,主线路与储能侧两部分综合计量得到总损耗是减小的;而对于交流配电系统而言,储能的接入并没有为整体损耗的削减起到明显的作用。然而不能仅以损耗的数值判断储能接入的效果,而应该完整考虑储能接入后削峰填谷对峰谷电荷的转移作用。

根据式(33)计算得到,交流与直流配电系统的运行费用节约率分别为 6.02%与 10.79%,可以看出尽管在损耗削减率上交直流系统的整体作用并不明显,但在改善负荷峰谷特性上更能体现储能优势。除此之外,直流配电系统接入储能后对电费的节约效果更为明显,约为交流配电网的 2 倍,同时,直流配电网对主线路功率的最大值削减作用优于交流配电网,对于电网的长期经济性运行具有一定的积极意义。

式(20)中,统计时长 D 取 365 天,生命周期 Y 取 15 年,折现系数 D_T 取 0.8,运维率 D_m 取 5%,可得到交流与直流配电网的运维费用 F_{M_AC} 、 F_{M_DC} 。按照储能装置成本 F_{es} 为 1500 元/kWh 进行计算,储能接入后系统投资成本增加,可以重新统计得到储能接入后的总运行费用。同时,按照式(20)—式(22)分别对总运行费用、总购电费用以及运行中的单位成本进行统计。

从图 13—图 15 可知,储能接入前后,长期运行下的直流配电网总运行费用均低于交流配电网。但与此同时随着储能的接入,交流与直流的运行维护费用均明显增加,使得储能接入后的总运行费用整体上大于接入之前。随着运行时间的增加,总运行费用与总购电费用不断增加,储能的接入在建设初期增加了单位成本,但在第 8 年左右呈现出一定的优势,使得储能接入后的配电网单位成本有所降低,且同期直流配电形式的运行单位成本要低于交流配电形式。

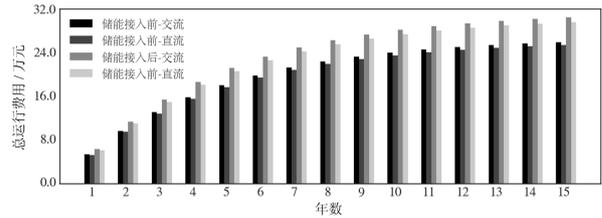


图 13 总运行费用

Fig. 13 Total operating expenses

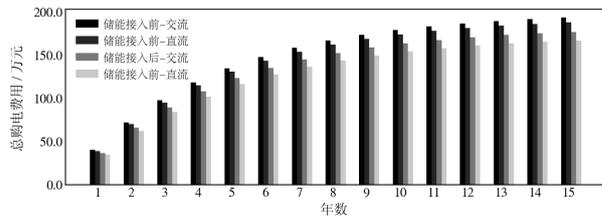


图 14 总购电费用

Fig. 14 Total electricity purchasing expenses

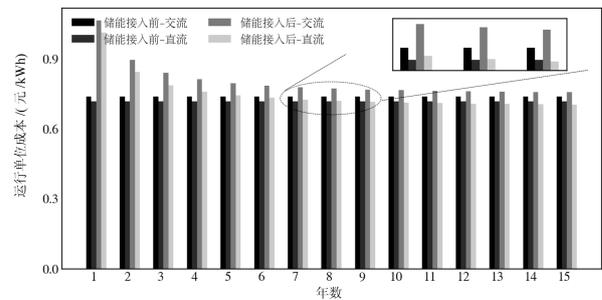


图 15 运行单位成本

Fig. 15 Unit cost in operation

可见配置储能装置的主要经济性作用在于其削峰填谷转移负荷的作用, 直接减少了低压配电网从主电网购电的总费用。与此同时, 随着储能装置的接入, 配电网运行中产生的功率损耗减小, 体现在经济上即为负荷相同时, 从主电网所需购电的总量减少, 间接使得总购电费用减少, 对配电网的整体运行经济性有利。

尽管储能的接入对于配电网整体经济性没有显著提升, 但对于部分配电系统而言, 为分布式发电部分配置储能电池是必要环节。同时, 储能装置的安装考虑到了削峰填谷的作用, 为主电网的安全可靠运行提供了保障, 从此角度上分析, 直流配电网具有一定优势。随着储能技术的不断发展, 相应的投资成本与运维成本都会逐渐下降, 直流配电网将会呈现出更大的优势, 发挥更大的作用。

4.4 储能系统容量与配电网长期经济性的关系

结合上述讨论方法, 改变储能系统的容量, 在 40 kW/150 kWh 的基础上分别增加、减少一定的额定容量与额定功率, 调整为 50 kW/200 kWh 与 30 kW/120 kWh, 比较长期运行下的运行单位成本。相关结果如图 16 所示。

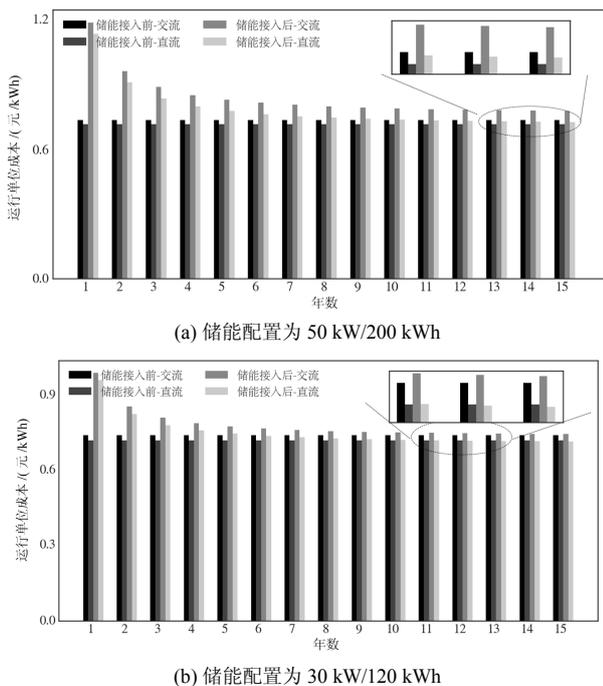


图 16 不同储能配置下运行单位成本比较

Fig. 16 Comparison of operating unit cost under different energy storage configurations

由图 16 可知, 适当增加储能配置额定容量后, 由于储能装置投资成本的增加使得初期运行单位成本较高, 且在长期运行中, 削峰填谷等经济性措施

未能弥补这一部分投资的增长, 使得储能接入后整体的运行费用增加。当减小一定额定容量后, 初期的成本减小, 且随着时间的推移, 在第 12 年左右接入储能的直流配电形式呈现出了较好的经济性。因此, 储能系统的配置情况对配电网长期运行的经济性影响主要受储能装置成本增加与储能削峰填谷减小购电费用两方面影响。同时, 储能装置的接入使得直流配电网整体经济性优于交流配电网, 且可以利用相关算法确定有利用长期运行经济性的储能运行方式。

5 结论

随着多类型分布式电源接入及直流配电技术的快速兴起, 对低压交流与直流配网运行经济性进行定量评估具有重要意义。针对这一问题, 本文建立了以损耗为核心的低压交流与直流配电系统经济性对比评估模型, 在建立了详细的各类型设备以及系统级损耗评估模型基础上, 以运行经济性为优化目标, 建立了考虑储能充放电状态的配网运行策略优化模型, 基于损耗和经济性提出了交、直流系统优化运行对比评价指标, 最后基于深圳中美中心低压直流示范工程数据开展仿真分析。本文的主要结论如下:

(1) 未配置储能时, 交流配电系统损耗总体高于直流配电系统, 其中对于交流系统, 损耗主要产生于负荷侧, 包括负荷侧的器件损耗以及线路损耗。主要原因是交流系统中大量的电力电子转换器件降低了整体的功率转换效率; 对于直流系统, 损耗主要产生在主干路上, 因为 AC-DC 换流器的存在使得主干路的损耗组成成分高于交流对应部分。

(2) 储能的不同运行状态对系统总损耗的影响不尽相同, 利用指数函数表达式对器件的功率-效率曲线进行拟合后, 当储能处于放电状态时, 配电系统总损耗存在局部极小值点, 使得储能放电的配置依赖于其额定值的设置; 当储能处于充电状态时, 配电系统的总损耗随储能运行功率的增加而增加, 对于整体能效是一个不利因素, 因此储能的运行优化应从局部辐射到整体, 综合考虑。

(3) 配置储能后, 交流与直流配电系统的总损耗均有所降低, 但由于储能自身运行产生的损耗增加使得总损耗的变化不明显。同时, 储能的投入使得相关造价与运行成本增加, 但由于储能装置转移负荷的作用也降低了购电费用。比较可知, 长期运行下直流配电系统的初期单位成本高于交流配电系统, 但随着时间增加, 由于直流系统的损耗费用少, 运行单位成本会逐渐低于交流, 且随着储能技术的

不断发展, 储能装置的造价降低, 直流配电系统将表现出更好的运行经济性。

参考文献

- [1] 周逢权, 黄伟. 直流配电网系统关键技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 62-67.
ZHOU Fengquan, HUANG Wei. Study on the key technology of DC distribution power network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 62-67.
- [2] 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 Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.
- [3] 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 Daozhuo, ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 98-104.
- [4] 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.
- [5] SCIANO D, RAZA A, SALCEDO R, et al. Evaluation of DC-Links on dense-load urban distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 31(3): 1-1.
- [6] SANNINO A, POSTIGLIONE G, BOLLEN M H J. Feasibility of a DC network for commercial facilities[J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 2014, 61(4): 1669-1678.
- [7] 胡子珩, 马骏超, 曾嘉思, 等. 柔性直流配电网在深圳电网的应用研究[J]. 南方电网技术, 2014, 8(6): 44-47.
HU Ziheng, MA Junchao, ZENG Jiasi, et al. Research on application of flexible DC power distribution system in Shenzhen Power Grid[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(6): 44-47.
- [8] 刘国伟, 赵宇明, 袁志昌, 等. 深圳柔性直流配电网示范工程技术方案研究[J]. 南方电网技术, 2016, 10(4): 1-7.
LIU Guowei, ZHAO Yuming, YUAN Zhichang, et al. Study on demonstration project technical scheme of VSC-DC distribution system in Shenzhen[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(4): 1-7.
- [9] 任春光, 韩肖清, 王鹏, 等. 交直流混合微电网关键技术及其示范工程[J]. 太原理工大学学报, 2017, 48(3): 486-491.
REN Chunguang, HAN Xiaoqing, WANG Peng, et al. Key technology of AC/DC hybrid microgrid and its demonstration project[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2017, 48(3): 486-491.
- [10] 张永明, 丁宝, 傅卫东, 等. 基于直流配电与直流微网的电气节能研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 389-397.
ZHANG Yongming, DING Bao, FU Weidong, et al. Electrical energy conservation based on DC distribution and DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 389-397.
- [11] 丁明, 史盛亮, 刘新宇, 等. 交直流混合微网优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 23-31.
DING Ming, SHI Shengliang, LIU Xinyu, et al. Study of optimal configuration of a hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 23-31.
- [12] 刘健, 魏昊焜, 张志华, 等. 未来配电网的主要形态——基于储能的低压直流微电网[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 11-16.
LIU Jian, WEI Haokun, ZHANG Zhihua, et al. Future architecture of power distribution network—low-voltage direct current micro-grids based on energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 11-16.
- [13] 廖建权, 周念成, 王强钢, 等. 直流配电网电能质量指标定义及关联性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6847-6860, 7119.
LIAO Jianquan, ZHOU Niancheng, WANG Qianggang, et al. Definition and correlation analysis of power quality index of DC distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6847-6860, 7119.
- [14] 王成山, 王赛一, 葛少云, 等. 中压配电网不同接线模式经济性和可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(24): 34-39.
WANG Chengshan, WANG Saiyi, GE Shaoyun, et al. Economy and reliability analysis of different connection modes in MV distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(24): 34-39.
- [15] 熊振东, 程鹏. 中压配电网供电方案经济性分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(1): 150-155.
XIONG Zhendong, CHENG Peng. Economy analysis on power supply scheme of medium voltage distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(1): 150-155.

- 150-155.
- [16] 廖国栋, 杨高才, 谢欣涛, 等. 供电方式对中压配电网技术经济性的影响[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 113-118.
LIAO Guodong, YANG Gaocai, XIE Xintao, et al. Influences of power supply modes on techno-economic performance of medium-voltage distribution network[J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 113-118.
- [17] 廖国栋, 谢欣涛, 刘定国, 等. 湖南电网发展 20 kV 配电网的技术经济性研究[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 88-93.
LIAO Guodong, XIE Xintao, LIU Dingguo, et al. Research on techno-economy of adopting 20 kV distribution network in Hunan Power Grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 88-93.
- [18] 冯欣桦, 黎洪光, 郑欣, 等. 计及不确定性的配电网合环点安全性与经济性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 30-37.
FENG Xinhua, LI Hongguang, ZHENG Xin, et al. Security and economy evaluation of closed loop point of distribution network considering uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 30-37.
- [19] 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.
- [20] GERBER D L, VOSSOS V, FENG W, et al. A simulation-based efficiency comparison of AC and DC power distribution networks in commercial buildings[J]. Applied Energy, 2017, 210(15): 1167-1187.
- [21] VOSSOS V, GARBESI K, SHEN H. Energy savings from direct-DC in U.S. residential buildings[J]. Energy and Buildings, 2014, 68(A): 223-231.
- [22] STARKE M R, OLBERT L M, OZPINECI B. AC vs. DC distribution: a loss comparison[C] // Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, April 21-24, 2008, Bogota, Colombia: 1-7.
- [23] FREGOSI D, RAVULA S, BRHLIK D, et al. A comparative study of DC and AC microgrids in commercial buildings across different climates and operating profiles[C] // IEEE 1st International Conference in DC Microgrids, June 7-10, 2015, Atlanta, USA: 159-164.
- [24] NORITAKE M, YUASA K, TAKEDA T, et al. Demonstrative research on DC microgrids for office buildings[C] // IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference, September 28 - October 2, 2014, Vancouver, Canada: 1-5.
- [25] WEISS R, OTT L, BOEKE U L. Energy efficient low-voltage DC-grids for commercial buildings[C] // IEEE First International Conference on DC Microgrids, June 7-10, 2015, Atlanta, USA: 154-158.
- [26] NORITAKE M, HOSHI H, HIROSE K, et al. Operation algorithm of DC microgrid for achieving local production for local consumption of renewable energy[C] // IEEE 35th International Telecommunications Energy Conference, October 13-17, 2013, Hamburg, Germany: 1-6.

收稿日期: 2019-08-14; 修回日期: 2019-12-30

作者简介:

赵政嘉(1994—), 女, 硕士, 研究方向为交直流能效评估; E-mail: hld_zzj@163.com

李海波(1990—), 男, 通信作者, 博士, 助理研究员, 研究方向为高比例可再生能源电力系统及交直流混合电网规划与可靠性; E-mail: lihaibo@tsinghua-eiri.org

赵宇明(1978—), 男, 博士, 教授级高工, 研究方向为柔性直流输配电。E-mail: zhaoym97@sina.com

(编辑 许威)