

考虑光伏消纳的配电网储能与直流选址定容协同规划

宁可儿, 刘俊杉, 张超逸, 顾瀚文, 孙沛霄, 焦在滨*
(西安交通大学电气工程学院, 陕西省 西安市 710049)

Coordinated Planning of Distribution Grid Energy Storage and DC Siting and Sizing Considering Photovoltaic Consumption

NING Keer, LIU Junshan, ZHANG Chaoyi, GU Hanwen, SUN Peixiao, JIAO Zaibin*
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

Abstract: Large-scale distributed PV brings a great impact on the operation of the distribution network. The temporal variation and regional differences of distributed PV generation bring challenges to effective renewable energy consumption. Therefore, a coordinated planning framework of energy storage systems (ESSs) and DC lines in distribution networks is proposed in this paper. By installing ESSs, peak cutting and valley filling of power can be realized to improve the time fluctuation imbalance of PV. By building DC lines, energy mutual aid can be realized to improve the uneven distribution of regional PV. The goal of the model is to minimize the total cost composed of investment cost, maintenance cost, and power cost. Then, siting and sizing planning of AC/DC distribution networks with ESSs and DC lines is designed, and intra- and inter-regional PV spillover is improved. Finally, the proposed model is tested on a modified IEEE 13-bus system, and the validity and rationality of the model are verified.

Keywords: distribution network; photovoltaic consumption; energy storage; direct current; siting and sizing

摘要: 大规模分布式光伏的接入将对配电网的安全经济运行带来重要影响, 分布式光伏发电的时效性变化和光伏装机的区域性差异为有效进行新能源消纳带来挑战。为此, 通过提出配电网储能与直流线路协同规划架构, 针对光伏随时间波动的不平衡, 使用储能装置进行电能存储, 实现电力的削峰填谷。针对区域光伏分布不均, 通过建设直流线路以实现区域间能量互济, 消纳光伏溢出区域的发电量。进一步, 以

投资成本、维护成本和电能费用构成的年综合费用最小为目标, 构建储能及直流线路选址定容的交直流配电网优化规划问题, 实现区域内和区域间光伏溢出功率的高质量、高经济性消纳。最后, 基于改进的IEEE 13节点算例及多种规划方案, 对比验证了模型的有效性与合理性。

关键词: 配电网; 光伏消纳; 储能; 直流; 选址定容

0 引言

新型电力系统的建设促进了以风电和光伏为代表的新能源的发展^[1]。截至2021年年底, 中国分布式光伏装机达到1.075亿kW, 约占全部光伏发电并网装机容量的1/3^[2]。到2025年, 中国新能源装机将超过9亿kW^[3]。然而, 具有随机性、波动性的大规模分布式光伏接入将会对配电网的安全经济运行带来影响^[4]。通过扩大电网规模或建设汇流站解决其大范围的消纳问题, 也会造成各级电网电能质量下降、调峰困难, 能源转换效率低等问题。

储能与直流配电技术的发展, 为未来配电网满足分布式电源溢出功率的灵活调控、多样化供需互动带来了新的解决方案。当新能源和直流负荷接入配电网后, 传统交流配电系统会向交直流混合系统转变, 相应的网络架构、控制方式以及配电网综合性能、新能源消纳和经济性也会发生变化^[5]。在交直流混合配电网中, 分布式电源与储能接入直流侧将能够节省大量换流环节, 提升能量利用率, 并起到削峰填谷的作用^[6]。通过协调优化储能的充放电及换流站的无功补偿, 可以确保配电系统安全运行^[7]。

在利用储能提升消纳能力方面, 文献[8]综合考虑了储能与光伏出力、负荷间时序的配合, 提出高光伏

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(面向中低压配电网的功率溢出型分布式电源接入与协同优化规划技术与示范研究, 5400-202220146A-1-1-ZN)。

Science and Technology Foundation of SGCC (Research on the Access and Collaborative Optimization Planning Technology of Power-overflow Distributed Power Supply for Medium and Low Voltage Distribution Networks, 5400-202220146A-1-1-ZN).

渗透率配电网中分布式储能的选址定容方案。文献[9]根据网架结构和负荷特性对配电网进行集群划分,建立了分布式光伏与储能双层协调选址定容规划模型。文献[10]通过建立储能的经济评估模型,对其参与削峰填谷、提高新能源消纳能力两种应用场景进行了经济性分析。文献[11]以新能源消纳为目标,提出以Nas电池为主的大规模多储能组合应用方案。

在利用直流线路提升消纳能力方面,文献[12]建立了考虑跨区直流功率优化的新能源消纳能力计算模型,针对多地区测算了跨区特高压直流互补促进新能源消纳的效果。文献[13]在输电网层面,提出风电就地消纳和跨区消纳的综合经济调度方法。文献[14]以运行成本和弃风量最小为目标,建立了跨区电网直流联络线运行优化模型,提升了网络的运行经济性。

在消纳水平方面,文献[15]总结了中国存在的五种风光消纳模式的现状与特点。文献[16]从规划设计、装备研发、灵活调控、仿真测试等几个方面介绍分布式发电并网消纳的关键技术,并结合示范应用对分布式发电集群的发展进行了展望。文献[17]提出了不同的配电网供电模式,得到交直流混合配电网在消纳高渗透率分布式电源及电动汽车方面优于传统交流配电网,且能通过换流器的功率控制进一步提升消纳能力。

然而,现有文献的工作大多只考虑配置储能装置来配合高渗透率分布式电源,或在输电网层面搭建高压直流线路实现电能输送以实现新能源的消纳。尚未形成储能与直流线路在配电网中消纳分布式电源溢出功率的协同优化。目前,溢出型分布式电源在中低压配电网中,尚未形成经济高效、安全可靠、体系成熟的消纳模式,导致电网电能质量问题长期存在,可概括为以下几个方面:①传统交流配电网作为电能分配的载体,馈线之间及台站之间联络性差,功率潮流控制困难,整体协同运行能力不足,灵活性差^[18];②中低压配电网(特别是农村配电网)运维能力不足,缺少利用储能和柔性负荷等设备提高分布式电源功率就地消纳的经济运行模式;③配电设备无法支撑大规模溢出型分布式电源的高质量消纳,配电变压器按照功率单相流动设计,溢出功率上送导致设备损耗增大,从而降低设备使用寿命^[19]。

针对以上问题,本文首先提出考虑光伏消纳的配电网储能与直流线路协同规划架构,通过在区域内装

设储能进行电能存储,实现削峰填谷。通过在区域间建设直流线路以缓解光伏的地理分布不平衡,从而在区域内和区域间协同形成分布式光伏消纳体系。其次,构建储能与直流选址定容协同规划模型,以年综合费用最小为目标,提出描述储能装置、直流线路、交流配电网的约束条件,构建储能及直流线路选址定容的交直流配电网优化规划问题,以实现光伏在区域内和区域间的高质量、高经济性消纳。

1 储能与直流线路协同规划架构

分布式电源功率溢出指分布式电源发电出力大于本地消纳能力。在光伏溢出严重的配电区域,光伏分布的不平衡是亟待解决的主要问题^[20]。光伏分布的不平衡主要体现在时间和空间两个方面。光伏时间的不平衡指光伏一天内各时间段出力不均,通常正午出力最大,夜晚出力最小,造成发电与负荷需求不匹配的问题。光伏空间上的不平衡指不同区域的光伏装机容量受地形,成本等因素分布不均,造成了光伏就地消纳困难问题。

直流输电具有能够远距离大功率输电、便于控制、线路走廊窄、能量损耗小、能够联系不同频率或非同步运行的交流系统等优势^[21],更适合支撑配电网的互联,为区域间能量双向流动提供通道。储能装置则具有充放电快速、灵活多样、配置方便、改善电能质量等优势^[22]。二者协同优化,发挥特长,既能够提升新能源消纳能力,也能够提高配电网传输效率,是配电网新能源消纳的新模式。因此,本文提出配电网储能与直流线路协同规划架构,如图1所示。针对光伏时间的不平衡,通过装设储能装置进行电能存储,实现电力的削峰填谷。针对区域光伏分布不均,通过建设直流线路以实现区域间能量互济,消纳光伏溢出区域的发电量。

在储能与直流线路的协同规划问题中,需要着重考虑以下问题:①储能装置为时间尺度耦合器件,因此需要建立动态时间的系统潮流模型;②在交流配电网区域间架设直流输电线路,需要进行交直流混联配电网的潮流模型设计;③为了实现储能和直流协同规划,在模型设计中,储能的容量、荷电量以及直流线路的容量均需要作为决策变量引入模型中,且与器件的选址0-1决策变量进行有效耦合。储能与直流线路协同规划模型将在后续章节详细介绍。

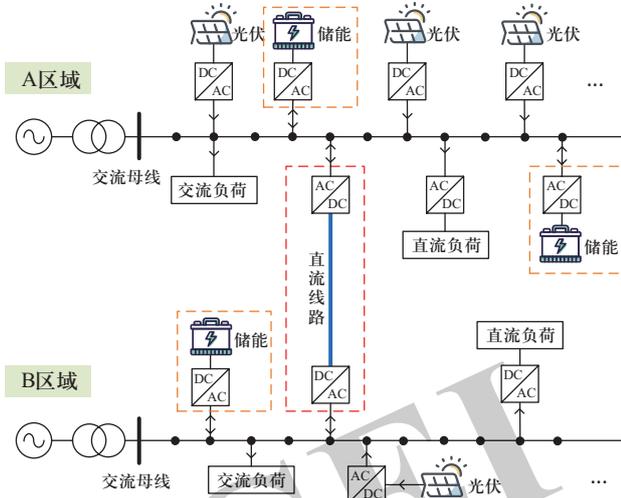


图1 配电网储能与直流线路协同规划架构

Fig. 1 Coordinated planning framework of energy storage systems and DC lines in distribution networks

2 储能与直流选址定容协同规划模型

2.1 目标函数

$$\min(C_I + C_M + C_P) \quad (1)$$

式中: 目标函数由投资成本 C_I 、维护成本 C_M 和电能费用 C_P 相加组成, 表示年综合费用最小。

2.1.1 投资成本

投资成本主要包括设备的一次投资成本及建设成本。一次投资成本包含投资储能、直流线路和直流线路两端换流器的成本。由于储能设备往往内置有与其配套的换流装置, 因此, 不单独考虑储能接入交流电网的换流器成本。此外, 本模型在已有光伏发电装置的配电网系统基础上进行储能和直流协同的规划方案, 因此, 光伏装置接入交流电网的逆变器设备也不计入规划成本中。进一步, 建设成本一般按工程一次投资成本的百分比 α (5%~10%) 选取^[23]。故等年值投资成本为

$$C_I = (1 + \alpha)(C_{IESS} + C_{IL} + C_{Icon}) = (1 + \alpha) \left[\sum_{e \in E} R^{ESS} (C_e^I E_e^R + C_p^I S_e^E S_B) + \sum_{i, j \in N^{VSC}} R^L C_1^I l_{ij} x_{ij}^S + \sum_{i \in N^{VSC}} R^T C_{con}^I S_i^S S_B \right] \quad (2)$$

式中: C_{IESS} 、 C_{IL} 、 C_{Icon} 分别为储能、直流线路、直流线路两端换流器的等年值投资成本; C_e^I 、 C_p^I 、 C_1^I 、 C_{con}^I 分别为储能单位能量容量投资成本、储能

单位功率容量投资成本、直流线路单位长度投资成本、换流器单位容量投资成本; E_e^R 、 S_e^E 、 l_{ij} 、 S_i^S 分别为储能额定能量容量、储能额定功率、直流线路 ij 的长度和节点 i 处换流器额定容量; S_B 为系统功率基准值; x_{ij}^S 表征直流线路是否建设到预定位置, 取“1”表示直流线路 ij 建设到预定位置, 取“0”则表示不建设; $R^{ESS} = \frac{r(1+r)^{y_{ESS}}}{(1+r)^{y_{ESS}} - 1}$ 、 $R^L = \frac{r(1+r)^{y_L}}{(1+r)^{y_L} - 1}$ 、 $R^T = \frac{r(1+r)^{y_T}}{(1+r)^{y_T} - 1}$ 分别为储能、直流线路和换流器的资本回收率; r 为贴现率, 一般取0.06^[9]; y_{ESS} 、 y_L 、 y_T 分别为储能、直流线路和换流器的使用年限; E 为储能装置所在节点的集合; N^{VSC} 为换流站连接的交流节点集合。

单位功率容量投资成本、直流线路单位长度投资成本、换流器单位容量投资成本; E_e^R 、 S_e^E 、 l_{ij} 、 S_i^S 分别为储能额定能量容量、储能额定功率、直流线路 ij 的长度和节点 i 处换流器额定容量; S_B 为系统功率基准值; x_{ij}^S 表征直流线路是否建设到预定位置, 取“1”表示直流线路 ij 建设到预定位置, 取“0”则表示不建设; $R^{ESS} = \frac{r(1+r)^{y_{ESS}}}{(1+r)^{y_{ESS}} - 1}$ 、 $R^L = \frac{r(1+r)^{y_L}}{(1+r)^{y_L} - 1}$ 、 $R^T = \frac{r(1+r)^{y_T}}{(1+r)^{y_T} - 1}$ 分别为储能、直流线路和换流器的资本回收率; r 为贴现率, 一般取0.06^[9]; y_{ESS} 、 y_L 、 y_T 分别为储能、直流线路和换流器的使用年限; E 为储能装置所在节点的集合; N^{VSC} 为换流站连接的交流节点集合。

2.1.2 维护成本

维护成本包括设备运行维护中的材料费用和人工费用。根据实际工程运行经验, 维护费用可简化为系统一次投资成本的一定比例。

$$C_M = \beta_e C_{IESS} + \beta_l C_{IL} + \beta_{con} C_{Icon} \quad (3)$$

式中: β_e 为储能维护成本占其一次投资成本的比例; β_l 为直流线路的维护成本占其一次投资成本的比例; β_{con} 为换流器的维护成本占其一次投资成本的比例。 β 一般取1%~4%^[23]。

2.1.3 电能费用

本文聚焦于以年为单位的长期规划问题, 因此不考虑季节特征下的光伏出力和负荷差异问题, 选取一天作为典型场景中可叠加计算的最小单元。光伏发电装置无法完全满足本地负荷, 因此系统存在从公共电网进行购电的需求。此费用与不同时刻的用电需求和电价有关, 电能费用可以表示为

$$C_P = 365 \sum_{\substack{i \in N^{Sub} \\ t \in T}} C_t^{elec} P_{i,t}^{Sub} S_B \Delta t \quad (4)$$

式中: C_t^{elec} 为典型场景中 t 时刻的电价; $P_{i,t}^{Sub}$ 为 t 时刻变电站注入节点 i 的有功功率; N^{Sub} 为变电站节点集合; T 为规划时间集合 (24 h)。

2.2 约束条件

2.2.1 储能装置约束

式(5)表示储能选址决策与充放电状态的逻辑关系。 x_e^E 表征储能 e 是否投入到预设位置, 取“1”表示投入到预定位置, 取“0”表示不投入。 x_e^E 取0时, $x_{e,t}^D$ 和 $x_{e,t}^C$ 也均取0, 即未配置储能的位置其充放电功率为0。当 x_e^E 取1时, $x_{e,t}^D + x_{e,t}^C \leq 1$, 这一约束保证了配置储

能的位置不允许同时充放电。

$$x_{e,t}^D + x_{e,t}^C \leq x_e^E, \forall e \in E, \forall t \in T \quad (5)$$

式中： $x_{e,t}^D$ 和 $x_{e,t}^C$ 表征储能 e 在时间 t 的放电/充电状态指示变量，取“1”表示处于放电/充电状态，取“0”表示处于非放电/充电状态。

式(6) — (9)为储能充放电指示变量对功率值的约束。式(10) — (11)为储能容量约束。考虑到分布式光伏大规模接入情况下配电网的电压越限问题，设置储能具有无功调节能力，在一定程度上改善配电网电压越限问题，并减少网损^[24]。

$$0 \leq P_{e,t}^D \leq Mx_{e,t}^D, \forall e \in E, \forall t \in T \quad (6)$$

$$0 \leq P_{e,t}^C \leq Mx_{e,t}^C, \forall e \in E, \forall t \in T \quad (7)$$

$$-Mx_{e,t}^D \leq Q_{e,t}^D \leq Mx_{e,t}^D, \forall e \in E, \forall t \in T \quad (8)$$

$$-Mx_{e,t}^C \leq Q_{e,t}^C \leq Mx_{e,t}^C, \forall e \in E, \forall t \in T \quad (9)$$

$$(P_{e,t}^D)^2 + (Q_{e,t}^D)^2 \leq (S_e^E)^2, \forall e \in E, \forall t \in T \quad (10)$$

$$(P_{e,t}^C)^2 + (Q_{e,t}^C)^2 \leq (S_e^E)^2, \forall e \in E, \forall t \in T \quad (11)$$

式中： $P_{e,t}^C$ 和 $Q_{e,t}^C$ 分别为储能充电有功和无功功率； $P_{e,t}^D$ 和 $Q_{e,t}^D$ 分别为储能放电有功和无功功率； M 为一个足够大的正数。

考虑储能装置的工作寿命，其荷电状态应保持在一定范围内，如式(12)所示。式(13) — (14)表示储能的充放电功率约束。

$$E_e^R S_e^{\min} \leq E_{e,t}^E \leq E_e^R S_e^{\max}, \forall e \in E, \forall t \in T \quad (12)$$

$$E_{e,t}^E = E_{e,t-1}^E + \left(\eta_e^C P_{e,t-1}^C - \frac{1}{\eta_e^D} P_{e,t-1}^D \right) \Delta T, \quad \forall e \in E, t = 2, 3, \dots, T \quad (13)$$

$$E_{e,0}^E = E_e^E, \forall e \in E \quad (14)$$

式中： $E_{e,t}^E$ 为储能装置 e 在 t 时刻的储存能量； S_e^{\min} 和 S_e^{\max} 分别为储能装置的最小和最大荷电比例； η_e^C 和 η_e^D 分别为储能充放电的效率； ΔT 为单位时间槽，一般为1 h。

式(15) — (16)表示储能的选址决策与其容量及电荷量的关系。

$$0 \leq S_e^E \leq Mx_e^E, \forall e \in E \quad (15)$$

$$0 \leq E_e^R \leq Mx_e^E, \forall e \in E \quad (16)$$

2.2.2 直流线路约束

考虑建设如图2所示的双端直流线路用以传输光伏的溢出电能，实现光伏的区域间消纳。双端直流工程由一条直流线路和两端换流站组成，将换流站建模为等效阻抗和理想换流器的串联。等效阻抗为换流器的等效损耗阻抗和换流变压器阻抗的串联合并。

式(17) — (20)表示换流站等效阻抗两端的潮流关系，式(21)表示换流站的传输容量约束。

$$P_{i,t}^S - I_{i,t}^S R_i^S = P_{i,t}^{SD}, \forall i \in N^{VSC}, \forall t \in T \quad (17)$$

$$Q_{i,t}^S - I_{i,t}^S X_i^S = Q_{i,t}^{SD}, \forall i \in N^{VSC}, \forall t \in T \quad (18)$$

$$U_{i,t} - U_{i,t}^{SD} - 2(R_i^S P_{i,t}^S + X_i^S Q_{i,t}^S) + [(R_i^S)^2 + (X_i^S)^2] I_{i,t}^S = 0, \forall i \in N^{VSC}, \forall t \in T \quad (19)$$

$$I_{i,t}^S = \frac{(P_{i,t}^S)^2 + (Q_{i,t}^S)^2}{U_{i,t}}, \forall i \in N^{VSC}, \forall t \in T \quad (20)$$

$$(P_{i,t}^{SD})^2 + (Q_{i,t}^{SD})^2 \leq (S_i^S)^2, \forall i \in N^{VSC}, \forall t \in T \quad (21)$$

式中： $P_{i,t}^S$ 和 $Q_{i,t}^S$ 表示 t 时刻从节点 i 流向换流器的有功和无功功率； $I_{i,t}^S$ 表示 t 时刻从节点 i 流向换流器的电流幅值的平方； R_i^S 和 X_i^S 表示节点 i 处换流站的等效电阻和电抗； $P_{i,t}^{SD}$ 和 $Q_{i,t}^{SD}$ 表示 t 时刻从交流侧流入节点 i 处理想换流器的有功和无功功率； $U_{i,t}$ 表示 t 时刻交流节点 i 电压幅值的平方； $U_{i,t}^{SD}$ 表示 t 时刻节点 i 处理想换流站交流侧的电压幅值的平方。

式(22)表示换流器传输功率约束。式(23) — (25)为直流线路潮流约束。式(26) — (27)表示直流线路的电压约束。

$$P_{i,t}^{SD} = P_{i,t}^{DC}, \forall i \in N^{VSC}, \forall t \in T \quad (22)$$

$$P_{i,t}^{DC} + P_{j,t}^{DC} - I_{ij,t}^{DC} R_{ij}^{DC} = 0, \forall i, j \in N^{VSC}, \forall t \in T \quad (23)$$

$$U_{i,t}^{DC} - U_{j,t}^{DC} - 2R_{ij}^{DC} P_{ij,t}^{DC} + (R_{ij}^{DC})^2 I_{ij,t}^{DC} = 0, \quad \forall i, j \in N^{VSC}, \forall t \in T \quad (24)$$

$$(P_{i,t}^{DC})^2 = U_{i,t}^{DC} I_{ij,t}^{DC}, \forall i, j \in N^{VSC}, \forall t \in T \quad (25)$$

$$(I_{\min}^{DC})^2 \leq U_{i,t}^{DC} \leq (I_{\max}^{DC})^2, \forall i \in N^{VSC}, \forall t \in T \quad (26)$$

$$U_{i,t}^{SD} \leq U_{i,t}^{DC}, \forall i \in N^{VSC}, \forall t \in T \quad (27)$$

式中： $P_{i,t}^{DC}$ 表示 t 时刻节点 i 处换流站注入直流侧的功率； $I_{ij,t}^{DC}$ 为 t 时刻节点 i 和节点 j 间直流线路流过电流幅值的平

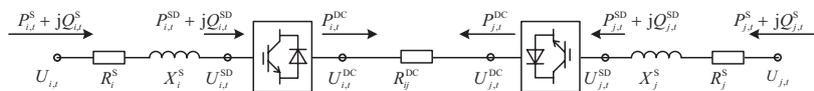


图2 双端直流线路等效电路

Fig. 2 Double-terminal DC equivalent circuit

方: R_{ij}^{DC} 为节点 i 和节点 j 间直流线路的电阻; $U_{i,t}^{DC}$ 和 $U_{j,t}^{DC}$ 分别为 t 时刻节点 i 和节点 j 处换流站直流电压的平方; V_{min}^{DC} 和 V_{max}^{DC} 分别为给定的直流电压下限和直流电压上限。

式 (28) 表示换流站容量规划约束。

$$0 \leq S_i^S \leq Mx_{ij}^S, \forall i, j \in N^{VSC} \quad (28)$$

式中: x_{ij}^S 表征是否在 i, j 间搭建直流线路。进一步, 式 (20) 为二次约束, 为便于计算, 可以松弛为式 (29) 并整理为式 (30) 所示的标准二阶锥形式^[25]。

$$I_{i,t}^S \geq \frac{(P_{i,t}^S)^2 + (Q_{i,t}^S)^2}{U_{i,t}}, \forall i \in N^{VSC}, \forall t \in T \quad (29)$$

$$\left\| \begin{array}{l} 2P_{i,t}^S \\ 2Q_{i,t}^S \\ I_{i,t}^S - U_{i,t} \end{array} \right\|_2 \leq I_{i,t}^S + U_{i,t}, \forall i \in N^{VSC}, \forall t \in T \quad (30)$$

同理, 式 (25) 松弛为式 (31) 并整理为式 (32)。

$$(P_{i,t}^{DC})^2 \leq U_{i,t}^{DC} I_{ij,t}^{DC}, \forall i, j \in N^{VSC}, \forall t \in T \quad (31)$$

$$\left\| \begin{array}{l} 2P_{i,t}^{DC} \\ I_{ij,t}^{DC} - U_{i,t}^{DC} \end{array} \right\|_2 \leq I_{ij,t}^{DC} + U_{i,t}^{DC}, \forall i, j \in N^{VSC}, \forall t \in T \quad (32)$$

2.2.3 交流配电网模型

光伏电源有功和无功出力满足一定的功率因数关系, 如式 (33) 所示。

$$P_{i,t}^G = \tan \cos^{-1}(pf_{gpv}) Q_{i,t}^G, \forall i \in G^{PV}, \forall t \in T \quad (33)$$

式中: $P_{i,t}^G$ 和 $Q_{i,t}^G$ 分别为时刻 t 节点 i 处分布式电源注入的有功和无功功率; pf_{gpv} 为光伏电源的功率因数; G^{PV} 为光伏电源所在节点的集合。

变电站从主网购电用于满足区域功率需求, 将其等效为发电节点, 如式 (34) — (35) 所示。考虑到光伏返送会存在一系列的安全问题和接纳问题, 因此设置变电站功率不得倒送, 如式 (36) 所示。

$$P_{i,t}^G = P_{i,t}^{Sub}, \forall i \in N^{Sub}, \forall t \in T \quad (34)$$

$$Q_{i,t}^G = Q_{i,t}^{Sub}, \forall i \in N^{Sub}, \forall t \in T \quad (35)$$

$$P_{i,t}^{Sub} \geq 0, \forall i \in N^{Sub}, \forall t \in T \quad (36)$$

式中: $P_{i,t}^{Sub}$ 和 $Q_{i,t}^{Sub}$ 分别表示 t 时刻主网向变电站注入的有功和无功功率。

式 (37) — (38) 表示节点 j 处的功率平衡方程, 式 (39) — (40) 为交流线路 ij 两端电压与潮流关系。

$$P_{j,t}^L = P_{j,t}^D - P_{j,t}^C + P_{j,t}^G + \sum_{i \in \pi(j)} (P_{ij,t}^B - I_{ij,t}^B R_{ij}) - \sum_{k \in \delta(j)} P_{jk,t}^B - \sum_{j \in N^{VSC}} P_{j,t}^S, \forall j \in N, \forall t \in T \quad (37)$$

$$Q_{j,t}^L = Q_{j,t}^D - Q_{j,t}^C + Q_{j,t}^G + \sum_{i \in \pi(j)} (Q_{ij,t}^B - I_{ij,t}^B X_{ij}) - \sum_{k \in \delta(j)} Q_{jk,t}^B - \sum_{j \in N^{VSC}} Q_{j,t}^S, \forall j \in N, \forall t \in T \quad (38)$$

$$U_{i,t} - U_{j,t} - 2(R_{ij} P_{ij,t}^B + X_{ij} Q_{ij,t}^B) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) I_{ij,t}^B = 0, \forall ij \in L, \forall t \in T \quad (39)$$

$$I_{ij,t}^B = \frac{(P_{ij,t}^B)^2 + (Q_{ij,t}^B)^2}{U_{i,t}}, \forall ij \in L, \forall t \in T \quad (40)$$

式中: $P_{j,t}^L$ 和 $Q_{j,t}^L$ 分别为 t 时刻流出节点 j 的负荷功率; $P_{ij,t}^B$ 和 $Q_{ij,t}^B$ 分别表示线路 ij 上从节点 i 流向节点 j 的有功和无功功率; $I_{ij,t}^B$ 为 t 时刻线路 ij 上流过电流幅值的平方; R_{ij} 和 X_{ij} 分别为线路 ij 的电阻和电抗; L 为负荷节点的集合; $\pi(j)$ 为节点 j 父节点的集合; $\delta(j)$ 为节点 j 子节点的集合; N 为交流节点的集合。式 (40) 为二次约束, 可以类比式 (20) 的简化方法, 便于问题求解。

式 (41) 表示线路潮流功率约束。式 (42) 表示系统节点交流电压约束。

$$(P_{ij,t}^B)^2 + (Q_{ij,t}^B)^2 \leq (S_{ij,max}^B)^2, \forall ij \in L, \forall t \in T \quad (41)$$

$$(V_{min}^{AC})^2 \leq U_{i,t}^{AC} \leq (V_{max}^{AC})^2, \forall i \in N, \forall t \in T \quad (42)$$

式中: $S_{ij,max}^B$ 为线路 ij 的最大传输容量; V_{min}^{AC} 和 V_{max}^{AC} 分别为给定的交流电压下限和交流电压上限。

为便于计算, 基于多边形线性化方法^[26], 将式 (10) 简化为线性约束, 如式 (43) — (45) 所示。式 (11) (21) (41) 的简化也可类比得到。

$$-\sqrt{3}(P_{e,t}^D + S_e^E) \leq Q_{e,t}^D \leq -\sqrt{3}(P_{e,t}^D - S_e^E), \forall e \in E, \forall t \in T \quad (43)$$

$$-\frac{\sqrt{3}}{2} S_e^E \leq Q_{e,t}^D \leq \frac{\sqrt{3}}{2} S_e^E, \forall e \in E, \forall t \in T \quad (44)$$

$$\sqrt{3}(P_{e,t}^D - S_e^E) \leq Q_{e,t}^D \leq \sqrt{3}(P_{e,t}^D + S_e^E), \forall e \in E, \forall t \in T \quad (45)$$

3 算例及结果分析

3.1 场景拓扑及参数选取

将配电网场景划分为两个区域 (以下简称 A 区域、B 区域), 每个区域由 IEEE 13 节点系统构成。配电网网络总共包含 26 个节点, 其中 24 个负荷节点。系统拓扑结构如图 3 所示, 为两个独立辐射状网络。

设置 A 区域和 B 区域的多个节点存在分布式光伏, 且 A 区域存在光伏溢出问题, 最大出力为日最大负荷的 1.5 倍左右。光伏出力和日负荷曲线参考图 4。负荷则存在两个日用电高峰时段, 为典型的居民负荷。

表 1 给出模型求解过程中的参数参考值, 包括交流直流线路参数、储能及直流线路的投资成本、使用年限、换流器投资成本及等效阻抗、储能 SOC 范围及充放电效率、分时电价等。

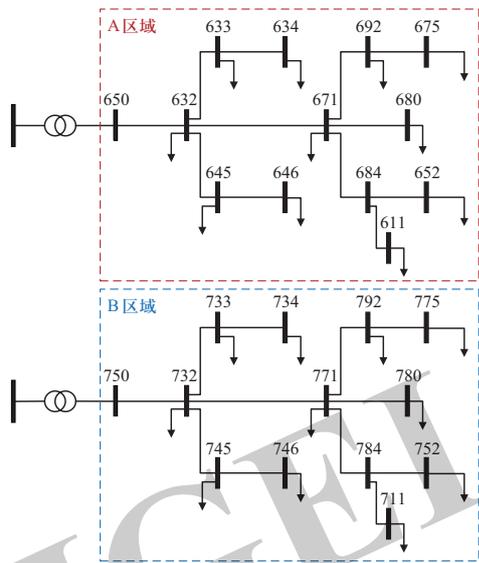


图3 26节点配电网结构拓扑

Fig. 3 26-node distribution network structure topology

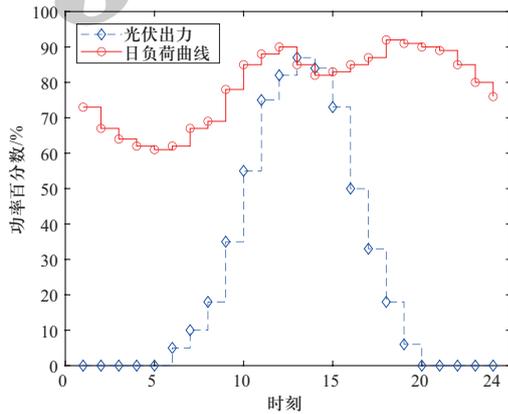


图4 光伏出力及日负荷曲线

Fig. 4 PV output and daily load curve

表1 各部分参数及取值参考表

Table 1 Parameters and value reference table of each part

参数	值
交流线路单位长度电阻/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0.21
交流线路单位长度电抗/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0.40
直流线路单位长度电阻/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0.05
光伏发电功率因数 $\cos\varphi$	0.98
储能SOC上限	0.90
储能SOC下限	0.10
储能充放电的效率	0.85
换流器等效电阻/ Ω	0.50
换流器等效电抗/ Ω	1.50
储能单位荷电量投资成本/(元 $\cdot(\text{kWh})^{-1}$)	980
储能单位容量投资成本/(元 $\cdot(\text{kVA})^{-1}$)	1980

续表

参数	值
换流器单位容量投资成本/(元 $\cdot(\text{kVA})^{-1}$)	1100
直流线路单位长度投资成本/(万元 $\cdot\text{km}^{-1}$)	20
贴现率	0.06
储能使用年限/a	10
直流系统使用年限/a	15
8:00—22:00峰时购电电价/(元 $\cdot(\text{kWh})^{-1}$)	0.80
23:00—7:00谷时购电电价/(元 $\cdot(\text{kWh})^{-1}$)	0.40

充分分析场景拓扑结构,并结合网架结构,对储能与直流进行预选址,具体为:①将储能预置在两区域的“枢纽”节点处(632、671、732、771节点),因为该类型节点位于线路主干,流过功率大,且下接多个负荷节点,功率波动明显,距离各节点的传输距离均衡,产生的功率损耗较小;②考虑区域间距离及地形原因,算例认为645-733、646-734、684-792、652-775节点之间的距离相距较近地形较好,在该处预置直流线路更加符合工程实际且经济性良好。

3.2 协同规划结果及分析

以年综合费用最小为目标,依据优化模型,通过MATLAB R2021b+Gurobi 9.5.0求解,得到储能和直流线路的选址方案如图5所示。

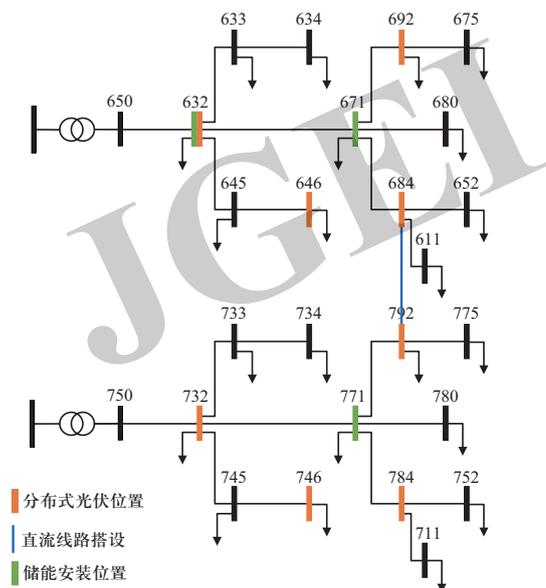


图5 协同优化配置方案

Fig. 5 Collaborative optimization configuration scheme

如图5所示, 得到规划方案为: 在632、671、771节点配置3处储能, 在684-792节点区间配置长度为609.6 m, 两端换流器容量为1.115 8 MVA的直流线路。配置储能容量及荷电量方案如表2所示。

表2 储能容量及荷电量优化配置方案

Table 2 Allocation scheme of ES capacity and state of charge

储能安装位置	容量/MVA	荷电量/MWh
632	0.108 7	0.237 6
671	0.194 5	0.516 9
771	0.096 0	0.193 5

进一步, 根据规划优化结果, 给出24 h两个区域光伏出力波动、负荷曲线以及储能充放电功率、直流线路功率变化曲线, 如图6所示。

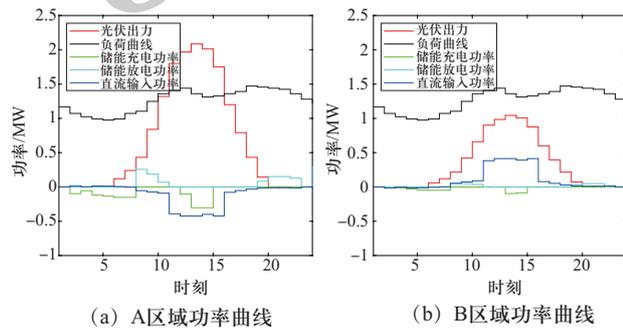


图6 两区域电源负荷、储能与直流功率流动曲线

Fig. 6 PV, load, energy storage, DC power flow curves in two regions

由图6可知, A区域储能在用电高峰期(8:00—11:00, 19:00—23:00)进行放电; 在低谷期(1:00—8:00)进行充电, 调节区域潮流分布; 在光伏溢出明显的中午时段(12:00—15:00)进行充电, 实现对光伏溢出功率的就地消纳, 并通过直流线路将功率输送到B区域以实现对溢出功率的区域间消纳, 同时减少B区域从主网购电的费用, 使得年综合费用最少, 实现储能与直流协同优化。

3.3 算例对比及分析

为对比储能与直流协同优化规划的经济性, 将所得结果与其他三种规划方案结果进行比较, 得到各方案成本对比, 如表3所示。其中, 方案①为不配置任何设备; 方案②为仅配置储能; 方案③为仅配置直流线路; 方案④为本文模型所得结果, 即同时配置储能和直流线路。

表3 4种方案的各项成本及综合费用对比

Table 3 Comparison of various costs and comprehensive costs of the 4 schemes

方案	投资成本/万元	维护成本/万元	电能费用/万元	年综合费用/万元
①	0.00	0.00	919.67	919.67
②	59.06	1.18	841.11	901.35
③	12.30	0.25	862.87	875.42
④	35.14	0.70	832.44	868.28

通过表3对比可知, 电能费用占年综合费用的比例最大, 而方案④通过协同规划储能与直流线路, 既可以实现光伏的就地消纳、能量的削峰填谷, 也可以通过能量传输方式将光伏溢出功率进行区域间消纳, 综合协同方案②与方案③的优势, 改善分布式光伏时间与空间的不平衡, 进而减少电能费用, 经济性最优。

4 结论

为解决配电区域溢出光伏消纳的问题, 针对光伏电源出力在时间和空间两个维度上分布不均的症结, 本文结合储能和直流工程两种解决方案, 建立了储能和直流线路的选址定容协同优化模型, 精确刻画了两者的运行性质, 并全面考虑了投资成本、维护成本、电能损耗成本和可再生能源消纳收益等几类成本和收益, 实现溢出光伏消纳的综合经济效益最大, 并通过基于IEEE标准系统和多个规划方案对比验证了模型的有效性。提升了配电网承载“双向”功率的能力, 解决分布式电源功率“送得出”的问题。

参考文献

- [1] 韩肖清, 李廷钧, 张东霞, 等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高压技术, 2021, 47(9): 3036-3046.
HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046(in Chinese).
- [2] 李曾婷. 分布式光伏国家标准盘点[J]. 电器, 2022(7): 32-33.
LI Zengting. Inventory of distributed photovoltaic national standards[J]. China Appliance, 2022(7): 32-33 (in Chinese).
- [3] 李晖, 刘栋, 姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18):

- 6245-6259.
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6259(in Chinese).
- [4] 沈文涛. 光伏发电并网系统的电能质量问题研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [5] 杨艳会. 以新能源消纳为约束的交直流配电网供电模式研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021.
- [6] 苏伟, 钟国彬, 徐凯琪, 等. 储能技术经济性评估方法综述[J]. 广东电力, 2019, 32(1): 29-35.
SU Wei, ZHONG Guobin, XU Kaiqi, et al. Review of evaluation method for economy of energy storage technology[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(1): 29-35(in Chinese).
- [7] 王守相, 陈思佳, 谢颂果. 考虑安全约束的交直流配电网储能与换流站协调经济调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 85-91.
WANG Shouxiang, CHEN Sijia, XIE Songguo. Security-constrained coordinated economic dispatch of energy storage systems and converter stations for AC/DC distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 85-91(in Chinese).
- [8] 陶琼, 桑丙玉, 叶季蕾, 等. 高光伏渗透率配电网中分布式储能系统的优化配置方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2158-2165.
TAO Qiong, SANG Bingyu, YE Jilei, et al. Optimal configuration method of distributed energy storage systems in distribution network with high penetration of photovoltaic[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2158-2165(in Chinese).
- [9] 丁明, 方慧, 毕锐, 等. 基于集群划分的配电网分布式光伏与储能选址定容规划[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2187-2201.
DING Ming, FANG Hui, BI Rui, et al. Optimal siting and sizing of distributed PV-storage in distribution network based on cluster partition[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2187-2201(in Chinese).
- [10] 李翠萍, 闫佳琪, 孙大朋, 等. 配电网中储能参与多场景的多维经济性评估[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(5): 471-479.
LI Cuiping, YAN Jiaqi, SUN Dapeng, et al. Multi-dimensional economic evaluation of energy storage participating in multi-scenarios in distribution network[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(5): 471-479(in Chinese).
- [11] IBA K. Massive energy storage system for effective usage of renewable energy[J]. Global Energy Interconnection, 2022, 5(3): 301-308.
- [12] 董存, 梁志峰, 礼晓飞, 等. 跨区特高压直流外送优化提升新能源消纳能力研究[J]. 中国电力, 2019, 52(4): 41-50.
DONG Cun, LIANG Zhifeng, LI Xiaofei, et al. Study on power optimization of the trans-regional UHVDC delivery channels in promoting renewable energy accommodation capacity[J]. Electric Power, 2019, 52(4): 41-50(in Chinese).
- [13] 华梦琪. 综合考虑风电就地消纳和跨区消纳的经济调度方法研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021.
- [14] 钟海旺, 夏清, 丁茂生, 等. 以直流联络线运行方式优化提升新能源消纳能力的新模式[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3): 36-42.
ZHONG Haiwang, XIA Qing, DING Maosheng, et al. A new mode of HVDC tie-line operation optimization for maximizing renewable energy accommodation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3): 36-42(in Chinese).
- [15] LI J D, et al. How to make better use of intermittent and variable energy? A review of wind and photovoltaic power consumption in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 137: 110626.
- [16] 盛万兴, 吴鸣, 季宇, 等. 分布式可再生能源发电集群并网消纳关键技术及工程实践[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2175-2186.
SHENG Wanxing, WU Ming, JI Yu, et al. Key techniques and engineering practice of distributed renewable generation clusters integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2175-2186(in Chinese).
- [17] 梁珺, 冯洪涛, 唐巍, 等. 消纳分布式电源和电动汽车的交直流混合中压配电网供电模式[J]. 分布式能源, 2018, 3(1): 39-49.
LIANG Jun, FENG Hongtao, TANG Wei, et al. Power supply mode of hybrid AC/DC medium-voltage distribution network under high penetration of distributed generation and electric vehicle[J]. Distributed Energy, 2018, 3(1): 39-49(in Chinese).
- [18] 许彪, 唐巍, 张璐, 等. 主动配电网多场景直流改造经济性评估方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 50-57.
XU Biao, TANG Wei, ZHANG Lu, et al. Economic evaluation method for multi-scenario DC transformation of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 50-57(in Chinese).
- [19] 欧阳武. 含分布式发电的配电网规划研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [20] 李婷, 胥威汀, 刘向龙, 等. 含高比例可再生能源的交直流混联电网规划技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 177-187.
LI Ting, XU Weiting, LIU Xianglong, et al. Review on planning technology of AC/DC hybrid system with high proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 177-187(in Chinese).
- [21] 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(in Chinese).
- [22] 孙振新, 刘汉强, 赵喆, 等. 储能经济性研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(增刊1): 54-58.

SUN Zhenxin, LIU Hanqiang, ZHAO Zhe, et al. Research on economical efficiency of energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(S1): 54-58(in Chinese).

- [23] LIU Y, YU Z Q, LI H B, et al. The LCOE-indicator-based comprehensive economic comparison between AC and DC power distribution networks with high penetration of renewable energy[J]. Energies, 2019, 12(24): 4621.
- [24] 刘洪, 徐正阳, 葛少云, 等. 考虑储能调节的主动配电网有功—无功协调运行与电压控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 51-58.
- LIU Hong, XU Zhengyang, GE Shaoyun, et al. Coordinated operation of active-reactive power and voltage control for active distribution network considering regulation of energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 51-58(in Chinese).
- [25] FARIVAR M, LOW S H. Branch flow model: relaxations and convexification—part I[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2554-2564.
- [26] CHEN B, CHEN C, WANG J H, et al. Multi-time step service restoration for advanced distribution systems and microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6793-6805.

收稿日期: 2022-10-28; 修回日期: 2022-12-05。



宁可儿

作者简介:

宁可儿(2000), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网优化规划、中低压直流配电技术, E-mail: ningkeer2000312@stu.xjtu.edu.cn。

焦在滨(1976), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为中低压直流配电技术、电力系统继电保护等。通信作者, E-mail: jiaozaibin@mail.xjtu.edu.cn。

(责任编辑 张鹏)

JGEEI