

计及分布式光伏安装面积限制的配电网 储能系统与线路扩容联合规划

邵晨颖¹, 李沛霖¹, 杨新婷², 刘友波¹

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 国网四川省电力公司
经济技术研究院, 四川 成都 610041)

摘要:为应对负荷的增长需求并解决光伏就地消纳和电网规划过投资问题,提出了一种主动配电网多阶段储能配置与线路扩容联合动态规划方法。从经济性出发,计及联合规划得到的光伏消纳收益及调峰补贴收益,构造规划目标函数;同时考虑到分布式光伏安装面积限制,基于 Logistic 曲线构建分布式光伏发展模型,预测光伏在各个规划阶段的装机和出力情况,为储能配置与线路扩容的联合规划提供边界条件;最后,基于相角松弛与二阶锥松弛凸优化潮流约束,并采用大 M 法凸化储能约束,以实现对模型的高效求解。对比某实际台区算例联合规划前后系统的运行指标,可见规划后系统的可靠性有大幅提升,且随分布式光伏的不断接入,光伏消纳率不降反升,由此验证了所提联合规划方法的有效性和实用性。

关键词:分布式光伏; 安装面积限制; 储能配置; 线路扩容; 联合规划; 多阶段动态规划

中图分类号: TM 715 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)06-0067-08

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230610

Joint Planning for Energy Storage Systems and Line Capacity Enhancement of Distribution Network Considering Installation Area Limits of Distributed Photovoltaic

SHAO Chenying¹, LI Peilin¹, YANG Xinting², LIU Youbo¹

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: In order to solve the problems of photovoltaic on-site consumption and grid over-investment, a joint multi-stage dynamic planning method of energy storage system configuration and line capacity enhancement in active distribution network is proposed to cope with the increasing demand of load. From an economic standpoint, the photovoltaic consumption effect and peak shaving allowance obtained by joint planning are taken into account, and the planning objective function is suggested. At the same time, considering the installation area limits of distributed photovoltaic, a distributed photovoltaic development model is provided based on the Logistic curve, and then the installed capacity and output of photovoltaic in every planning stage can be predicted, which provides boundary conditions for the joint planning of energy storage systems and line capacity enhancement. Finally, phase angle relaxation and second-order cone relaxation are adopted to achieve convex optimization of power flow constraints and big-M approach is employed to obtain convexification of energy storage system constraints, resulting in efficient model solution. Comparing the system operating indicators before and after joint planning in a real distribution area, it can be seen that the system reliability after planning has a great improvement, and with the continuous access of distributed photovoltaics, the photovoltaic absorption rate does not decrease but rises, which verifies the effectiveness and practicality of the proposed joint planning method.

Key words: distributed photovoltaics; installation area limits; energy storage systems configuration; line capacity enhancement; joint planning; multi-stage dynamic planning

0 引言

为了满足日益增长的负荷需求,配电网需要进行动态扩容规划,计及政治、经济、地理等因素,在最小化成本的同时尽可能保证系统的技术指标不受影响^[1-2]。然而,随着分布式光伏广泛部署在低压配电网中^[3],其随机波动的输出使配电网的光伏支撑能力趋近饱和,产生弃光等问题,光伏的消纳将成为新型配电网在规划运行中需要重点研究的问题之一^[4]。另一方面,储能系统因具有良好的调峰能力和抑制新能源出力波动的作用,在配电网中得到大规模应用。从规划角度出发,装设储能系统可以避免使用增加冗余容量方法解决负荷增长和峰谷差加剧的问题,有助于提升设备资产利用率,延缓配电网升级改造,推动电网的高可靠性连续供电发展^[5]。因此,考虑将优化储能配置同线路扩容结合起来作为应对负荷增长的规划手段,同时在主动配电网动态规划过程中计及光伏的消纳情况,这对实现配电网的清洁、经济、可靠运行非常重要。

配电网扩容规划作为配电网中的一个重要研究方向,如今已有不少研究成果。文献[6]提出了一种考虑负荷增长、电价、扩容投资成本、运营成本等因素的配电网扩容规划方法。文献[7-8]针对电动汽车负荷的发展,构建了配电网扩容与电动汽车充电站协调规划模型。文献[9]考虑了配电网投资和分布式电源投资,文献[10]计及热、电需求和分布式电源的不确定性,二者都将配电网多阶段扩容规划问题建模为一个混合整数线性规划优化问题。值得注意的是,上述研究大多忽略了储能系统接入后对配电设备利用率的提升作用。因此,储能配置在电网规划过程中的替代潜力近年来引起了众多学者的关注。文献[11-12]提出了储能系统接入的经济效益模型,对储能系统削峰填谷带来的经济效益实现了度量计算。文献[13]通过潮流灵敏度搜索优先选择重过载的配电设备进行储能配置。文献[14]综合考虑了储能系统对电网的削峰填谷作用和经济成本,提出一种实现储能功率、容量配置及运行调度的方法。上述文献均只使用储能配置进行单阶段的规划研究,然而配电网规划过程往往不是独立的,需

要涉及多个阶段进行综合规划,且储能配置的替代效益是有限的,在实际的规划过程中,传统的扩容规划需要同储能配置结合起来使用。因此,文献[15]提出了一种与储能配置相结合的多阶段主动配电网规划模型,分析了储能系统带来的供电可靠性提升效果。文献[16]在规划时考虑了负荷的不确定性,在实现电网安全运行和电网损失最小化的同时,保证主动配电网能够按照调度计划运行。但储能系统对提升光伏消纳率、减少弃光方面的效用还没有被考虑到规划目标中。

因此,下面将储能配置与传统扩容方法结合起来对主动配电网进行多阶段的动态规划,以经济性最佳为目标,将光伏消纳转化为环境效益计入目标函数中,同时利用 Logistic 曲线模拟分布式光伏在一定安装面积限制下的“S”型发展曲线,实现了考虑分布式光伏区域容量上界的配电网线路扩容与储能配置的双重优化,有助于在满足客观电力需求约束下实现资金的高效利用。

1 考虑安装面积限制的分布式光伏发展模型

随着分布式光伏的不断发展,规划区域内可供分布式光伏铺设的空间日益减少,其装机总量将逐步趋向饱和^[17]。总体来说,分布式光伏的发展曲线大致呈“S”型。因此,可以基于 Logistic 曲线构建考虑安装面积限制的分布式光伏发展模型,预测各规划阶段的光伏装机容量及出力曲线,作为后续联合规划的基本边界条件。步骤如下:

1) 根据土地利用性质进行分区,分为商业区、住宅区和工业区,然后根据各区域的屋顶面积,在给定屋顶有效利用率和单位面积饱和光伏容量密度下,估计各分区的光伏饱和装机容量。

$$P_{PV,i}^S = d_i \eta_i S_i \quad (1)$$

式中: $P_{PV,i}^S$ 为区域*i*光伏饱和装机容量; d_i 为区域*i*单位面积饱和光伏容量密度; η_i 为区域*i*屋顶有效利用率; S_i 为区域*i*屋顶面积。

分布式光伏组件型号确定后,单位面积的最大可装设光伏容量将随之确定,从而得到相应的单位面积饱和光伏容量密度。同时,不同区域的屋顶有

效利用率取值如表1所示。

表1 不同区域的屋顶有效利用率

区域	工业区	商业区	住宅区
屋顶有效利用率/%	70	50	40

2)不同区域的分布式光伏发展情况也有所不同,因此采用 Logistic 函数拟合光伏累计安装发展的“S”曲线。

$$\xi_{i,n} = \frac{a_i}{1 + e^{b_i - c_i n}} \quad (2)$$

式中: $\xi_{i,n}$ 为区域*i*在第*n*个规划阶段的光伏安装普及率; a_i 、 b_i 、 c_i 均为区域*i*的拟合系数,可以依据该地区其余网格相应土地性质的光伏发展历史数据或专家经验来确定。

基于步骤1得到的饱和装机容量,可以计算各规划阶段的光伏装机容量为

$$P_{PV,i,n} = \xi_{i,n} P_{PV,i}^S \quad (3)$$

式中, $P_{PV,i,n}$ 为区域*i*在第*n*个规划阶段的光伏装机容量。

3)记初始年不同场景下的光伏典型出力曲线为光伏出力基准曲线,则不同区域在不同规划阶段的各场景下光伏出力曲线可以大致估计为

$$P_{PV,i,n,s}^{CL} = \sigma_{PV,i,n} P_{PV,0,s}^{CL} \quad (4)$$

式中: $P_{PV,i,n,s}^{CL}$ 为区域*i*在第*n*个规划阶段第*s*个场景下的光伏出力; $P_{PV,0,s}^{CL}$ 为初始年第*s*个场景下的各区域总光伏出力; $\sigma_{PV,i,n}$ 为区域*i*在第*n*个规划阶段的分布式光伏装机系数,定义为

$$\sigma_{PV,i,n} = \frac{P_{PV,i,n}}{\sum_{i=1}^I P_{PV,i,0}} \quad (5)$$

式中: $P_{PV,i,0}$ 为初始年区域*i*的光伏装机容量; I 为所分区域总数。

2 配电网储能配置与线路扩容联合动态规划模型

下面将配电网联合规划经济性最优作为目标,构建面向典型场景的配电网储能配置与线路扩容联合动态规划模型。

2.1 目标函数

基于经济性的协调规划目标函数可以表示为:

$$F = \max \sum_{s=1}^m \omega_s C_s \quad (6)$$

$$C_s = C_{env,s} + C_{allowance,s} - C_{ESS,s} - C_{Line,s} \quad (7)$$

式中: F 为协调规划的目标; m 为场景数; ω_s 为场景*s*出现概率; C_s 为场景*s*的经济性; $C_{env,s}$ 、 $C_{allowance,s}$ 、 $C_{ESS,s}$ 、 $C_{Line,s}$ 分别为场景*s*下光伏消纳与储能系统接入带来的环境收益、储能系统削峰填谷补贴收益、储能成本和线路扩容成本。

2.1.1 环境收益

升级改造线路以扩大线路容量并配置储能系统,有助于提高光伏的消纳率,减少火电机组出力,降低各类污染物的排放,从而带来一定的环境收益。

$$C_{env,s} = \sum_{t=1}^T [\gamma_{SOC} \eta_{dis} P_{dis,s}(t) + \gamma_{PV} P_{PV,s}^{XN}(t)] \quad (8)$$

式中: γ_{SOC} 、 γ_{PV} 分别为储能系统放电和光伏消纳环境收益系数; T 为规划周期,即一年8760h; η_{dis} 为储能系统的放电效率; $P_{dis,s}(t)$ 和 $P_{PV,s}^{XN}(t)$ 分别为场景*s*下时刻*t*储能系统的放电功率和光伏消纳值。

2.1.2 补贴收益

储能系统接入后,能通过调整其充放电状态和功率有效平抑电网的峰谷差,具有削峰填谷的作用。政府为激励储能系统参与削峰填谷,出台了一系列政策给予相应补贴,其经济效益可以表示为

$$C_{allowance,s} = \sum_{t=1}^T P_{dis,s}(t) \cdot r_{bt} \quad (9)$$

式中, r_{bt} 为政府对转移单位峰荷给予的补贴。

2.1.3 储能成本

$$C_{ESS,s} = (C_{inv,s} + C_{ope,s}) \cdot \frac{r_{ESS} \cdot (1 + r_{ESS})^{L_{ESS}}}{(1 + r_{ESS})^{L_{ESS}} - 1} \quad (10)$$

$$C_{inv,s} = C_{ESS,P}^{inv} \cdot P_{ESS,s} + C_{ESS,E}^{inv} \cdot E_{ESS,s} \quad (11)$$

$$C_{ope,s} = C_{ESS,P}^{ope} \cdot P_{ESS,s} + C_{ESS,E}^{ope} \cdot E_{ESS,s} \quad (12)$$

式中: $C_{inv,s}$ 和 $C_{ope,s}$ 分别为场景*s*下储能系统投资成本和运行成本; $P_{ESS,s}$ 和 $E_{ESS,s}$ 分别为场景*s*下的总储能功率和容量; $C_{ESS,P}^{inv}$ 、 $C_{ESS,E}^{inv}$ 、 $C_{ESS,P}^{ope}$ 、 $C_{ESS,E}^{ope}$ 分别为储能功率、容量的单位投资和运行成本; r_{ESS} 和 L_{ESS} 分别为储能系统贴现率和使用寿命。

2.1.4 线路扩容成本

参考文献[18],以资本年化率的方式对线路扩容投资成本进行定义,即

$$C_{Line,s} = \frac{r_{Line} (1 + r_{Line})^{L_{Line}}}{(1 + r_{Line})^{L_{Line}} - 1} \sum_{l=1}^{N_{kr,s}} (c_{l,s} \times L_l) \quad (13)$$

式中: r_{Line} 和 L_{Line} 分别为最低预期资本回收率和规划年限; $N_{kr,s}$ 和 $c_{l,s}$ 分别为场景*s*下需要扩容线路数和

线路 l 的扩容单价; L_l 为线路 l 的长度。

2.2 约束条件

2.2.1 潮流约束

$$\begin{cases} U_g(t) - U_h(t) = z_{gh} I_{gh}(t) \\ \sum_{k:h \rightarrow k} S_{hk}(t) - \sum_{g:g \rightarrow h} [S_{gh}(t) - z_{gh} |I_{gh}(t)|^2] = S_h(t) \\ S_{gh}(t) = U_g(t) I_{gh}^*(t) \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} P_h(t) = u_h^G P_h^G(t) + u_h^{PV} P_{PV,h}^{XN}(t) + u_{dis,h}(t) P_{dis,h}(t) - \\ u_{ch,h}(t) P_{ch,h}(t) - P_h^{Load}(t) \\ Q_h(t) = u_h^G Q_h^G(t) - Q_h^{Load}(t) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $U_g(t)$ 、 $U_h(t)$ 分别为时刻 t 节点 g 、 h 的电压; z_{gh} 、 $I_{gh}(t)$ 、 $S_{gh}(t)$ 分别为线路 $g-h$ 的阻抗、时刻 t 电流和功率; $I_{gh}^*(t)$ 为电流的共轭值; $S_{hk}(t)$ 为时刻 t 线路 $h-k$ 的功率; $S_h(t)$ 、 $P_h(t)$ 、 $Q_h(t)$ 分别为节点 h 时刻 t 的注入视在功率、有功功率和无功功率; u_h^G 、 u_h^{PV} 反映节点 h 是否为变电站节点或接入光伏, $u_{dis,h}(t)$ 、 $u_{ch,h}(t)$ 表征节点 h 是否配置储能系统及其在时刻 t 的充放电状态, 上述变量均为 0-1 变量; $P_{ch,h}(t)$ 、 $P_{dis,h}(t)$ 分别为时刻 t 节点 h 所接储能系统充、放电功率; $P_{PV,h}^{XN}(t)$ 为时刻 t 节点 h 光伏的消纳值; $P_h^G(t)$ 、 $Q_h^G(t)$ 、 $P_h^{Load}(t)$ 、 $Q_h^{Load}(t)$ 分别为时刻 t 节点 h 处变电站输出或负荷所需有功功率、无功功率。

2.2.2 储能约束

储能系统的充放电功率约为

$$\begin{cases} u_{dis,h}(t) P_{dis,h}^{\min} \leq P_{dis,h}(t) \leq u_{dis,h}(t) P_{dis,h}^{\max} \\ u_{ch,h}(t) P_{ch,h}^{\min} \leq P_{ch,h}(t) \leq u_{ch,h}(t) P_{ch,h}^{\max} \\ u_{dis,h}(t) + u_{ch,h}(t) \leq 1 \end{cases} \quad (16)$$

储能系统的荷电状态约束为

$$\begin{cases} S_{OC,h}(24) = S_{OC,h}(0) \\ S_{OC,h}(t+1) = S_{OC,h}(t) + P_{ch,h}(t) \eta_{ch,h} - \frac{P_{dis,h}(t)}{\eta_{dis,h}} \\ S_{OC,h}^{\min} \leq S_{OC,h}(t) \leq S_{OC,h}^{\max} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $P_{ch,h}^{\min}$ 、 $P_{dis,h}^{\min}$ 分别为节点 h 所接储能系统的最小充、放电功率; $P_{ch,h}^{\max}$ 、 $P_{dis,h}^{\max}$ 分别为节点 h 所接储能系统的最大充、放电功率; $S_{OC,h}(t)$ 为时刻 t 节点 h 所接储能系统的荷电状态; $S_{OC,h}^{\max}$ 和 $S_{OC,h}^{\min}$ 分别为节点 h 所接储能系统的最大、最小荷电状态; $\eta_{ch,h}$ 、 $\eta_{dis,h}$ 分

别为节点 h 所接储能系统的充放电效率。

2.2.3 网络运行约束

$$\begin{cases} I_{gh,\max} = \sum_{j \in J} I_{j,\max} u_{line,gh}^j \\ 0 \leq I_{gh}^2 \leq I_{gh,\max}^2 \\ \sum_{j \in J} u_{line,gh}^j = 1 \\ U_{\min}^2 \leq U_h^2 \leq U_{\max}^2 \\ 0 \leq P_{PV,h}^{XN}(t) \leq P_{PV,h}^{CL}(t) \end{cases} \quad (18)$$

式中: $u_{line,gh}^j$ 为线路 $g-h$ 的型号表征 0-1 变量, 装设型号为 j 时取 1; $I_{j,\max}$ 为型号 j 对应的线路电流上限; I_{gh} 、 $I_{gh,\max}$ 分别为线路 $g-h$ 的电流及其上限值; U_{\max} 、 U_{\min} 分别为节点电压上、下限; $P_{PV,h}^{CL}(t)$ 为时刻 t 节点 h 光伏的出力值。

2.2.4 规划连续性约束

$$\begin{cases} E_{ESS,h,n} \geq E_{ESS,h,n-1} \\ I_{gh,\max,n} \geq I_{gh,\max,n-1} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $E_{ESS,h,n}$ 和 $E_{ESS,h,n-1}$ 分别为第 n 个和第 $n-1$ 个规划阶段下节点 h 处储能系统的配置容量; $I_{gh,\max,n}$ 和 $I_{gh,\max,n-1}$ 分别为第 n 个和第 $n-1$ 个规划阶段下线路 $g-h$ 的电流上限。

3 凸松弛优化的联合规划模型及其求解

第 2 章构建的联合规划模型中存在决策变量的乘积和平方项, 导致规划模型因非凸非线性而难以求解。基于此, 采用大 M 法、相角松弛与二阶锥松弛, 将模型中所有非凸约束进行凸化处理, 最终将原始问题转化为混合整数二阶锥规划问题, 从而便于使用 Gurobi 等商业求解器求解。

3.1 潮流约束凸松弛

通过相角松弛去掉电流、电压的相角, 保留幅值, 同时进行二阶锥松弛扩大可行域, 可以得到潮流约束式 (14) 的凸化形式^[19], 如式 (20)~式 (22) 所示。

$$\begin{cases} P_h(t) = \sum_{k:h \rightarrow k} P_{hk}(t) - \sum_{g:g \rightarrow h} [P_{gh}(t) - r_{gh} A_{gh}(t)] \\ Q_h(t) = \sum_{k:h \rightarrow k} Q_{hk}(t) - \sum_{g:g \rightarrow h} [Q_{gh}(t) - x_{gh} A_{gh}(t)] \end{cases} \quad (20)$$

$$V_h(t) = V_g(t) - 2[r_{gh}P_{gh}(t) + x_{gh}Q_{gh}(t)] + (r_{gh}^2 + x_{gh}^2)A_{gh}(t) \quad (21)$$

$$\begin{vmatrix} 2P_{gh}(t) \\ 2Q_{gh}(t) \\ A_{gh}(t) - V_g(t) \end{vmatrix}_2 \leq A_{gh}(t) + V_g(t) \quad (22)$$

式中: r_{gh} 和 x_{gh} 分别为线路 $g-h$ 的电阻、电抗; $V_h(t)$ 、 $V_g(t)$ 分别为时刻 t 节点 h 和 g 的电压幅值的平方; $A_{gh}(t)$ 为时刻 t 线路 $g-h$ 的电流幅值的平方。

3.2 储能约束凸松弛

基于大 M 法对式(16)的储能系统充放电功率约束进行松弛,可得:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{dis,h}(t) \leq P_{dis,h}^{\max} \\ 0 \leq P_{dis,h}(t) \leq M \cdot u_{dis,h}(t) \\ 0 \leq P_{ch,h}(t) \leq P_{ch,h}^{\max} \\ 0 \leq P_{ch,h}(t) \leq M \cdot u_{ch,h}(t) \\ u_{dis,h}(t) + u_{ch,h}(t) \leq 1 \end{cases} \quad (23)$$

式中, M 为一个足够大的数,此处取99 999。

4 算例分析

4.1 算例基本数据

下面以四川省某实际网格下3条10 kV线路组成的网络为规划区域,验证所提规划方法的效果。经过实际调研,基于台区下所带用户的土地性质对待规划线路进行分区,如图1所示。

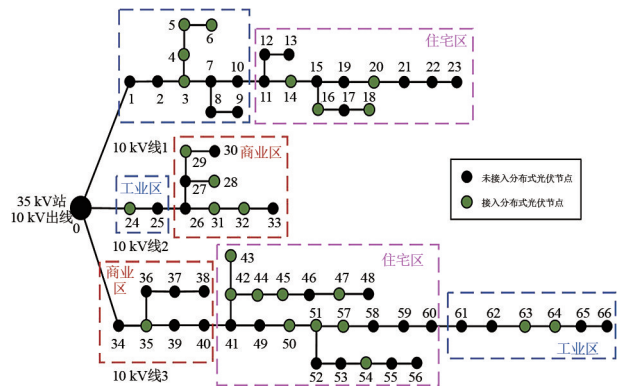


图1 某实际网格下3条10 kV线路构成的拓分分区

该网格的光伏出力 and 负荷典型场景如图2所示,3个场景可以大致认为是晴天(场景1)、多云(场景2)和阴雨(场景3)天气下的光伏出力和负荷典型日曲线。3种场景比例分别为15%、60%和25%。

假设2026年该网格分布式光伏容量达饱和,以

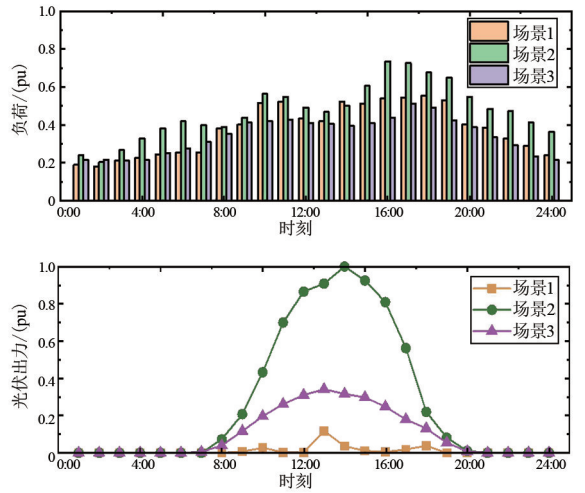


图2 光伏出力和负荷典型场景

2021年为现状年,估计2022—2026年期间的光伏容量发展情况。首先对该规划线路远景年分布式光伏饱和装机容量进行预测,由调研得到的各区域屋顶面积,根据式(1),取单位面积饱和光伏容量密度为 202.3 W/m^2 ,可知各区域分布式光伏饱和装机容量如表2所示。

表2 各区域屋顶面积及分布式光伏饱和装机容量

区域	屋顶面积/ m^2	屋顶有效利用率/%	光伏饱和装机容量/kW
工业区	10 250.698	70	1 451.601
商业区	7 961.977	50	805.354
住宅区	15 484.979	40	1 253.045

接着由饱和装机容量求取各规划阶段装机容量,计及不同区域的土地性质,用不同Logistic曲线模拟不同区域的光伏发展情况。

$$\xi_{\text{industrial},n} = \frac{1.014}{1 + e^{4.117 - 2.044n}} \quad (24)$$

$$\xi_{\text{commercial},n} = \frac{0.998}{1 + e^{3.596 - 1.622n}} \quad (25)$$

$$\xi_{\text{residential},n} = \frac{1.038}{1 + e^{3.464 - 1.357n}} \quad (26)$$

式中, $\xi_{\text{industrial},n}$ 、 $\xi_{\text{commercial},n}$ 、 $\xi_{\text{residential},n}$ 分别为工业区、商业区、住宅区在第 n 个规划阶段的光伏安装普及率。

计及上述分布式光伏的发展情况,考虑工业区、商业区和住宅区负荷分别按10%、8%、5%的年增长率进行增长,在此基础上进行线路扩容和储能配置的联合规划。可供选择的储能配置与线路扩容的参数如表3所示,所建模型中的投资和收益计算相关参数取值如表4所示。

4.2 联合规划结果

由于需要对该网络进行为期 5 年的规划,可以将规划过程以年为单位分成 5 个规划阶段,利用 Matlab+Gurobi 对每个规划阶段进行一次模型求解。由于使用了二阶锥松弛,通过计算二阶锥误差可以判断结果的可信度,二阶锥误差计算方式为

$$\varepsilon = P_{gh}^2 + Q_{gh}^2 - A_{gh} V_g \quad (27)$$

式中, ε 为二阶锥误差。

表 3 可供选择储能配置与线路扩容参数

配置编号	储能容量/kWh	最大充放电功率/kW	线路型号	线路容量/MW	线路单位投资/(万元·km ⁻¹)
1	200	50	LGJ-35	2.650	40
2	400	100	LGJ-70	4.287	80
3	600	150	LGJ-120	5.923	100
4	800	200			

表 4 模型相关参数

参数	取值
储能系统折现率	0.07
储能系统使用寿命/年	10
线路最低预期资本回收率	0.06
储能系统放电环境收益系数/(元·(kWh) ⁻¹)	0.031 4
光伏消纳环境收益系数/(元·(kWh) ⁻¹)	0.08
储能系统单位功率运行成本/(元·kW ⁻¹)	25
储能系统单位容量运行成本/(元·(kWh) ⁻¹)	0.05
储能系统单位功率投资成本/(元·kW ⁻¹)	2400
储能系统单位容量投资成本/(元·(kWh) ⁻¹)	2000
储能系统削峰填谷补贴/(元·(kWh) ⁻¹)	0.55
储能系统充放电效率/%	95
储能系统荷电状态上下限	0.1~0.9

优化后的二阶锥误差如图 3 所示,可以看出,二阶锥误差非常小。这说明二阶锥松弛后该模型的优化结果是足够可信的。

经求解得到的各阶段的储能配置和线路平均容量规划结果如表 5 所示。其中,规划前线路的平均容量为 2.823 6 MW。线路平均容量的计算公式为

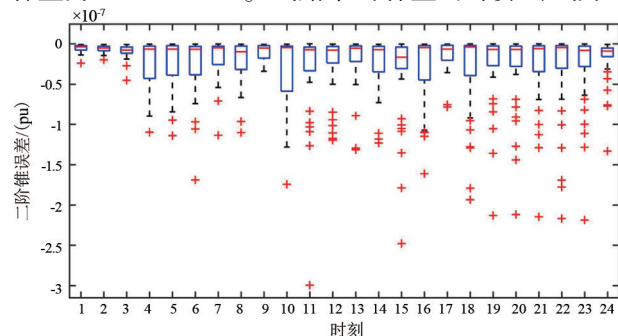


图 3 二阶锥误差

$$\bar{P} = \frac{\sum_{l=1}^{N_{\text{Line}}} P_{\text{Line},l} L_l}{\sum_{l=1}^{N_{\text{Line}}} L_l} \quad (28)$$

式中: \bar{P} 为线路平均容量; N_{Line} 为线路数; $P_{\text{Line},l}$ 为线路 l 的容量。

表 5 各阶段的储能优化配置和线路平均容量规划结果

规划年	配置节点	储能容量/kWh	线路平均容量/MW
2022	20	200	2.947 6
	63/64	400	
	66	800	
2023	20/33/52	200	3.071 6
	64	400	
	63/65	600	
2024	20/33/52	200	3.146 0
	63/64/65/66	800	
	33/52/54/61	200	
2025	20/62	400	3.220 4
	63/64/65/66	800	
	33/49/54/58	200	
2026	52	400	3.270 1
	61	600	
	20/62/63/64/65/66	800	

各阶段的线路扩容方案如图 4 所示。

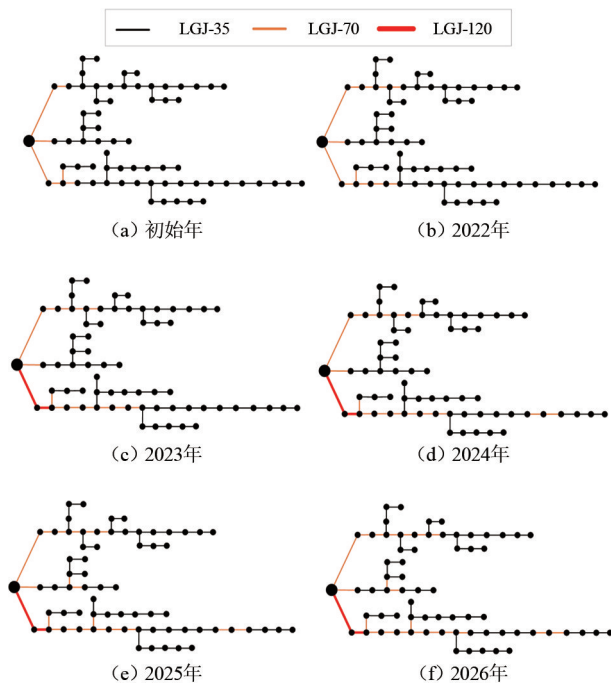


图 4 各阶段的线路扩容方案

从规划结果可以看出:随着规划年限的增长,需要配置储能的节点越多,相应地,储能配置容量也越大;与此同时,线路的平均容量也因部分线路的扩容在逐年提高。

4.3 联合规划效果验证

为了证明联合规划对配电网可靠性的提升作用,选用系统平均停电持续时间指标(system average interruption duration index, SAIDI)、系统平均停电频率指标(system average interruption frequency index, SAIFI)和系统平均供电可用率指标(average service availability index, ASAI)来评估系统的可靠性^[20-21],并采用序贯蒙特卡洛法进行可靠性的计算。同时,以峰谷差率为指标,体现储能配置带来的削峰填谷效用,其计算公式为

$$\varphi_{fg} = \frac{\max_t \left[\sum_{h=1}^{N_{bus}} P_h^{Load}(t) \right] - \min_t \left[\sum_{h=1}^{N_{bus}} P_h^{Load}(t) \right]}{\max_t \left[\sum_{h=1}^{N_{bus}} P_h^{Load}(t) \right]} \quad (29)$$

式中: φ_{fg} 为峰谷差率; N_{bus} 为节点数。

将所提线路扩容与储能配置的联合规划方法和仅进行线路扩容的传统规划方法效果进行对比,结果如表6、表7所示。

表6 传统规划后系统的可靠性与峰谷差率

规划年	SAIFI/ (次·户 ⁻¹ ·a ⁻¹)	SAIDI/ (h·户 ⁻¹ ·a ⁻¹)	ASAI/%	峰谷差率/ %
初始年	1.196	13.928	99.841	29.50
2022	1.125	13.666	99.844	31.19
2023	1.004	12.965	99.852	33.86
2024	0.959	11.826	99.865	35.27
2025	0.897	11.301	99.871	36.81
2026	0.858	10.162	99.884	37.13

表7 联合规划后系统的可靠性与峰谷差率

规划年	SAIFI/ (次·户 ⁻¹ ·a ⁻¹)	SAIDI/ (h·户 ⁻¹ ·a ⁻¹)	ASAI/%	峰谷差率/ %
初始年	1.196	13.928	99.841	29.50
2022	1.085	13.227	99.849	27.47
2023	0.943	12.614	99.856	25.11
2024	0.876	10.687	99.878	22.68
2025	0.794	9.636	99.890	21.23
2026	0.742	7.796	99.911	20.08

由表6、表7可知,无论是进行传统规划还是联合规划后,配电网的SAIFI、SAIDI指标都随着线路的扩容和储能配置容量增大而不断下降,ASAI则不断提升,说明了系统的可靠性在不断提高。然而,仅进行线路扩容的传统规划的可靠性提升水平低于联合规划,且联合规划后系统的峰谷差率明显有所降

低,峰谷差变小,而传统规划并不能保证这一点。

另外,考虑到所建模型将光伏消纳的环境收益耦合到了目标函数中,故对比了联合规划前后各个规划阶段下的光伏消纳率,计算方法如式(30)所示,计算结果如表8所示。

$$\eta_{PV} = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^{N_{bus}} P_{PV,h}^{XN}(t)}{\sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^{N_{bus}} P_{PV,h}^{CL}(t)} \times 100\% \quad (30)$$

式中, η_{PV} 为光伏渗透率。

表8 联合规划前后系统的光伏消纳率对比

规划年	光伏消纳率/%	
	联合规划前	联合规划后
初始年	66.86	66.86
2022	60.53	100.00
2023	53.31	100.00
2024	41.19	95.81
2025	28.56	96.23
2026	22.43	98.98

显然,随着光伏的不断接入,未进行联合规划时配电网对光伏的消纳率将逐步下降;但经过线路的扩容和储能系统的优化配置,配电网的光伏消纳率不仅没有降低,反而有大幅提升,甚至能够保证超过95%,从而证明了所提联合规划在促进配电网对分布式光伏的消纳方面效果十分显著。

因此,在负荷的不断发展和光伏的陆续接入下,通过储能配置与线路扩容的联合规划,在部分节点配置一定容量的储能系统,并对部分线路进行扩容操作,有助于实现配电网的经济可靠运行。

5 结论

上面综合考虑了光伏安装面积限制、配电网运行约束、多阶段规划连续性约束等,以规划成本最低为目标,建立含分布式光伏的配电网储能配置与线路扩容多阶段联合规划模型;同时通过相角松弛和二阶锥松弛凸化潮流约束,使用大M法凸化储能系统充放电功率约束,降低了原始非凸非线性动态规划模型的求解难度。实际算例表明,协同规划后,配电网运行指标如光伏消纳率和配电网可靠性都有显著提升,验证了所提分布式储能和线路容量联合规划方法的有效性。

参考文献

- [1] BORGES C L T, MARTINS V F. Multistage expansion planning for active distribution networks under demand and distributed generation uncertainties[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 36(1): 107-116.
- [2] 肖白,郭蓓.配电网规划研究综述与展望[J].电力自动化设备,2018,38(12):200-211.
- [3] TORQUATO R, SALLES D, PEREIRA C O, et al. A comprehensive assessment of PV hosting capacity on low-voltage distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 1002-1012.
- [4] LIU Junyong, CHAI Yanxin, XIANG Yue, et al. Clean energy consumption of power systems towards smart agriculture: roadmap, bottlenecks and technologies[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(3): 273-282.
- [5] 齐宁,程林,田立亭,等.考虑柔性负荷接入的配电网规划研究综述与展望[J].电力系统自动化,2020,44(10):193-207.
- [6] AHMADIGORJI M, AMJADY N, DEHGHAN S. A robust model for multiyear distribution network reinforcement planning based on information-Gap decision theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1339-1351.
- [7] 曾博,罗阳凡,周吟雨,等.公交枢纽灵活性赋能的高可靠城市配电网多层协同优化规划方法[J/OL].中国电机工程学报;1-18[2023-05-23].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220817.1458.007.html>.
- [8] EHSAN A, YANG Qiang. Active distribution system reinforcement planning with EV charging stations—Part I: Uncertainty modeling and problem formulation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(2): 970-978.
- [9] DELGADO G M, CONTRERAS J, ARROYO J M. Joint expansion planning of distributed generation and distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2579-2590.
- [10] JOOSHAKI M, FARZIN H, ABBASPOUR A, et al. A model for stochastic planning of distribution network and autonomous DG units[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(6): 3685-3696.
- [11] 修晓青,李建林,惠东.用于电网削峰填谷的储能系统容量配置及经济性评估[J].电力建设,2013,34(2):1-5.
- [12] 郭莉,薛贵元,吴晨,等.储能系统应用于削峰填谷的经济效益分析研究[J].电力需求侧管理,2019,21(5): 31-34.
- [13] 程瑜,黄森,刘瑞丰.面向配电网设备利用率提升的分布式储能优化配置[J].智慧电力,2021,49(8):8-14.
- [14] 潘宇航,王青松,陈力.应用于电网侧削峰填谷的储能系统配置及日出力优化策略[J].供用电,2022,39(7):9-16.
- [15] SHEN Xinwei, SHAHIDEHPOUR M, HAN Yingduo, et al. Expansion planning of active distribution networks with centralized and distributed energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(1): 126-134.
- [16] YI J H, CHERKAOUI R, PAOLONE M, et al. Optimal co-planning of ESSs and line reinforcement considering the dispatchability of active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(3): 2485-2499.
- [17] 符杨,田灿,李振坤,等.考虑空间容量饱和的分布式光伏时空分布预测[J].电网技术,2017,41(12): 3917-3925.
- [18] 储琳琳,宗明,李轶立,等.计及多种需求侧资源协同参与的配电网扩展规划[J].电器与能效管理技术,2020(12):89-98.
- [19] 李争博,刘友波,任鹏哲,等.考虑地理信息聚类分区的配电网多阶段动态规划方法[J].电力系统自动化,2022,46(14):38-45.
- [20] LIU Youbo, SU Yunche, XIANG Yue, et al. Operational reliability assessment for gas-electric integrated distribution feeders[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 1091-1100.
- [21] YIN Hang, WANG Zeqi, LIU Youbo, et al. Operational reliability assessment of distribution network with energy storage systems[J]. IEEE Systems Journal, 2023, 17(1): 629-639.

作者简介:

邵晨颖(2001),女,硕士研究生,研究方向为配电网规划、配电网状态估计;

李沛霖(2000),男,硕士研究生,研究方向为配电网规划与可靠性;

杨新婷(1992),女,硕士,工程师,从事配电网规划工作。

(收稿日期:2023-05-23)