储能系统与工程

基于概率潮流的光伏电站中储能系统的优化配置方法

张德隆，MUBAARAK Saif，蒋思宇，王龙泽，刘金鑫，陈永聪，李美成
（华北电力大学新能源学院，北京 102206）

摘 要：高比例光伏发电接入会对电力系统的稳定性等造成不利影响，而储能则被认为是消除这些影响的有效手段之一。本文从电力系统潮流的角度，分析了光伏发电对电力系统的影响，进而分析了储能对抑制这种影响的作用。首先，介绍了电力系统中元件的概率分布模型和储能模型，以及拉丁超立方采样法及Gram-Schmidt序列正交化方法；其次，建立了多目标优化模型，模型考虑了储能系统的成本、支路潮流的越限概率和电网的网络损耗，并用遗传算法求取目标函数的最优解；最后，在IEEE24节点测试系统中进行了仿真，分析了光伏不同接入容量和接入位置对电力系统的影响，储能对电力系统的作用，得出了对应不同光伏容量的储能最优配置。

关键词：光伏发电；储能系统；优化配置；概率潮流；遗传算法
doi：10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0151
中图分类号：TM 910.1 文献标志码：A 文章编号：2095-4239（2021）06-2244-08

Optimal allocation method of energy storage in PV station based on probabilistic power flow

ZHANG Delong, *MUBAARAK Saif*, *JIANG Siyu*, *WANG Longze*, *LIU Jinxin*, *CHEN Yongcong*, *LI Meicheng*
(School of New Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Large-scale photovoltaic (PV) stations will adversely affect the stability of the power system, while energy storage is considered to be one of the effective means to eliminate these effects. In this paper, the influence of PV plants on the power system and the function of the energy storage system (ESS) are analyzed from the perspective of power flow. First, the probability distribution model of power system components, storage model, Latin hypercube sampling (LHS) method, and Gram-Schmidt orthogonal sequence method are introduced in this paper. Second, this paper establishes the multiple objective optimization models that consider the energy storage system costs, the probability of a branch remaining active beyond the limit, and network loss. The genetic algorithm is used to find the best solution to the objective function (GA). Finally, the simulation is run on the IEEE 24 bus test system, including the effects of different PV capacities and access positions, as well as the effect of ESS. In this simulation, the optimal energy storage configuration for various PV capacities is obtained.

Key words: PV power generation; energy storage system; optimal configuration; probabilistic power flow; genetic algorithm

收稿日期：2021-04-12；**修改稿日期：**2021-04-16。
基金项目：国家自然科学基金项目（71974055，51772096）；国家电网公司科技项目（SGJX0000KXJS1900321）；北京市科技计划项目（Z18110000511802）；中央高校基本科研课题（2020FR002，2020MS023，2020MS028）。

第一作者：张德隆（1988—），男，博士，博士后，研究方向为储能系统、综合能源系统的优化运行与规划，E-mail：zhangdelong@ncepu.edu.cn；**通信作者：**李美成，教授，博士生导师，研究方向为太阳能电池、锂离子电池等新能源材料与器件，E-mail：mcli@ncepu.edu.cn。

光伏发电具有绿色环保、可再生等优点，被认为是最有潜力的可再生能源之一[1]，截止到2020年，我国光伏发电累积装机容量达到2.53亿千瓦[2]。大规模光伏发电的间歇性和不确定性对电力系统造成了影响，包括调峰、稳定性和弃光等问题，电网需要采取更加灵活的措施以应对这些问题。储能被认为是解决这些问题的有效方式，储能系统的应用为大规模光伏并网带来新的解决思路。

目前，国内外有诸多关于光伏发电、储能系统和概率潮流的研究，大量文献研究表明，储能可以提高光伏利用率，解决光伏并网的稳定性等问题[3]。在新能源电站中配置储能系统不仅需要关注光储、风储等的控制策略[4-5]，储能系统的经济性也是极为重要的考虑因素[6-7]。此外，对于电力系统中多个储能电站的优化问题，需要研究对储能电站运行的经济性模型、光伏传输通道的起点和终点的选址和储能的选址问题[8-9]。然而，现有对储能系统的优化配置的研究没有考虑对电力系统的具体影响，对多点系统的研究也没有涉及大规模的光储运行特性。

随着风电、光伏等具有不确定性的新能源发电的规模化发展，在进行电力系统运行规划时，计算电力系统的潮流是十分必要的。如文献[10-11]对含风电的电力系统中储能的优化选址和容量配置进行的研究。此外，在进行潮流计算时，也需要考虑多个新能源电源之间的相关性[12-13]。然而，以上研究都是基于确定性的潮流方法，这种方法没有考虑新能源发电的不确定性。文献[14]考虑了风电的不确定性，将概率最优潮流的方法用于储能系统优化选址，提高了运行经济性。

目前，已有学者提出了不同的概率潮流算法，文献[15]提出了基于蒙特卡洛模拟法的非线性概率潮流的数据挖掘方法，蒙特卡洛法的时效性非常差。文献[16]提出利用概率最优潮流对储能选址问题进行研究，并使用了2 m点法，但该方法计算精度并不理想。文献[17]研究了拉丁超立方采样法在潮流计算中的应用，并利用算例证明了拉丁超立方采样法的优越性。

基于以上研究，本文利用概率潮流方法研究了含大规模光伏发电的电力系统中储能优化配置方法。首先，介绍了电力系统中元件的概率分布模型以及拉丁超立方采样法；其次，考虑储能成本、潮流越限概率和网损建立了多目标优化模型；最后，在IEEE24节点测试系统中进行了仿真分析。

1　概率潮流模型

1.1　元件的不确定性模型

光伏、负荷和发电机等都是具有不确定性的随机变量，文献[12]在计算配电网概率潮流中，对采用的概率模型进行的说明。通过对历史数据的分析，光伏发电的输出功率服从BETA分布，通过对负荷功率的概率分布拟合，假设负荷服从正态分布，其概率密度分布函数为

$$f\left(P_{\mathrm{l}}\right)=\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\mathrm{l}}}}\exp\left[-\frac{\left(P_{\mathrm{l}}-\mu_{\mathrm{l}}\right)^{2}}{2\sigma_{\mathrm{l}}^{2}}\right] \tag{1}$$

式中，P_{l}为负荷功率；μ_{l}和σ_{l}分别为负荷的期望和方差。

发电机的概率模型通常采用二点分布，其概率密度分布函数为

$$P\left(X=x_i\right)=\begin{cases}p & x_i=P_{\mathrm{G}}\\ 1-p & x_i=0\end{cases} \tag{2}$$

式中，p为发电机正常运行的概率；P_{G}为发电机的输出功率。

在中午光照充足时，光伏电站的有功功率较大，难以及时使用的功率将存储在储能电池中；在负荷功率较大时，储能电池再将存储的电能释放。储能系统的瞬时能量平衡方程为[18]

充电时

$$S_t=\left(1-d_{\mathrm{s}}\right)S_{t-1}+\eta_{\mathrm{c}}S_{\mathrm{L}}\quad\forall t\in T \tag{3}$$

放电时

$$S_t=\left(1-d_{\mathrm{s}}\right)S_{t-1}+\eta_{\mathrm{d}}S_{\mathrm{G}}\quad\forall t\in T \tag{4}$$

约束条件

$$0\leqslant S_{\mathrm{L}}\leqslant\min\left[S_{\max}-\left(1-d_{\mathrm{s}}\right)S_{t-1},P_{\max}\right],$$

$$0\leqslant S_{\mathrm{G}}\leqslant\min\left[\left(1-d_{\mathrm{s}}\right)S_{t-1}-S_{\max},P_{\max}\right],$$

$$S_{\min}\leqslant S_t\leqslant S_{\max},|P_t|\leqslant P_{\max}$$

式中，S_t为储能在时刻t的能量；P_t为储能的充放电功率；S_{L}和S_{G}分别为充电和放电的能量；η_{c}和η_{d}分别为充电和放电效率；d_{s}为储能的自放电率。

1.2　拉丁超立方采样法

可以用于分析不确定性因素下系统潮流的方法主要有：模拟法、近似法和解析法。模拟法中的蒙特卡洛模拟法是概率潮流算法中精度最高的一种方法[15]，但与高精度相对的是其低时效性。在采样次数低的情况下，该方法通常会忽略概率分布曲线的

尾部[19]，而为了提高精度，则需要增大采样次数。拉丁超立方采样法则避免了该问题，它是一种分层采样方法，可以保证采样点有效反映概率分布情况，有效降低采样次数。

图1为采样次数在10～200之间拉丁超立方采样法和蒙特卡洛模拟法的期望和方差，两种方法得到的结果整体趋势是降低的。但采用蒙特卡洛方法得到的期望和方差非常不稳定，而且同样的采样次数，多次模拟得到的结果也不尽相同；拉丁超立方采样法随着采样次数的增加，方差稳定地减小，在采样次数大于150时，相对误差降低到5%以下。值得注意的是，拉丁超立方采样法的采样点是关于y轴对称的，因此，它的期望误差为0，这也是其优势所在。

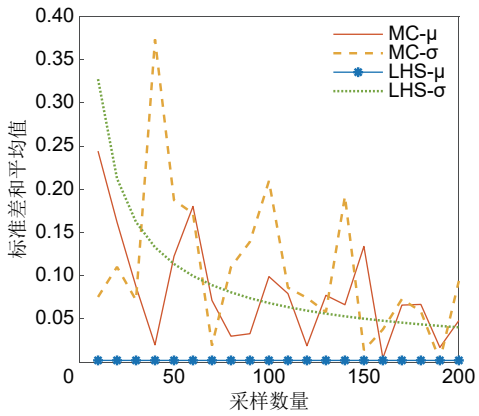


图1 MC与LHS不同采样次数对比

Fig. 1 Comparison between LHS and MC

拉丁超立方采样法是一种分层采样法，通过改进输入随机变量的样本生成过程，保证其采样值能够有效反映随机变量的整体分布[15]，其采样过程分为两步。

（1）采样

设$X_i(i=1,2,\cdots,m)$为m个随机变量，采样次数为N，如图2所示，将X_i的累计概率分布曲线分为N个等间距不重叠的区间，选择每个区间的中点作为概率Y的采样值，然后利用反函数计算采样值$X_i=P^{-1}(Y_i)$，计算得到的X_i便是随机变量的采样值。

（2）排列

由(1)得到随机变量的采样值是顺序排列的，因此m个随机变量之间的相关性为1，无法进行计算，可以采用Gram-Schmidt序列正交化方法[21]降低各随机变量采样值之间的相关性。首先生成一个

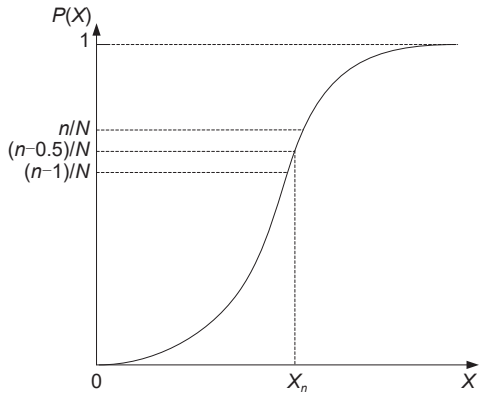


图2 LHS示意图

Fig. 2 Sampling of LHS

$K\times M$阶矩阵$\boldsymbol{I}=[\boldsymbol{I}_1,\boldsymbol{I}_2,\cdots,\boldsymbol{I}_K]^{\mathrm{T}}$，每行元素由1～$M$随机排列构成，它们代表原随机变量的采样值的位置，经过迭代降低各行间的相关性。

正向迭代

$$\begin{aligned}&\text{for } j=2,3,\ldots,K\\&\text{for } k=1,2,\ldots,j-1\\&\boldsymbol{I}_k\leftarrow\text{takeout}(\boldsymbol{I}_k,\boldsymbol{I}_j)\\&\boldsymbol{I}_k\leftarrow\text{rank}(\boldsymbol{I}_k)\end{aligned}$$

反向迭代

$$\begin{aligned}&\text{for } j=K-1,K-2,\ldots,1\\&\text{for } k=K,K-1,\ldots,j+1\\&\boldsymbol{I}_k\leftarrow\text{takeout}(\boldsymbol{I}_k,\boldsymbol{I}_j)\\&\boldsymbol{I}_k\leftarrow\text{rank}(\boldsymbol{I}_k)\end{aligned}$$

“←”表示赋值，takeout($\boldsymbol{I}_k$,$\boldsymbol{I}_j$)表示计算线性回归$\boldsymbol{I}_k=a+b\boldsymbol{I}_j$中的残差值，rank($\boldsymbol{I}_k$)表示取向量$\boldsymbol{I}_k$中元素的从小到大的排列序号形成的新向量。

经过双向迭代直至代表相关性的均方根值ρ不再减小，得到排列后的各随机变量位置的矩阵，进而可以得到相关性最小的随机变量排列矩阵。

$$\rho^2=\frac{\sum_{j=2}^{K}\sum_{k=1}^{j-1}\rho_{kj}^2}{0.5(M-1)M}\tag{5}$$

其中，$\rho_{kj}=\dfrac{\operatorname{cov}\left(\boldsymbol{I}_k,\boldsymbol{I}_j\right)}{\sqrt{\operatorname{var}\left(\boldsymbol{I}_k\right)\operatorname{var}\left(\boldsymbol{I}_j\right)}}$为$\boldsymbol{I}_k$与$\boldsymbol{I}_j$相关性系数，cov为协方差，var为方差。

2 储能系统多目标优化配置

2.1 目标函数

为了优化储能系统的功率和容量，本文考虑储能系统的成本、电网的功率越限概率和网损，建立了多目标优化函数。由于各项指标的量纲不同，对

各项指标进行离差标准化处理，经过离差标准化后，各种变量的观察值的数值范围都将在(0，1)之间，并且经标准化的数据都是没有单位的纯数量。在实际情况中，对各项指标的侧重可能存在差异，若赋予各项指标一定的权重，则可以对不同的侧重点进行分析研究。

$$W = \frac{w - w_{\min}}{w_{\max} - w_{\min}} \tag{6}$$

式中，w是需要优化的指标；$w_{\min}$、$w_{\max}$是未经标准化的原函数的最小值和最大值。

目标函数为

$$\min F = \lambda_1 E_{\text{loss}} + \lambda_2 p_{\text{e}} + \lambda_3 C_{\text{ESS}} \tag{7}$$

式中，λ_1～λ_3为权重系数，E_{loss}、p_{e}、C_{ESS}分别为标准化后的支路网损、支路有功越线概率和储能投资成本。

2.2　遗传算法

遗传算法[20]是模仿自然界中优胜劣汰、适者生存的遗传和进化法则而建立的一种寻优算法。它首先对初始种群进行编码，每个编码代表一个个体(问题的一个可行解)，这样每个可行解就从表现型变换为基因型，再根据自然法则对每个个体进行选择，并在每一代中选择对环境适应强的个体进行下一代的计算，直至产生对环境适应性最强的个体，经过解码后即为所求问题的近似最优解[21]。

本文中首先通过概率潮流算法对含光伏和储能的电力系统进行计算，将得到的数据做为遗传算法的输入变量进行求解，其计算的流程如图3所示，主要分为以下几个步骤：

（1）输入系统、光伏和储能数据，并进行拉丁超立方采样和Gram-Schmidt序列正交化；

（2）将采样后的数据输入潮流计算模型中，记录计算结果；

（3）对输出结果进行染色体编码，产生与采样值相对应的初始种群；

（4）计算种群中每个个体的适应度；

（5）进行选择、交叉和变异产生新一代种群；

（6）判断是否满足要求，如不满足，则返回第(4)步；若满足，则经过解码后输出最优解。

3　算例分析

将概率潮流方法在图4所示的IEEE24节点测试系统中进行仿真分析，其中1～10节点的电压水平为138 kV，11～24节点为230 kV。

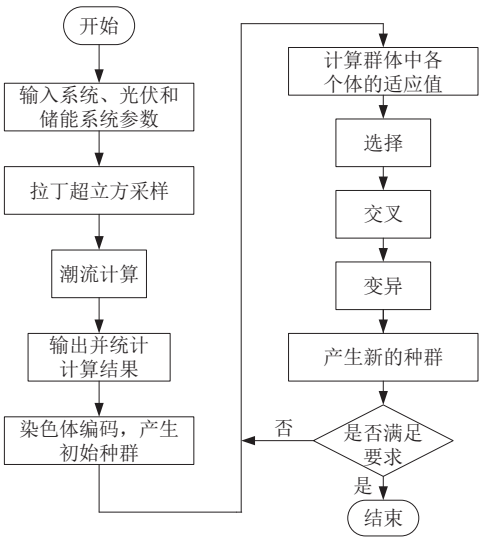


图3　算法流程

Fig. 3　Flow chart of algorithm

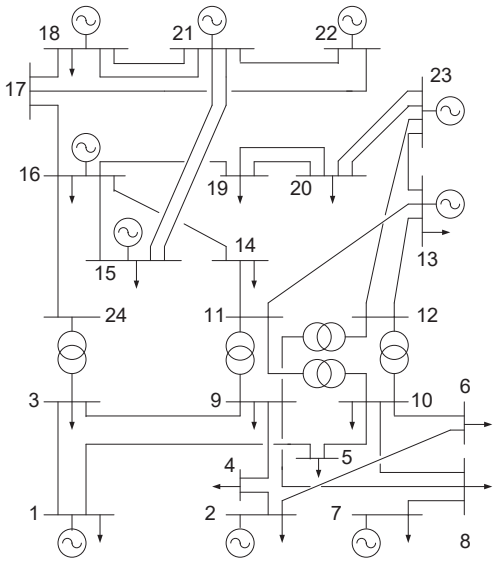


图4　IEEE24节点测试系统

Fig. 4　IEEE 24 bus test system

3.1　光伏电站对电力系统的影响

光伏电站在电力系统中的位置和容量会对电力系统的节点电压和支路功率产生影响，因此，在分析储能系统对电网的影响之前，本节先对光伏电站对系统的影响进行分析，本文对光伏接入产生的系统潮流的越限概率、支路网损等进行了仿真分析。

由图5(a)可见，光伏电站接入后造成支路潮流越限较小的节点有：11、12、13、23，节点13为平衡节点，该节点的电压和相角是给定的，起到稳定电网的功率平衡的作用，11、12、23与其直接

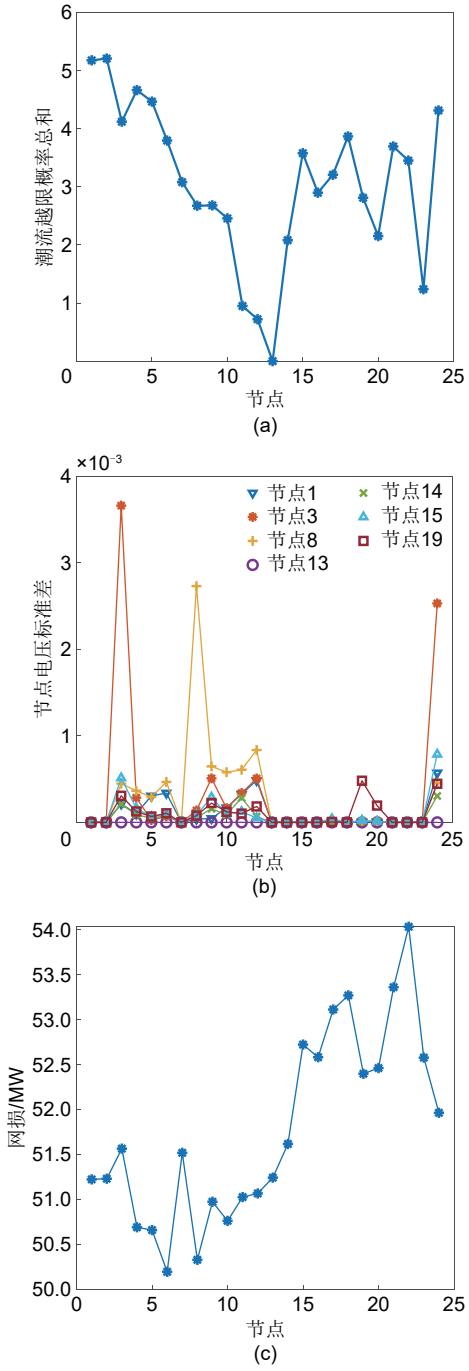


图 5 不同光伏接入点的(a)潮流越限概率总和 (b) 节点电压波动(c) 系统总网损

Fig. 5 At different PV access nodes: (a) The sum of probabilities of branch active beyond limit; (b) The standard deviation of voltage; (c) The network loss

相连，因此，与之相连的几个节点的功率越限的概率较小，将光伏电站接入这类具有平衡作用的节点对电力系统产生的影响更小。

除了潮流越限外，本文还分析了节点电压受光伏的影响情况，如图5(b)所示，选取了节点1、3、8、13、14、15、19的电压幅值的标准差作对比。整体上，光伏电站接入电网不会对节点的电压产生太大影响，但是，光伏电站会对接入节点及其附近节点的电压造成较大影响。此外，在算例所采用的系统中，通过对比发现，光伏电站更适合接入的节点类型为：①电压等级较高的节点，如14、15、16等，电压几乎不变化；②有发电机或调相机支撑的节点，如1、2、7等；③处于线路电阻较大的送端节点。

为分析光伏接入点对电力系统总网损的影响，本文作了如图5(c)所示的对比，可见若在某些负荷功率较大且没有电源的节点接入光伏电站，将使系统的网损减小。相反，节点21、22、23是电源端，负责集中送出功率，在这些节点接入光伏电站会产生较大的网损。因此，应该将光伏电站接入点选在功率的受端或负荷较大的节点，这种接入方式可以使系统的潮流分布更加均衡，减小系统网损。

综合上述结果分析中的3个因素，本文将节点14作为光伏电站的接入点，进而研究不同光伏电站的容量将会对电力系统产生何种影响。

图6(a)对光伏容量对系统的影响进行了分析，可见各个支路有功功率的标准差会随着光伏容量的增大而增大，且两者之间呈正相关的线性关系。除图中显示的几条支路之外，其他支路的标准差均小于5且呈线性关系，为便于作图，忽略其不计。由此可见，光伏并网后对与光伏接入点直接相连或邻近支路的功率影响较大。由于输电线路传输的功率有限，输电线路的建设的工程量和投资巨大，因此，安装光伏电站时，应考虑输送容量的限制，选择对线路影响最小的最佳接入位置，此外，选择最佳的光伏电站的容量也会对减小这种影响起到重要作用。

图6(b)对比了不同光伏电站容量下，各支路的有功功率越限的概率。除图中所示支路外，其他支路没有出现越限或概率非常小。与图6(a)对比可见越限的概率与标准差之间没有必然联系，标准差波动大的线路有功功率并不一定会越限，其原因与光伏输出功率的传送方向有关，若与原支路潮流方向相同，则较小的光伏功率也可能造成支路越限，若方向相反，则光伏功率非常大时也不一定会造成潮流越限。

图6(c)中系统的总网损随光伏容量的增加而增大，但是这种影响并不明显，当光伏容量增加60 MW时，总网损仅仅增大0.5%即0.75 MW。由

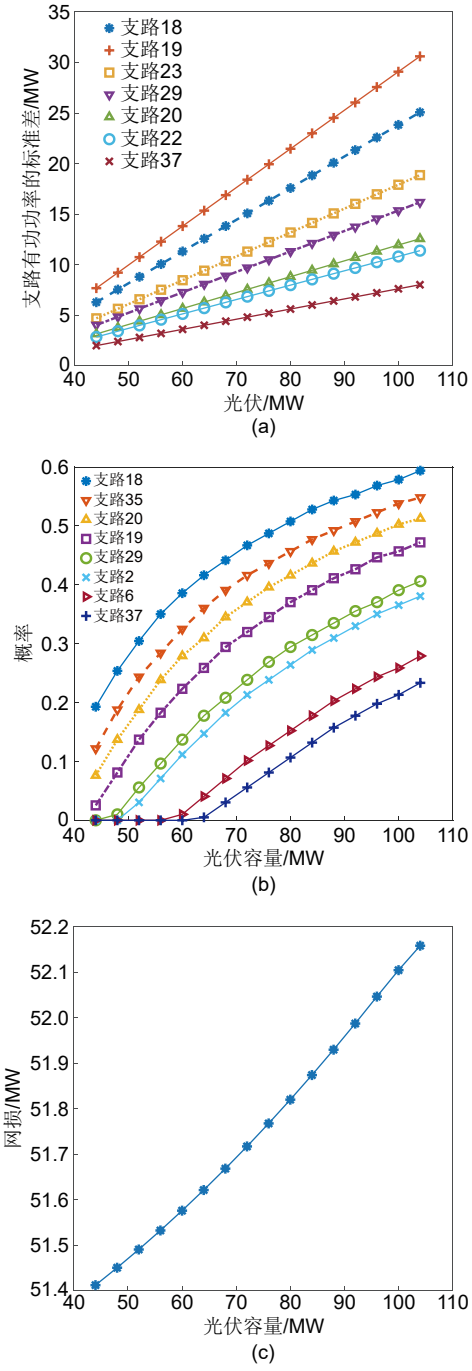


图6　不同光伏容量下 (a) 支路有功标准差 (b) 支路潮流越限概率 (c) 系统总网损

Fig. 6　At different PV access capacity: (a) The standard deviation of branch power; (b)The probability of branch active beyond limit; (c) The network loss

此可见，在安装光伏电站时，应将网络损耗作为次要因素，首先考虑对系统稳定运行影响较大的因素，如输电线路功率的波动率和越限概率。

3.2　储能接入对系统的影响

3.1 节对光伏电站的接入位置和容量随电力系统的影响进行了定性和定量分析，与光伏电站距离接近的支路更易受其影响，因此，对于储能系统，对电力系统的影响也是类似，基于这个假设，本文将储能系统和光伏电站接入同一节点。在不考虑弃光的情况下，假设光伏接入容量为100 MW，图7(a)～(c)对

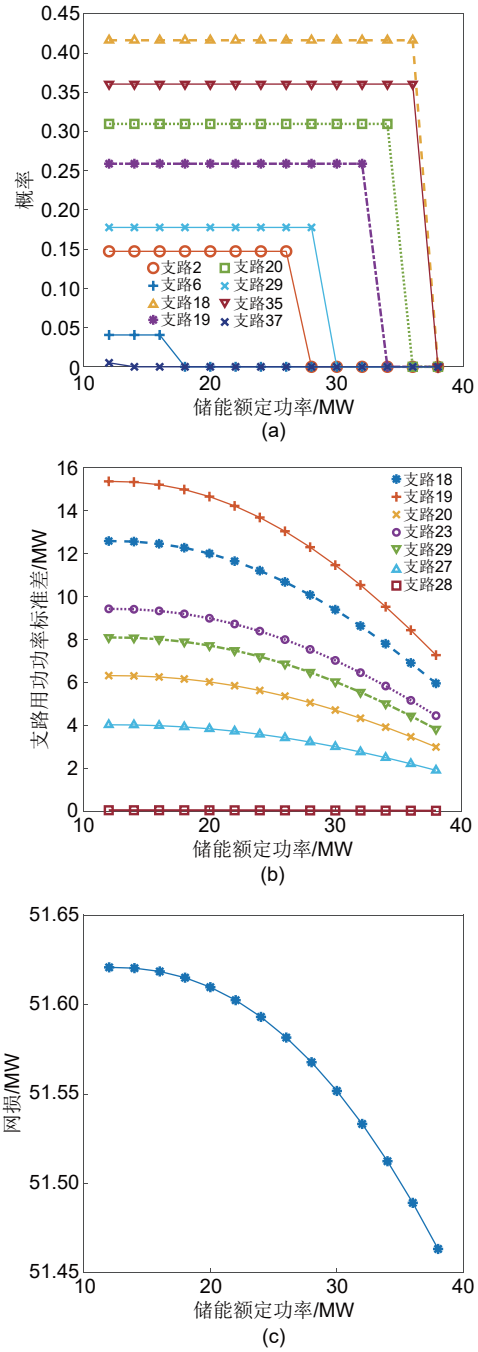


图7　不同储能额定功率下 (a) 系统支路潮流越限概率 (b) 支路有功标准差 (c) 系统总网损

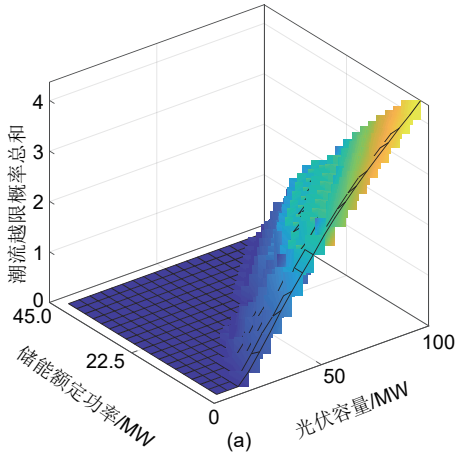
Fig. 7　At different rating power of ESS (a) The probability of branch active beyond limit (b) The standard deviation of branch power (c) The network loss

比了不同的储能容量下电力系统的支路潮流越限概率、有功潮流标准差和总网损的情况。

由图 7(a)可见，储能系统额定功率在 12～16 MW 范围内，对系统几乎没有影响，随着功率继续增大，越来越多的支路潮流的越限概率降低，但是，对于一些易受光伏发电影响的支路，如 18、20 和 35 等，需要接入很大的储能才能缓解越限问题，储能系统投资较大，将会降低系统的经济性，因此，在安装储能系统前，对储能投资与光伏收益的经济性进行比较十分必要，若在完全满足光伏发电需求的情况下，系统的经济性较差，可以考虑弃掉一部分光伏发电。

图 7(b)中标准差随着储能额定功率的增加而减小，通过对各个支路的对比，储能系统对潮流波动越大的支路抑制效果越明显。由图 7(c)可见，在电力系统中接入储能系统可以减小网损，而且储能的大小与网损呈负相关关系，但其作用有限，储能增加 26 MW，系统的总网损仅下降 0.16 MW，可见储能系统对缓解光伏对网损影响的抑制作用有限。与 3.1 节图 6(c)的分析对应，相对于系统中电源和负荷的功率，较小的光伏和储能难以对系统的网损产生太大影响，网损因素对前期规划的影响较小。

如图 8 所示，对不同储能和光伏容量下系统总的潮流越限概率和总网损进行了对比，整体上，光伏与两者呈正相关关系，而储能与两者呈负相关关系，随光伏容量的增加，系统受影响程度增大，随储能容量的增加，系统受影响程度减小。利用式(6)将各项结果标幺化，在各项指标的权重相同的情况下，将标幺化结果代入遗传算法，得出了不同光伏电站对应的最优储能配置，以 100 MW 光伏电站为例，接入功率 18 MW/20 MW·h 的储能电站较为合适。



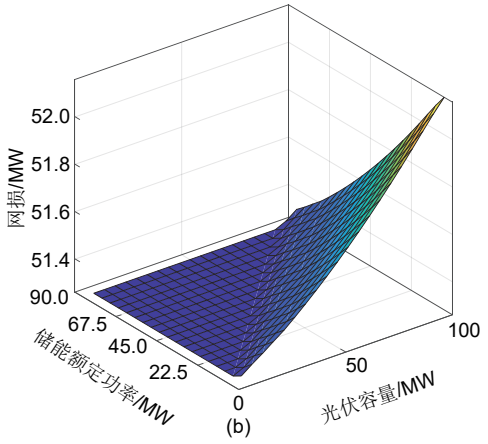


图 8 不同储能额定功率和光伏容量下 (a) 系统总的潮流越限概率 (b) 系统总网损

Fig. 8 At different rating power of ESS and PV capacity: (a) The sum of probabilities; (b) The network loss

4 结 论

对于光伏和储能系统的接入将对电力系统产生的影响，本文利用概率潮流计算的方法进行了分析，建立了考虑 3 种因素的多目标优化模型，并进行了算例分析。文章的主要结论如下：

（1）以 IEEE24 节点系统为例，综合支路潮流越线概率、支路网损和节点电压波动 3 个因素，光伏电站接入节点 14 较为合适；

（2）光伏电站接入对附近支路的潮流影响较大，有发电机或调相机支撑的节点受光伏接入的影响较小，更适于接入电压等级较高和负荷较重的节点；

（3）储能系统的接入对于光伏电站产生的影响有明显的抑制效果；

（4）将概率潮流的计算结果代入遗传算法，令各项指标的权重相同，得出了不同光伏电站对应的最优储能配置，以 100 MW 光伏电站为例，接入功率 18 MW/20 MW·h 的储能电站较为合适。

参 考 文 献

[1] WAN Can, ZHAO Jian, SONG Yonghua, et al. Photovoltaic and solar power forecasting for smart grid energy management[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(4): 38-46.

[2] 国家能源局. 国家能源局 2021 年一季度网上新闻发布会文字实录[EB/OL]. http://www. nea. gov. cn/2021-01/30/c_139708580. htm.

2021-01-30.
National Energy Administration. Transcript of the National Energy Administration's online press conference for the first quarter of 2021[EB/OL]. http://www. nea. gov. cn/2021-01/30/c_139708580. htm. 2021-01-30.

[3] CHEN J C, SONG X D. Economics of energy storage technology in active distribution networks[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(4): 583-588.

[4] YUAN Y, CAO Y, ZHANG X S, et al. Optimal proportion of wind and PV capacity in provincial power systems based on bilevel optimization algorithm under low-carbon economy[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(1): 33-40.

[5] ALAM M J E, YAN R, SAHA T K. Desirable control features of battery energy storage systems for commercial scale solar PV plants[C]//2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2015.

[6] ZHENG Y, DONG Z Y, HUANG S L, et al. Optimal integration of mobile battery energy storage in distribution system with renewables[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(4): 589-596.

[7] LI Jianing, Wu Zhi, ZHOU Suyang, et al., Aggregator service for PV and battery energy storage systems of residential building[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(4): 3-11.

[8] DOUKAS D I, BAKAS P, MARINOPOULOS A, et al. Energy storage integration into grid connected utility-scale photovoltaic (PV) systems[J]. 2013 IEEE Grenoble Conference PowerTech, POWERTECH 2013, 2013.

[9] DOUKAS D I, PAPASTERGIOU K, BAKAS P, et al. Energy storage sizing for large scale PV power plants base-load operation-comparative study & results[C]// 2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2012.

[10] BOSE S, GAYME D F, TOPCU U, et al. Optimal placement of energy storage in the grid[C]// 2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 2012.

[11] DVIJOTHAM K, BACKHAUS S, CHERTKOV M. Operations-based planning for placement and sizing of energy storage in a grid with a high penetration of renewables[EB/OL]. 2011: arXiv: 1107.1382[math.OC]. https://arxiv.org/abs/1107.1382

[12] 陈璨, 吴文传, 张伯明, 等. 考虑光伏出力相关性的配电网概率潮流[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 41-47.
CHEN C, WU W C, ZHANG B M, et al. Probabilistic load flow of distribution network considering correlated photovoltaic power output[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 41-47.

[13] 任洲洋, 颜伟, 项波, 等. 考虑光伏和负荷相关性的概率潮流计算[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 181-187.
REN Z Y, YAN W, XIANG B, et al. Probabilistic power flow analysis incorporating the correlations between PV power outputs and loads[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24): 181-187.

[14] XU Y, JEWELL W T, PANG C. Optimal location of electrical energy storage unit in a power system with wind energy[C]//2014: IEEE.

[15] 刘宇, 高山, 杨胜春, 等. 电力系统概率潮流算法综述[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23): 127-135.
LIUYU, GAO S, YANG S C, et al. Review on algorithms for probabilistic load flow in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 127-135.

[16] GHOFRANI M, ARABALI A, ETEZADI-AMOLI M, et al. A framework for optimal placement of energy storage units within a power system with high wind penetration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(2): 434-442.

[17] YU H, ZHONG Z Y, HUANG J B, et al. Power system probabilistic power flow calculation method using Latin hypercube sampling[J]. Automation of Electric Power System, 2009,33(21): 32-35.

[18] GHOFRANI M, ARABALI A. A stochastic framework for power system operation with wind generation and energy storage integration[C]//ISGT 2014.

[19] 李俊芳, 张步涵. 基于进化算法改进拉丁超立方抽样的概率潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 90-96.
LI J F, ZHANG B H. Probabilistic load flow based on improved Latin hypercube sampling with evolutionary algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 90-96.

[20] HOLLAND J H. Adaptation in natural and artificial systems[M]. Cambridge: MIT Press, 1975

[21] 于晗, 钟志勇, 黄杰波, 等. 采用拉丁超立方采样的电力系统概率潮流计算方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(21): 32-35,81.
YU H, CHUNG C Y, WONG K, et al. A probabilistic load flow calculation method with Latin hypercube sampling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(21): 32-35, 81.