

基于随机潮流与双层经济性指标的微电网 储能优化配置

孟中强¹, 李 飞¹, 张 豪², 姚天亮¹, 何富江¹, 黄 婉¹, 苟 斌¹

(1. 中国能源建设集团甘肃省电力设计院有限公司, 甘肃 兰州 730050; 2. 华北电力大学, 北京 102206)

摘要: 配置储能可以有效降低新能源功率波动对微电网的影响。为充分考虑微电网中风光出力和负荷的不确定性, 提出基于随机潮流与双层经济性指标的微电网储能优化配置方法。首先进行随机潮流计算, 得出电网运行的功率分布的随机特征; 然后将储能配置的经济性和电网运行的经济性相结合, 构造双层经济性评价指标, 以该指标最优为目标进行粒子群优化求解, 确定最优储能配置方案; 最后对比传统方案, 所提的优化方案充分考虑微电网中风光出力和负荷的随机性, 在降低储能配置成本的同时, 可以减少电网运行损耗, 提高电网运行的经济性。

关键词: 微电网; 随机潮流; 双层经济性评价指标; 粒子群优化; 储能配置

Optimal allocation of energy storage in microgrid based on stochastic power flow

MENG Zhongqiang¹, LI Fei¹, ZHANG Hao², YAO Tianliang¹, HE Fujiang¹, HUANG Wan¹, GOU Bin¹

(1. China Energy Construction Group Gansu Electric Power Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730050, China;

2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The configuration of energy storage can effectively reduce the influence of new energy power fluctuation on microgrid. In order to fully consider the uncertainty of wind-power output and load in microgrid, this paper proposes an optimal allocation method of energy storage in microgrid based on stochastic power flow and double-layer economic index. In this method, random power flow calculation is carried out to obtain the random characteristics of power distribution in power grid operation. Then, the economy of energy storage configuration and the economy of power grid operation are combined to construct a double-layer economic evaluation index, and the optimal index is taken as the goal to solve the particle swarm optimization, so as to determine the optimal energy storage configuration scheme. Compared with the traditional scheme, the proposed optimization scheme fully considers the randomness of wind-power output and load in the microgrid, which can reduce the energy storage configuration cost, reduce the power grid operation loss and improve the economy of power grid operation.

Key words: microgrid; stochastic power flow; two-level economic evaluation index; particle swarm optimization; energy storage configuration

0 引言

随着我国“双碳”目标的明确和推进, 以光伏和风电为主的新能源得到大力开发, 构建含高

比例新能源的新型电力系统是电网转型的关键战略目标。微电网作为新能源汇入主网的主要接口技术, 已成为目前的研究热点。

微电网中光伏和风电等新能源比例占比高,且随机性、波动性较强,因此保证微电网的稳定运行至关重要。储能配置是一种可有效应对新能源微电网功率波动的方法,可提高微电网的经济性和可靠性^[1]。储能容量的配置决定了系统的运行效果,容量过小难以抑制系统的功率波动,容量过大则会降低经济性,因此储能优化配置是重要的微电网规划运行问题^[2]。

目前国内外关于储能优化配置已有一定研究。文献[3]提出利用风光互补特性降低储能配置容量,提高经济性,研究表明配置容量的减小程度受风光波动率影响。文献[4]考虑了风光出力的随机性和波动性,利用序贯蒙特卡洛算法评估了系统可靠性,给出最优配置方案。文献[5]提出一种计及储能系统充放电行为的序次配置方法,降低优化配置的计算复杂度和成本。文献[6]建立了计及可控负荷的储能容量优化模型,并证明了合理利用可控负荷能够有效降低储能容量配置。文献[7]基于用户需求曲线构建了储能优化模型,提高需求响应的可靠性。以上文献分别计及系统风光出力、储能和负荷的不确定性来构建储能优化模型,以此提高系统经济性和可靠性。现有的储能配置研究大多基于经济性或稳定性考虑,但大部分仅重点考虑其中某一方面,容易造成容量配置结果的局限性。

储能优化是一个混合非线性的多目标规划问题,通常可由常规寻优、数学软件和智能算法来求解^[8]。在智能算法中,多目标粒子群优化算法凭借其快速收敛性和简便性得到广泛应用。文献[9]提出一种改进的多目标粒子群算法,对储能优化模型进行求解,该算法通过引入准对立学习策略和自适应分裂策略来提高收敛速度和全局寻优能力。文献[10]在多目标粒子群算法求解中引入拥挤距离排序法,提高算法全局寻优能力,并采用模糊隶属度法选取最优折中解。文献[11]提出将粒子群算法和时序模拟法相结合搜索最优的储能配置方案。

为了充分考虑微电网中风光出力和负荷的不

确定性,本文结合含风光的微电网潮流的随机特征,将储能配置的经济性与电网运行的经济性组合为双层经济性评价指标,考虑电网运行的约束条件,采用粒子群优化算法(PSO)求解,确定最优储能配置方案。

1 考虑多重随机过程的微电网潮流

1.1 微电网模型

微电网的随机潮流是由负荷的不确定性、可再生能源发电的随机性、输变电设备的计划检修或故障等因素引起的。因此,随机潮流计算结果可用于评估微电网的可靠性,从而优化微电网的储能配置。而进行微电网随机潮流计算的前提是对可再生能源发电、负荷等建立准确的数学模型。本文用到的可再生能源发电包括风力发电机和光伏电池。

风力发电机的出力主要取决于风速,目前有大量描述风速概率的数学模型^[12],其中Weibull分布形式简单,且能很好地拟合实际风速分布而被广泛使用,因此本文采用该模型描述风速分布,概率密度函数为

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (1)$$

式中, v 为风速; k 、 c 为分布参数。

风机出力与该时刻风速的关系近似为

$$P_{\text{wind}} = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{\text{ci}}, v > v_{\text{co}} \\ \frac{v - v_{\text{ci}}}{v_{\text{N}} - v_{\text{ci}}} P_{\text{N}} & v_{\text{ci}} < v \leq v_{\text{N}} \\ P_{\text{N}} & v_{\text{N}} < v \leq v_{\text{co}} \end{cases} \quad (2)$$

式中, P_{wind} 为风机出力; P_{N} 为风机额定功率; v_{ci} 为风机最低切入风速; v_{N} 为额定功率对应的风速; v_{co} 为风机最大切出风速。

光伏电池的出力主要与光照强度相关,目前普遍认为一段时间内光照强度近似服从Beta分布^[13],因此,可以认为光伏电池的出力服从Beta分布,概率密度函数为

$$f(P_{\text{PV}}) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{P_{\text{PV}}}{P_{\text{m}}} \right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P_{\text{PV}}}{P_{\text{m}}} \right)^{\beta-1} \quad (3)$$

式中, P_{PV} 为光伏电池出力; P_m 为一段时间内光伏电池的最大出力; Γ 为Gamma函数; α 、 β 为参数。

电力系统的随机性不仅由分布式电源的随机性决定, 还与负荷的随机性相关。

负荷的随机概率模型需要考虑负荷的波动, 本文负荷的概率模型采用正态分布拟合, 将负荷的基准值作为均值, 将负荷的随机波动作为方差, 则负荷的概率密度函数表示为

$$\begin{cases} f(P) = \frac{1}{\sigma_P \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(P-\mu_P)^2}{2\sigma_P^2}\right] \\ f(Q) = \frac{1}{\sigma_Q \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(P-\mu_Q)^2}{2\sigma_Q^2}\right] \end{cases} \quad (4)$$

式中, P 和 Q 为负荷的有功功率和无功功率; μ_P 和 μ_Q 为负荷有功功率和无功功率的均值; σ_P 和 σ_Q 为负荷有功功率和无功功率的标准差。

储能系统 (Energy Storage System, ESS) 的出力与微电网中发电系统的出力以及负荷的大小相关, 因此储能系统影响微电网的潮流。储能系统的剩余电量 $E(t)$ 取决于前一时刻储能电池的荷电状态和该时刻的充放电功率。

储能电池充电过程

$$E(t+1) = E(t) + \eta |P(t)| \Delta t \quad (5)$$

储能电池放电过程

$$E(t+1) = E(t) - \frac{|P(t)| \Delta t}{\eta} \quad (6)$$

式中, $E(t+1)$ 为 $t+1$ 时刻储能电池的电量; $E(t)$ 为 t 时刻储能电池的电量; $P(t)$ 为 t 时刻储能电池的充放电功率; η 为充放电效率; Δt 为时间间隔。

微电网中潮流的随机性还受其他因素的影响, 如线路的故障检修等。但本文研究重点不是对微电网的详细建模, 因此不考虑其他不确定因素。

1.2 随机潮流计算方法

目前随机潮流的计算方法可分为近似法、解析法和模拟法。

近似法是通过使用随机变量的某些数字特征

来等效系统中状态变量的统计特性的方法, 该方法较模拟法计算量小, 但是, 对于状态变量表达形式复杂的概率分布, 计算高阶数字特征困难, 且当系统规模较大时, 计算速度并无优势。

解析法通过将潮流方程进行简化处理, 再基于随机变量间的关系进行卷积计算, 大大缩减在大规模电网计算时的耗时, 但是解析法在计算时需要将模型线性化, 降低一定的准确度, 如果系统模型复杂, 线性化具有一定难度。

模拟法的基本思想: 首先针对需要求解的问题建立概率模型或随机过程, 使参数为所求问题的解, 然后通过抽样对概率模型或随机过程结果进行统计, 最后得出所求问题的近似解。该方法在处理较大规模随机因素和复杂状态时具有一定优势, 其中以蒙特卡洛法为主要代表。该方法原理相对简单, 且在数据量足够时具有较高准确性, 因此在随机潮流计算中常常被采用。

1.3 蒙特卡洛随机潮流计算步骤

本文采用蒙特卡洛法计算随机潮流, 流程图如图1所示。在进行蒙特卡洛随机潮流计算时, 考虑各随机变量相互独立, 即风机发电服从Weibull分布, 光伏发电服从Beta分布, 负荷服从正态分布, 含可再生能源发电的微电网随机潮流计算步骤为:

1) 根据历史数据计算风速的Weibull分布和某一时段内光照强度的Beta分布; 记录某地以小时计的风速和光照强度。计算风速的Weibull分布参数, 假设在全年的8 760 h中, 风速完全服从Weibull分布, 计算得出记录值的均值 μ 和标准差 σ , 再由下式计算Weibull分布参数 k 和 c , 表达式为

$$\begin{cases} k = \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^{-1.086} \\ c = \frac{\mu}{\Gamma(1+1/k)} \end{cases} \quad (7)$$

假设每天的同一时段内, 该地光照强度服从同一Beta分布。按照时段对一年内光照强度的记录值进行分组, 形成24组。计算得出每组的均

值 μ 和标准差 σ ，再由下式计算Beta分布参数 α 和 β ，表达式为

$$\begin{cases} \alpha = \mu \left[\frac{\mu(1-\mu)}{\sigma^2} - 1 \right] \\ \beta = (1-\mu) \left[\frac{\mu(1-\mu)}{\sigma^2} - 1 \right] \end{cases} \quad (8)$$

2) 使用蒙特卡洛法对风速和光照强度进行抽样，同时按照正态分布对负荷大小进行抽样，根据抽样结果计算风机、光伏以及储能的出力数据。使用数学工具生成服从Weibull分布的风速数据和服从Beta分布的光照强度数据，根据生成的数据以及式(2)和式(3)计算风机和光伏的出力，同时根据一定比例计算储能系统的出力数据。

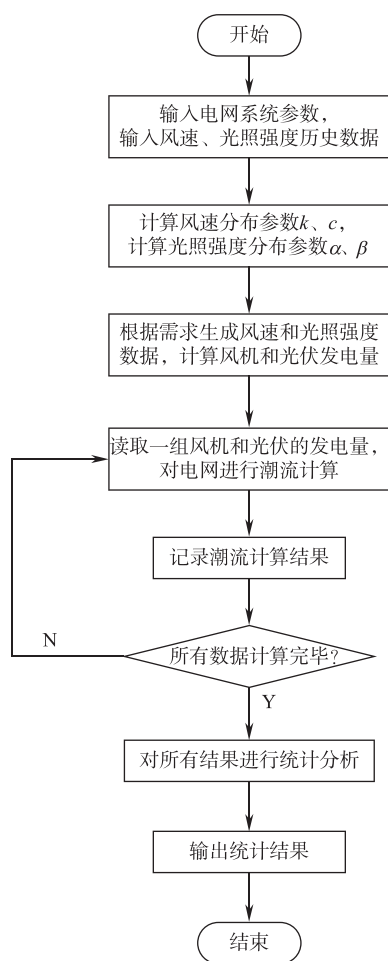


图1 基于蒙特卡洛法的随机潮流计算流程图

Fig. 1 Flow chart of stochastic power flow calculation based on Monte Carlo method

3) 输入系统的基准状态参数，输入风机、光伏和储能的出力数据和负荷数据。

4) 按照读取的数据进行确定潮流计算，并对计算结果进行统计。

5) 根据统计结果对微电网在对应参数下的可靠性进行评估。

由于潮流计算结果受到储能接入量的影响，因此在每次进行确定潮流计算时，不同容量的储能系统得出不同的微电网状态分布。

2 基于双层结构经济性的储能功率优化配置

本文提出由储能系统经济性和电网运行经济性构成的双层结构经济性评价指标，由于电网运行受电压和功率等条件的多重约束，因此求解电网储能配置的问题是一个多约束的规划问题。粒子群算法(PSO)是通过利用群体中个体对信息的共享使整个群体的运动在解空间中产生从无序到有序的演化过程，在多重约束下对目标函数寻优，最终求得最优解，适用于考虑随机过程的微电网储能优化配置。

2.1 构建目标函数

(1) 储能配置经济性评价指标

本文主要研究已有微电网的储能配置，不考虑储能以外的成本，仅考虑储能系统的成本及配置。

为了方便计算，使用下式将储能成本转化为日投资成本 C_{ESS} ，表达式为

$$\begin{cases} C_{ESS} = C_R \sum_{i=1}^{n_{ESS}} (\alpha_i E_{SOC,i} + \beta_i P_{ESS,i}) \\ C_R = \frac{r(1+r)^y}{365[(1+r)^y - 1]} \end{cases} \quad (9)$$

式中， C_{ESS} 为储能系统日投资成本； r 为储能系统折现率； y 为储能系统工作年限； n_{ESS} 为储能系统电池个数； α_i 、 β_i 为第 i 个储能电池的单位容量和功率成本。

储能系统的成本除了投资成本外，还需要考虑维护成本 C_{OM} ，取5万元/(MW·h)。

储能系统经济性评价指标 EI_E 为

$$EI_E = C_{ESS} + C_{OM} \quad (10)$$

(2) 电网运行经济性评价指标

微电网运行时，第*i*条支路的线路损耗为

$$\begin{cases} \Delta P_i = \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} R_i \\ \Delta Q_i = \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} X_i \end{cases} \quad (11)$$

式中， ΔP_i 为第*i*条支路的有功损耗； ΔQ_i 为第*i*条支路的无功损耗； P_i 为第*i*条支路流过的有功功率； Q_i 为第*i*条支路流过的无功功率； U_i 为第*i*条支路的电压； R_i 为第*i*条支路的线路电阻； X_i 为第*i*条支路的线路电抗。

电网运行时，线路的总损耗为

$$\begin{cases} \Delta P = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \\ \Delta Q = \sum_{i=1}^n \Delta Q_i \end{cases} \quad (12)$$

当电网运行时，线路损耗越低，电网运行经济性相对越好，因此，电网运行经济性评价指标 EI_P 为

$$EI_P = \sqrt{\Delta P^2 + \Delta Q^2} \quad (13)$$

(3) 综合评价指标

在分析微电网储能配置时，综合考虑储能配置经济性和电网运行经济性两方面因素，采用相乘法构造目标函数 EI_A ，即

$$EI_A = EI_E \times EI_P \quad (14)$$

储能配置经济性指标 EI_E 越小，说明储能成本越低；电网运行经济性指标 EI_P 越小，说明系统运行时损耗越低。因此，综合评价指标 EI_A 越小，储能配置的经济性和电网运行经济性均更优。

2.2 约束条件

在进行微电网储能容量配置时，本文主要考虑电网功率平衡约束及储能电池运行特性约束。

(1) 电网功率平衡约束

任一时刻，电源、储能的输出功率之和应与负荷的功率相同，即

$$\sum P_g + \sum P_e = \sum P_{load} \quad (15)$$

式中， P_g 为电源输出功率； P_e 为储能输出功率； P_{load} 为负荷功率。

(2) 电网电压约束

任一时刻，电网电压应在允许范围内波动，即

$$U_{min} \leq U \leq U_{max} \quad (16)$$

式中， U_{min} 为电网运行电压下限； U_{max} 为电网运行电压上限。

(3) 储能电池荷电状态及充放电功率约束

储能电池荷电状态（SOC）表示储能电池当前电量占储能容量 E_s 的比例，考虑到SOC对电池寿命的影响，SOC具有约束

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \quad (17)$$

储能电池的充放电功率需满足

$$P_{e,min} \leq |P_e(t)| \leq P_{e,max} \quad (18)$$

式中， $P_{e,min}$ 为储能电池最小运行功率； $P_{e,max}$ 为储能电池最大运行功率； $P_e(t)$ 为*t*时刻储能电池的充放电功率。

2.3 模型求解流程

基于粒子群优化算法求解储能配置流程图，如图2所示。将各粒子位置作为典型日各时刻储能系统输出功率，由充电功率和放电功率计算储能的容量配置，再进行蒙特卡洛随机潮流计算，得出各粒子适应度。通过改变粒子的位置，使粒子适应度降低，即目标函数值 EI_A 降低，得出最优的储能配置。算法的具体计算步骤为：

1) 输入微电网数据和风、光、负荷的历史数据；根据式（15）~式（18）确定微电网以及粒子群的约束条件。

2) 由风、光、负荷的历史数据，计算对应的分布参数，采用蒙特卡洛法生成计算数据；确定粒子群规模，由式（19）对粒子群进行初始化，其中，各粒子的位置为当前储能系统在典型日的出力，即

$$\begin{cases} x_i = x_{min} + \text{rand}() \times (x_{max} - x_{min}) \\ v_i = 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中， x_i 为第*i*个粒子的位置； x_{min} 和 x_{max} 为储能出

力的最小限值和最大限值； $\text{rand}()$ 为介于(0, 1)之间的随机数； v_i 为第*i*个粒子的速度。

3) 结合当前粒子位置 x_i 及步骤2)生成的计算数据,对微电网进行随机潮流计算,得到当前粒子位置下电网运行经济性评价指标 EI_p 。

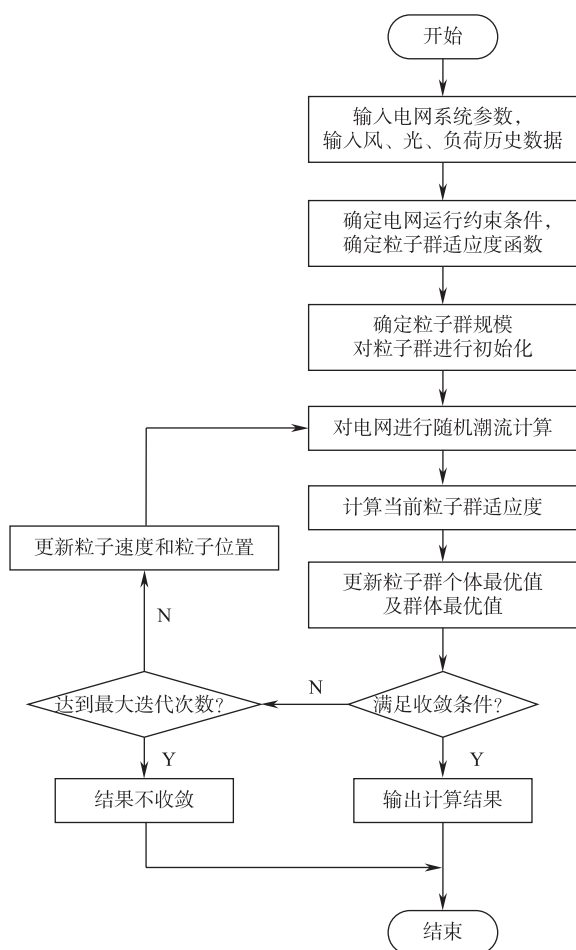


图2 基于粒子群优化算法求解储能配置流程图

Fig. 2 Flow chart of energy storage configuration based on particle swarm optimization algorithm

4) 由当前粒子位置计算储能系统经济性评价指标 EI_E ,结合电网运行的经济性评价指标 EI_p ,计算各粒子的当前适应度 EI_A 。

5) 更新粒子群个体最优值 p_{best} 以及群体最优值 g_{best} 。

6) 判断计算结果是否满足收敛条件或达到最大迭代次数。如果不满足收敛条件且没有达到最大迭代次数,则由式(20)更新粒子速度和粒子位置,转到步骤3)进行循环,即

$$\begin{cases} v_i^{n+1} = v_i^n + c_1 \times \text{rand}() \times (p_{\text{best}}^n - x_i^n) + \\ c_2 \times \text{rand}() \times (g_{\text{best}}^n - x_i^n) \\ x_i^{n+1} = x_i^n + v_i^{n+1} \end{cases} \quad (20)$$

式中,上标*n*代表迭代次数; c_1 和 c_2 为学习因子,通常 $c_1=c_2=0.5$ 。

如果满足收敛条件,则输出最优值;如果达到最大迭代次数且不满足收敛条件,则表示结果未收敛,需要优化算法或增大迭代次数。

3 算例验证

3.1 测试系统

本文以甘肃某配电网作为测试系统,如图3所示。其中0号节点为配电变压器所在位置,以系统负荷作为均值,采用2.1节所提方法生成负荷数据;为加快求解速度,根据有功网损灵敏度选出节点11接入风机,节点20接入光伏,对节点11、节点20和节点30进行储能配置。

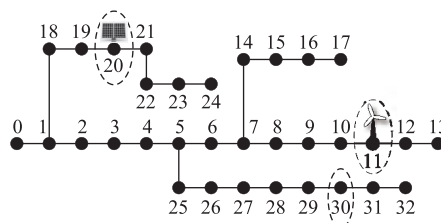


图3 配电网节点拓扑示意图

Fig. 3 Node topology diagram of demo distribution network

3.2 对比分析

本文采取两种方案对储能容量的配置进行优化计算,并对结果进行分析。两种方案的粒子个数均为100,空间维数为72。

方案一:不考虑随机潮流计算结果,进行储能配置计算。

方案二:采用随机潮流计算结果,结合经济性的目标函数进行储能配置计算。

为了验证本文所提方案不影响算法求解的收敛性,对比两种方案的收敛速度,计算收敛过程如图4所示。

由图4可以看出,本文所提的优化方案不影响粒子群算法的收敛性和收敛速度。

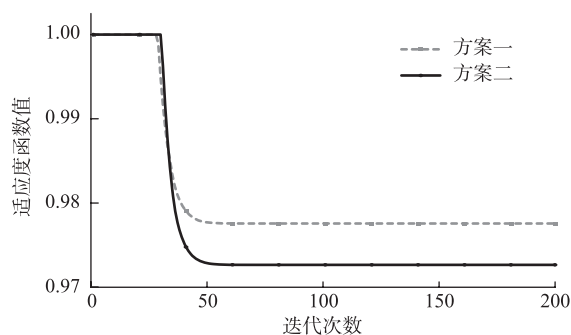


图4 计算收敛过程
Fig. 4 Calculation convergence process

两种方案储能系统的SOC变化曲线如图5所示。根据SOC变化曲线可以看出，三个节点的储能系统SOC均维持在健康区间内，且加入随机潮流计算后，可以降低SOC的波动范围。

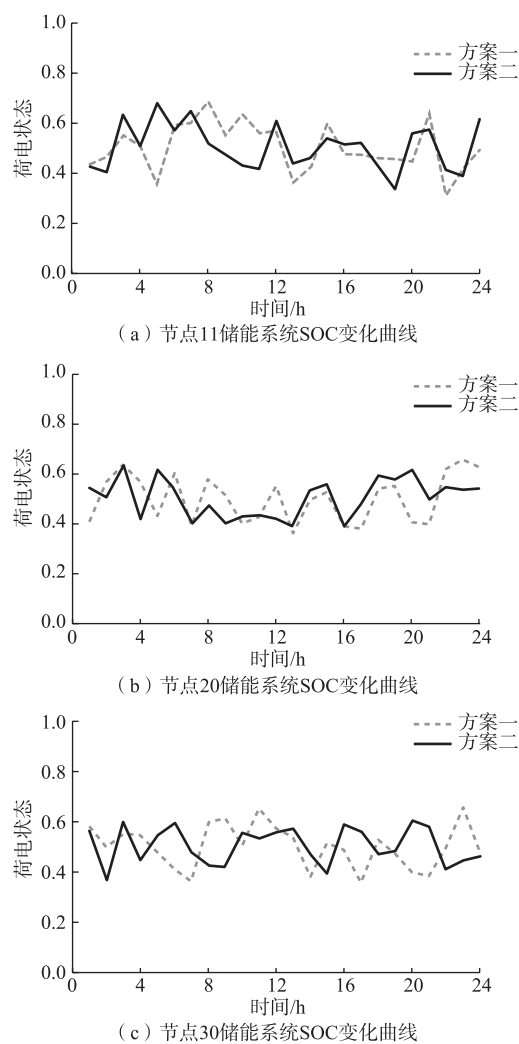


图5 储能系统荷电状态
Fig. 5 State of charged energy storage system

根据典型日各节点储能输出功率，可得出两种方案下储能配置及其成本，见下表。其中储能单位功率运行成本为50万元/MW，储能单位容量投资成本为150万元/（MW·h）。

表 两种方案下储能配置及其成本

Tab. Energy storage configuration and costs under the two schemes

	方案一	方案二
节点 11 (kW/kW·h)	188/1 674	210/1 165
节点 20 (kW/kW·h)	178/1 006	183/1 373
节点 30 (kW/kW·h)	193/1 193	165/1 215
总储能容量 (kW/kW·h)	559/3 873	558/3 753
储能配置和运行成本 / 万元	608.9	590.85

由上表看出，由于考虑随机潮流的结果，各节点配置储能容量有所变化，总容量相对降低，储能最大输出功率基本一致，因此成本相对较低，经济性更好。

两种方案下，进行随机潮流计算时的节点电压情况如图6所示。

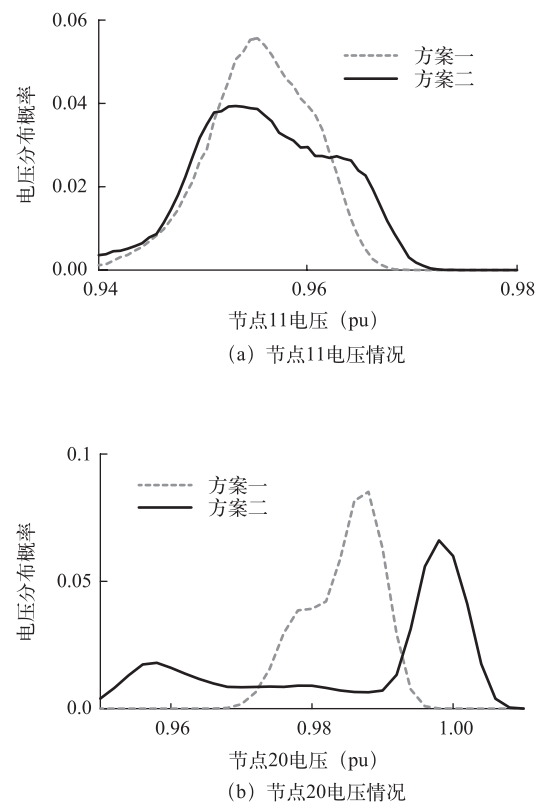


图6 两种方案的优化结果
Fig. 6 Optimization results of the two schemes

根据图6可知,将潮流计算结果作为储能优化目标的一部分,不影响电网电压质量。

图7为两种方案下,微电网中各支路功率越限指标情况。方案一的优化结果在某些支路仍然存在一定概率使支路功率过载;方案二可以很好地降低各支路流过的功率,并降低支路过载概率。

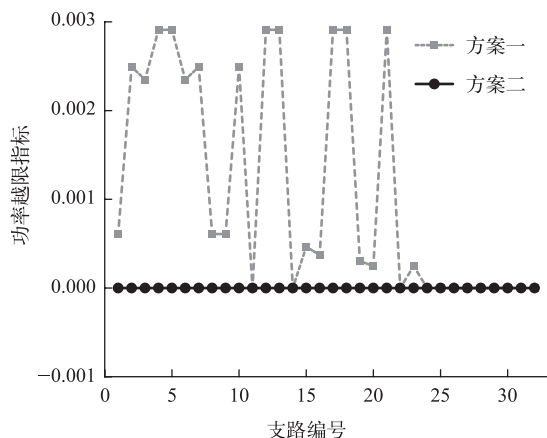


图7 支路功率越限风险评估结果

Fig. 7 Risk assessment results of branch power over-limit

4 结束语

本文针对微电网中可再生能源接入造成的安全稳定问题,提出基于随机潮流计算结果进行储能容量配置优化的方案。经过算例验证,本文的配置方案可以降低微电网储能配置的成本,改善微电网的电压质量,降低电网运行线路损耗,提高微电网运行效率。

参考文献

- [1] 胡国珍,段善旭,蔡涛,等.基于液流电池储能的光伏发电系统容量配置及成本分析[J].电工技术学报,2012,27(5):260-267.
- [2] 陈泽西,孙玉树,张妍,等.考虑风光互补的储能优化配置研究[J].电工技术学报,2021,36(S1):145-153.
- [3] 李振坤,李一骄,张代红,等.储能设备对有源配电网供电可靠性的影响分析及优化配置[J].电

网技术,2018,42(11):3676-3683.

- [4] 苏向敬,陈思利,米阳,等.分布式电池储能在含高比例可再生能源不平衡配电网中的序次优化配置[J].电网技术,2019,43(10):3698-3707.
- [5] 黄弦超.计及可控负荷的独立微网分布式电源容量优化[J].中国电机工程学报,2018,38(7):1962-1970,2211.
- [6] 周欣怡.提高需求响应可靠性的储能优化配置研究[D].合肥:合肥工业大学,2021.
- [7] 陆立民,褚国伟,张涛,等.基于改进多目标粒子群算法的微电网储能优化配置[J].电力系统保护与控制,2020,48(15):116-124.
- [8] 闫群民,董新洲,穆佳豪,等.基于改进多目标粒子群算法的有源配电网储能优化配置[J].电力系统保护与控制,2022,50(10):11-19.
- [9] 邵振,邹晓松,袁旭峰,等.基于改进多目标粒子群优化算法的配电网削峰填谷优化[J].科学技术与工程,2020,20(10):3984-3989.
- [10] 茆美琴,洪嘉玲,张榴晨.考虑光伏出力预测误差修正的储能优化配置方法[J].太阳能学报,2021,42(2):410-416.
- [11] QU B, et al. Dynamic power dispatch considering electric vehicles and wind power using decomposition based multi-objective evolutionary algorithm[J]. Energies, 2017, 10(12): 1991.
- [12] 王洪坤,葛磊蛟,李宏伟,等.分布式光伏发电的特性分析与预测方法综述[J].电力建设,2017,38(7):1-9.
- [13] 贾宏杰,戚艳,穆云飞.基于家居型温控负荷的孤立微电网频率控制方法[J].中国科学:技术科学,2013,43(3):247-256.

作者简介

孟中强(1982—),男,硕士,高级工程师,从事研究新能源电气及规划工作。

(收稿日期:2022-11-22)