

# 考虑储能电站的清洁能源并网电力系统 风险量化与安全效益评估

姜明军,王文婷

(兰州理工大学 电气工程与信息工程学院,兰州 730050)

## Risk quantification and security benefit assessment of clean energy grid connected to power system considering energy storage power stations

JIANG Mingjun, WANG Wenting

(School of Electrical Engineering and Information Engineering, Lanzhou University of Technology,  
Lanzhou 730050, China)

**摘要:**结合储能系统充放电切换迅速、发电调节便捷的特点,提出了兼顾储能电站的清洁能源并网电力系统风险量化与安全效益评估方案。首先,结合储能系统充放电特点,阐述了其对维持电网中长期安全生产、可靠运行以及协同促进清洁能源消纳机制的必要性。在此基础上,结合马尔科夫链蒙特卡洛仿真建立了考虑储能系统灵活充放电策略的紧急状态分析模型与风险评估模型。其次,采用经济性对比分析设计了储能电站综合效益的评价方案。最后,以修正的IEEE-6节点测试系统为例论证了所提模型与方案的有效性与先进性。

**关键词:**储能;灵活调节特性;马尔科夫链蒙特卡洛;风险量化分析;效益量化模型

**Abstract:** Combined with the characteristics of rapid switching between charge and discharge and convenient power generation adjustment of energy storage system (ESS), a clean energy grid-connected power system risk quantification and security benefit evaluation plan considering energy storage power stations is proposed. Firstly, combined with the charging and discharging characteristics of ESS, the necessity of maintaining the medium and long-term safe production, reliable operation of the power grid and the cooperative promotion of clean energy consumption mechanism is explained. On this basis, combined with markov chain monte carlo (MCMC), an emergency state analysis model and a risk assessment model considering the flexible charging and discharging strategy of ESS are established. Secondly, an evaluation plan for the comprehensive benefits of the energy storage power station was designed by economic comparison analysis. Finally, the revised IEEE-6 node test system is taken as an example to demonstrate the effectiveness and advancement of the proposed model and scheme.

**Key words:** energy storage; flexible adjustment characteristic; markov chain monte carlo; risk quantitative analysis; benefit quantitative model

## 0 引言

构建低碳环保、安全高效的新型电网是现代电力系统的基本特征。近年来,随着清洁能源并网渗透率逐年增加,开发面向清洁能源发展的并网协调控制技术与消纳机制成为国内外学者广泛关注的热点问题。在我国,受制于地区资源禀赋与设备装设水平的综合影响,清洁能源在实际生产、输出过程中往往难以实现高效、稳定、持续的能量输出。这种情况下,考虑到储能设备易于集成、动态响应速度快与能量转换效率高等一系列优点,研究如何发挥储能设备对协同促进清洁能源消纳的影响,实

收稿日期:2020-07-27;修回日期:2020-11-29

基金项目:国网甘肃省电力有限公司科技项目(52273019000B)

现源网储互补控制成为解决该问题的有效途径。

国内外学者在储能规划、储能调度、储能效益评价等方面开展了大量研究。文献[1]兼顾储能在全寿命周期内的动态投资流影响,提出考虑储能系统动态全寿命周期特性的多功能应用需求规划方法;文献[2]在兼顾系统供电可靠性基础上,提出面向集群划分的网源储多目标两步规划方案;文献[3]从经济学角度设计了考虑清洁能源随机性的微电网日前调度与储能优化调度模型;文献[4]分析了储能系统平抑清洁能源并网波动的作用,及由此带来的削峰填谷效益;文献[5]从经济层面综述了储能系统在能源互联网中的重要作用与商业运作模式;文献[6]聚焦虚拟电厂分布式储能的灵活调节策略,以提高并网收益为目的构建了优化调度方案;文献[7]给出了储能系统在配电系统的专项规

划模型;文献[8]、文献[9]给出了储能技术在电力系统中的应用,并据此给出了相应的建模方法。上述文献对储能各项研究工作的开展侧重技术经济性方面,较少考虑储能对降低电网运行风险、提升安全管理与控制等方面的影响。文献[10]以抽水蓄能电站作为研究对象,给出了面向多风电场与抽水蓄能电站联合系统的可靠性评估模型与容量可信度模型;文献[11]给出了储能提升高比例风电电力系统供电安全的概率评估方法。上述研究一定程度上补充了储能系统提高清洁能源电力系统供电安全或可靠性的作用与效益评估方法,但是因为清洁能源波动与系统调度是动态校正过程,以静态概率评估为基础开展的储能效益评估研究难以反映电力系统调度行为的动态时序特征。

探讨储能在小时级调度优化过程中,与常规机组协同平抑负荷与可再生能源不确定性,以改善系统调度安全性与系统发电经济性的效益提升与量化评估问题是本文研究工作的重点。基于该研究框架,本文分析了清洁能源发电不确定性对调度过程经济性/安全的影响,结合马尔科夫链蒙特卡洛仿真(markov chain monte carlo, MCMC)<sup>[12-13]</sup>给出完整的效益量化评估方案。本文的主要贡献包括:分析了储能对提升电网运行安全的影响,通过量化评估清洁能源电力系统调度运行问题中的运行风险,基于技术经济性对比,给出相应的效益评估方案,采用马尔科夫链蒙特卡洛仿真实现对电网运行风险的高效求解。应该指出,尽管储能在控制领域/灵活性评价领域也可以借助其快速充放电特性发挥调频阻尼控制、或负荷跟踪功能;但此类功能定位与本文描述研究内容相关度不大,因此暂时不将其纳入到本文研究范畴。

综上分析,本文的主要工作为:① 分析储能接入对降低电网运行风险的意义;② 给出含储能清洁能源电力系统的状态分析模型,并在此基础上结合马尔科夫链蒙特卡洛仿真给出相应的运行风险量化评估方案;③ 基于对比分析给出储能对提升电网运行安全的效益评价策略;④ 采用修正 IEEE-6 节点测试系统验证所提方案的有效性与先进性。

## 1 储能电站对提升电网运行安全必要性

储能设备包括电化学储能、热储能、抽水蓄能等,是通过在电力需求低谷时储电,在电力需求高时放电的方式帮助电网更好地融合风电与太阳能发电的一种新技术。储能增强了电网运行的灵活性,通过协调源-网-荷互补运行,在很大程度上促

进了电网对清洁能源的消纳与接纳能力<sup>[6]</sup>。作为灵活、可调节的供能方式,储能电站的全面推广与科学论证对建设“强支撑、高抗扰、善协同”并网友友好型电网具有重要意义。根据实际的应用场景不同,储能对电网运行安全的影响体现在:

(1) 储能设备可通过其灵活的充放电特性实现能量时移,这对平抑清洁能源发电波动与不同时间段的负荷需求具有重要作用。

(2) 储能设备作为外接桥接电能(这里指在外部电能消失或电源切换过程中,由外接设备提供的过渡电源),可通过提供备用容量、负荷跟踪、系统二次调频对电网运行发挥作用,这对应对故障状态的紧急处置问题具有重要意义。

储能设备的状态转移过程如图1所示。

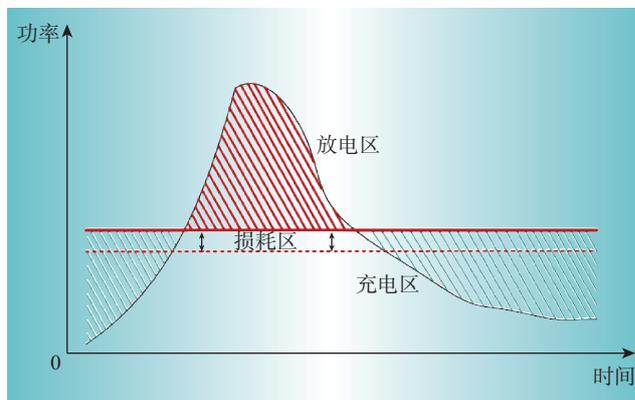


图1 储能设备的状态转移过程

Fig. 1 State transition process of energy storage device

在电力系统负荷低谷期作为负荷从电网汲取电能,在电力系统高峰或者清洁能源波动较剧烈时作为电源作为桥接电源配送至电网。结合储能工作原理,给出储能相应数学模型,即

(1) 储能在发电状态下的上下限约束

$$0 \leq u_t^{Ess} p_t^{Ess} \leq u_t^{Ess, max} p_t^{Ess, max} \quad (1)$$

(2) 储能在充电状态下的上下限约束

$$0 \leq v_t^{Ess} q_t^{Ess} \leq v_t^{Ess, max} q_t^{Ess, max} \quad (2)$$

(3) 储能充电电量的上下限约束

$$E_t^{Ess, min} \leq E_t^{Ess} \leq E_t^{Ess, max} \quad (3)$$

(4) 储能在放电状态过程中的电量损耗约束

$$E_{t+1}^{Ess} = E_t^{Ess} - \Delta E_t^{Ess} \quad (4)$$

$$\Delta E_t^{Ess} = (\eta_2 q_t^{Ess} - \eta_1^{-1} p_t^{Ess}) \Delta t \quad (5)$$

(5) 储能在不同工况下对应状态耦合约束

$$0 \leq u_t^{Ess} + v_t^{Ess} \leq 1 \quad (6)$$

式中:  $p_t^{Ess}$ 、 $p_t^{Ess, max}$  分别为储能在  $t$  时刻的发电功率与发电功率上限;  $q_t^{Ess}$ 、 $q_t^{Ess, max}$  分别为储能在  $t$  时刻的充电功率与充电功率上限;  $E_t^{Ess, max}$ 、 $E_t^{Ess, min}$  分别为储能可允许的充电电量的上、下限;  $E_{t+1}^{Ess}$ 、 $E_t^{Ess}$  分别

为储能在相邻时刻( $t+1$ 时刻与 $t$ 时刻)累积存储的电量值; $\Delta E_i^{\text{Ess}}$ 为储能在 $t$ 时刻的电量损耗情况; $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 分别为储能的充、放电转换系数;为避免储能边充电边放电的情况,需要限制储能在不同工况下的状态转换, $v_i^{\text{Ess}}$ 、 $u_i^{\text{Ess}}$ 分别为储能充放电的状态指示变量;当储能处于充电状态下, $v_i^{\text{Ess}}=1$ 、 $u_i^{\text{Ess}}=0$ ;反之,当储能处于发电状态时, $v_i^{\text{Ess}}=0$ 、 $u_i^{\text{Ess}}=1$ ;此外,当该储能处于闲置状态时, $v_i^{\text{Ess}}=0$ 、 $u_i^{\text{Ess}}=0$ 。

## 2 含储能的清洁能源并网电力系统状态分析模型

结合当前得到的系统状态,进行系统故障状态分析,求解可能的切负荷情况与发电机组出力调节功率。系统状态分析模型为

$$\min \sum_{j=1}^{N^{\text{Load}}} \Delta q_j^{\text{Load}} \quad (7)$$

(1) 系统有功功率平衡约束

$$\sum_{j=1}^{N^{\text{G}}} p_j^{\text{G}} + \sum_{j=1}^{N^{\text{Ess}}} p_j^{\text{Ess}} - \sum_{j=1}^{N^{\text{Ess}}} q_j^{\text{Ess}} + \sum_{j=1}^{N^{\text{Load}}} \Delta q_j^{\text{Load}} - \sum_{j=1}^{N^{\text{Load}}} q_j^{\text{Load}} = 0 \quad (8)$$

(2) 电网在当前状态下系统潮流安全约束

$$\forall l \in NL, \left| \sum_{b=1}^{NB} S_{l,b} \left( \sum_{j \in NB(N^{\text{G}})} p_j^{\text{G}} + \sum_{j \in NB(N^{\text{Ess}})} p_j^{\text{Ess}} - \sum_{j \in NB(N^{\text{Ess}})} q_j^{\text{Ess}} + \right. \right. \quad (9)$$

$$\left. \sum_{j \in NB(N^{\text{Load}})} \Delta q_j^{\text{Load}} - \sum_{j \in NB(N^{\text{Load}})} q_j^{\text{Load}} \right) \leq p_l^{\text{max}}$$

(3) 经校正后的发电机出力上下限约束

$$0 \leq p_j^{\text{G}} \leq p_j^{\text{G,max}} \quad (10)$$

(4) 切负荷功率上下限约束

$$0 \leq \Delta q_j^{\text{Load}} \leq q_j^{\text{Load}} \quad (11)$$

(5) 储能对应的约束

式(1)一式(6)

式中: $\Delta q_j^{\text{Load}}$ 为负荷 $j$ 的切负荷功率; $p_j^{\text{G}}$ 为发电机组 $j$ 的有功功率; $p_j^{\text{G,max}}$ 为发电机组 $j$ 的最大出力; $p_j^{\text{Ess}}$ 、 $q_j^{\text{Ess}}$ 分别为储能 $j$ 的发电、充电有功功率; $\Delta q_j^{\text{Load}}$ 为负荷 $j$ 的切负荷功率; $q_j^{\text{Load}}$ 为负荷 $j$ 的有功功率需求; $N^{\text{G}}$ 、 $N^{\text{Ess}}$ 、 $N^{\text{Load}}$ 分别为发电机组、储能、负荷的总数目; $S_{l,b}$ 为输电线路 $l$ ( $l \in NL$ )对节点 $b$ 的潮流分布转移因子; $p_l^{\text{max}}$ 为输电线路 $l$ 可承受的最大有功; $NB$ 为系统母线节点总数目; $NL$ 为系统输电线路总数目。

## 3 基于MCMC的电力系统风险量化评估

储能设备的加入使电网运行与故障状态下校正

控制过程更为复杂,这增加了系统风险量化评估的难度。常规基于蒙特卡洛仿真开展的风险量化评估基于静态抽样原理,较难刻画系统在复杂条件下故障演变与相关校正策略的影响<sup>[7]</sup>。据此,本文引入马尔科夫链蒙特卡洛仿真研究储能在清洁能源电力系统风险量化评估中的作用与影响。

MCMC是一种基于非常见概率分布的特殊抽样策略<sup>[8]</sup>,其基本原理是:结合拒绝—接受的采样思想,通过对通用概率分布进行采样生成马尔科夫序列,并使其平稳分布逼近到待研究的非常见概率分布。与常规蒙特卡洛仿真(monte carlo,MC)相比较,MCMC不仅可以实现对未知概率分布或动态随进型概率分布的有效模拟,对高维多元概率分布函数也具有较好的采样效率。

设随机过程 $\{x_t, t \in T\}$ 初始状态为 $x_0$ ;  $T$ 为单位时间间隔 $t$ 的集合; $I$ 为满足马尔科夫随机过程的系统状态的集合; $f(x_t)$ 为 $x_t$ 所对应的概率密度分布函数,针对任意时刻的系统状态 $x_t$ 满足应无后效性条件:

$$\begin{aligned} P\{x(t+1) = x_{t+1} | x(0) = x_0, x(1) = x_1, \dots, \\ x(t-1) = x_{t-1}, x(t) = x_t\} \\ = P\{x(t+1) = x_{t+1} | x(t) = x_t\} \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $\{x_t, t \in T\}$ 为马尔科夫链,根据柯尔莫哥洛夫定理可得:当 $t \rightarrow \infty$ 时, $x_t$ 与初始状态无关,其对应的状态密度分布即为稳态概率分布。由于采样所得到的马尔科夫链在尚未达到收敛时,其概率密度分布并不等于稳态分布。因此评估前,需要去掉前 $m$ 个采样序列(燃烧期),并将剩余采样值 $\{x_j, j = m+1, m+2, \dots, n\}$ 作为满足该未知概率密度分布函数 $f(x)$ 对应的采样值。此时 $f(x)$ 的期望为

$$E(f(x)) = \frac{1}{n-m} \sum_{j=m+1}^n f(x_j) \quad (13)$$

式(13)表示遍历平均,遍历定理保证了对任何一个固定的 $m$ ,在 $t \rightarrow \infty$ 时 $E(f(x))$ 会逐渐趋近于 $f(x)$ 的期望值,而该期望值是在 $x$ 的稳态分布为 $f(x)$ 的条件下得到的。

MCMC是在Metropolis-Hastings(M-H)采样框架下,利用建议分布产生一个潜在的转移点,并通过接受—拒绝方法决定是否转移至该样本点。不同的转移(由建议分布决定)与构造(由接受分布决定)对应不同的MCMC方法。以下采用Gibbs采样器给出故障状态的采样与分析流程<sup>[10]</sup>。

步骤1:初始化系统状态,假设第 $k$ 个系统状态为 $x_k = \{x_{1,k}, x_{2,k}, \dots, x_{j,k}, \dots, x_{L,k}\}$ ,对 $k+1$ 个系统状态进行MCMC采样。

步骤2:依次对系统各元件的故障/运行状态进

行随机采样:设第  $j$  次迭代得到的系统采样状态是  $\{x_{1,k+1}, \dots, x_{j-1,k+1}, x_{j,k}, \dots, x_{L,k}\}$ 。其中,  $\{x_{1,k+1}, \dots, x_{j-1,k+1}\}$  是第  $j-1$  次迭代得到的元件采样状态;  $\{x_{j,k}, \dots, x_{L,k}\}$  是待更新的系统元件状态。采用逆抽样原理,随机产生一个服从均匀分布  $U(0,1)$  的随机数  $u$ ,该元件发生故障的条件概率为

$$\eta = \frac{1}{\exp(p' - p'') + 1} \quad (14)$$

其中  $p'$ 、 $p''$  的具体表达式为

$$p' = \ln \left[ \prod_{k=1}^{j-1} \left( p_n^{1-x_{n,k+1}} (1-p_n)^{x_{n,k+1}} \right) \times p_j \times \prod_{k=j+1}^L \left( p_n^{1-x_{n,k}} (1-p_n)^{x_{n,k}} \right) \right] \quad (15)$$

$$p'' = \ln \left[ \prod_{k=1}^{j-1} \left( p_n^{1-x_{n,k+1}} (1-p_n)^{x_{n,k+1}} \right) \times (1-p_n) \times \prod_{k=j+1}^L \left( p_n^{1-x_{n,k}} (1-p_n)^{x_{n,k}} \right) \right] \quad (16)$$

第  $j$  个元件的运行状态判据为

$$x = \begin{cases} 1 & u \leq \eta \\ 0 & u > \eta \end{cases} \quad (17)$$

如此循环迭代  $L$  次,即可得到当前系统元件的具体状态。

步骤3:随机生成一个服从均匀分布  $U(0,1)$  的随机数,采用逆抽样原理<sup>[10]</sup>求取系统状态的状态持续时间。

$$\Delta t_{k+1} = - \frac{\ln u}{\sum_{i=1}^L [x_{i,k+1} \lambda_i + (1-x_{i,k+1}) \mu_i]} \quad (18)$$

步骤4:代入状态分析式(7)~(11),统计当前状态切负荷情况,如产生切负荷,将其累加统计到相应的可靠性评价指标中来。所采用的可靠性指标包括:

期望缺供电量 (expected energy not supplied, EENS):即系统在给定时间区间内因发电容量短缺或电网约束造成负荷削减的期望损失电量,为

$$EENS = \sum_{k=0}^{N_k} C_{k+1}^{Load} \Delta t_{k+1} \quad (19)$$

失负荷概率 (lost of load probability, LOLP):即电力系统在给定时间区间内因供求不匹配造成负荷削减的期望失负荷概率,为

$$LOLP = \sum_{k=0}^{N_k} F(C_{k+1}^{Load}) \Delta t_{k+1} \quad (20)$$

缺电频次 (lost of load frequency, LOLF):即电力系统在给定时间区间内因供求不匹配造成负荷削减的期望失负荷频率,为

$$LOLF = \sum_{k=0}^T F(C_{k+1}^{Load}) \quad (21)$$

式中:  $C_{k+1}^{Load} = \sum_{j=1}^{N_{Load}} \Delta q_j^{Load}$  为第  $k+1$  个系统状态的切负荷情况;  $F(C_{k+1}^{Load})$  为当前状态的指示函数,  $C_{k+1}^{Load} > 0$  时,  $F(C_{k+1}^{Load}) = 1$ ,反之,  $F(C_{k+1}^{Load}) = 0$ 。

步骤5:检验步骤4形成的风险指标是否达到收敛预期,如果达到收敛条件,退出计算过程并输出计算结果,否则转步骤2。所采用的收敛性条件为

$$Bs = \frac{\sqrt{\text{Var}(LOLP)}}{LOLP} \quad (22)$$

#### 4 基于风险评估的储能安全效益分析

为量化储能对提升电网运行安全的影响,这里基于MCMC风险量化评估,通过计算储能并网前后电力系统对应的期望停电损失(具体体现在EENS指标),以及不同的对比方案下的电力系统旋转备用情况,通过对比分析即可得到储能电站对电网风险效益的整体改善情况。

不妨设储能并网前后,电力系统风险评估结果依次是  $EENS_{\text{before}}$  与  $EENS_{\text{after}}$ ,此时储能并网产生的增量安全效益为

$$F = (EENS_{\text{before}} - EENS_{\text{after}}) \times Y \quad (23)$$

式中:  $Y$  为切负荷惩罚系数,本文取值为30元/kWh。

储能设备对提升电网安全效益的计算流程如图2所示。

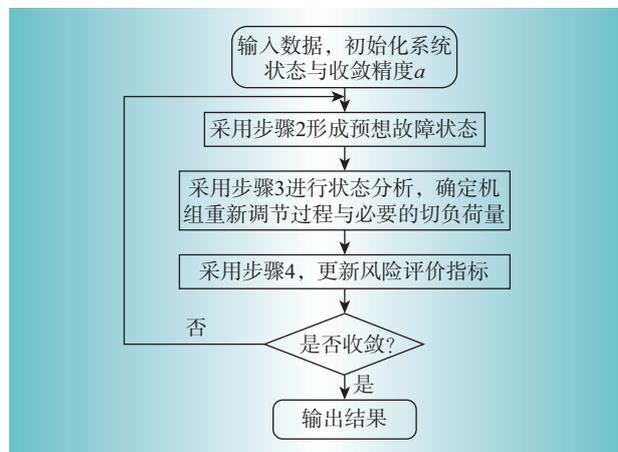


图2 基于MCMC的电力系统风险评估流程

Fig. 2 Risk assessment process of power system based on MCMC

#### 5 算例分析

以IEEE RTS 6-bus测试系统为例对所提模型进行有效性测试,该测试系统的具体网架拓扑结构单线图如图3所示。为反映清洁能源并网问题对电力

系统长期运行风险的影响,根据文献[10],假定风电机组安装在5号母线上,装机容量为50 MW。随机抽取若干风电场景,并通过场景削减技术<sup>[11]</sup>筛选典型场景,图4给出了本文所采用的典型风电场景。在此基础上,将储能装设在节点1上,分别在所得到的不同风电场景下开展电力系统运行风险评估,并将不同场景下得到的运行可靠性评估指标结果的期望值作为最终的评估结果。此处各可再生能源发电场景下开展的MCMC抽样收敛系数均设置为0.5%。

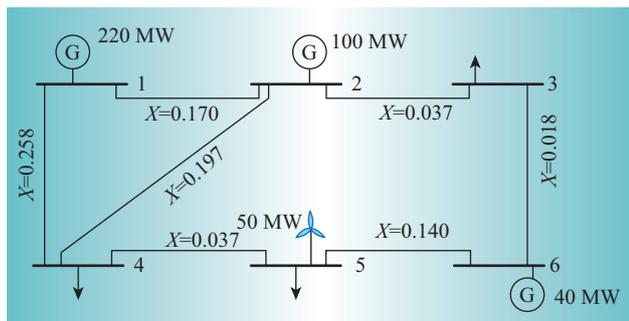


图3 测试系统的网架结构

Fig. 3 Grid structure of test system

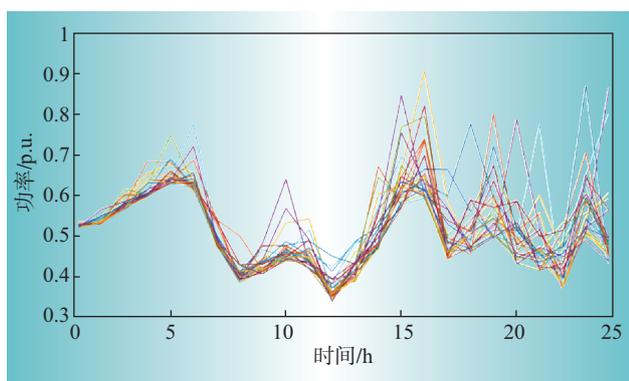


图4 典型风电场景

Fig. 4 Typical scenarios of wind power

储能投入前后电力系统运行可靠性结果的差异如表1所示。方案1为不考虑储能接入的电力系统运行风险评估方案;方案2为考虑储能接入的电力系统运行风险评估方案。

由表1可知,储能并网后电网各类运行风险指标呈现不同程度的降低,这揭示了储能对电网运行风险带来的效益。其中LOLP指标较对比方案下降了9.01%;LOLF指标较对比方案下降8.11%;EENS指标较对比方案下降了11.50%。代入式(23),由此可知储能并网产生的增量安全效益为 $(1.322 0-1.305 5) \times 10^2 \times 30 = 49.50$ 万元/年,这显示了将储能装设在电网以改善供电安全的优势。并进一步说明,储能电站并网对其运行方式改善最大的是电量效益,即通过灵活调节运行工况实现削峰填谷,从而避免系统切负荷情况的发生。

表1 不同方案的风险评估结果

Table 1 Risk assessment results for different approaches

场景数	方案1			方案2		
	LOLF/次	LOLP	EENS/MWh	LOLF/次	LOLP	EENS/MWh
1	2.085 6	0.006 0	1.452 7	2.045 8	0.005 6	1.449 6
2	2.452 3	0.008 4	0.957 0	2.342 4	0.008 3	0.802 0
3	1.415 7	0.009 9	1.296 7	1.358 9	0.009 4	1.209 7
4	1.948 1	0.006 4	1.215 4	1.875 0	0.006 1	1.051 1
5	0.826 1	0.007 1	1.606 2	0.726 2	0.006 1	1.317 2
6	1.231 5	0.005 3	1.797 6	1.205 0	0.004 5	1.621 6
7	1.206 5	0.003 8	0.951 2	1.196 1	0.003 5	0.826 6
8	1.271 0	0.006 0	1.253 3	1.055 2	0.005 0	1.158 2
9	1.250 7	0.003 9	1.365 3	1.029 7	0.003 6	1.160 9
10	2.100 1	0.006 3	0.871 1	1.833 3	0.005 1	0.853 2
11	1.110 5	0.008 6	1.891 5	1.032 8	0.007 4	1.531 6
12	0.095 8	0.003 0	1.878 6	0.078 3	0.002 5	1.755 1
13	1.103 7	0.003 2	1.858 2	1.095 0	0.002 9	1.697 3
14	2.086 6	0.005 6	2.402 3	1.675 8	0.005 4	2.133 6
15	1.053 8	0.004 1	1.380 1	0.886 9	0.003 3	1.302 1
16	1.049 7	0.003 8	1.347 9	0.997 3	0.003 1	1.242 1
17	1.042 9	0.003 6	1.349 2	0.980 1	0.003 4	1.262 7
18	2.031 6	0.009 8	1.253 2	2.013 4	0.009 2	1.042 5
19	1.029 4	0.003 0	1.247 5	0.892 4	0.002 6	1.165 6
20	2.024 0	0.008 9	2.226 7	1.790 4	0.008 4	1.856 7
平均值	1.420 8	0.005 8	1.480 1	1.305 5	0.005 3	1.322 0

在此基础上,为对比本文所提方案在储能效益分析中的有效性,本文将方差系数设置为0.05,并对比了常规蒙特卡洛仿真与MCMC进行风险评估的结果如表2所示。

表2 不同评估方案的计算效率对比

Table 2 Comparison of calculation efficiency of different evaluation schemes

方案	计算时间/s	迭代次数/次
基于MC的风险评估	79.20	7 851
基于MCMC的风险评估	56.32	5 032

由表2可知,与常规MC相比较,本文所提方案计算时间缩短了40.62%。这也说明:在相同收敛系数条件下,本文方法具有更好的采样效率,从而具备更优越的计算性能。

此外,为系统阐述储能安装布局对系统运行安全的影响,制作对比案例。方案2:将储能装设在母线5;方案3:将储能装设在母线1;方案4:将储能装设在母线6。在此基础上对含储能设备的清洁能源电力系统进行MCMC风险评估,从而得到结果如表3所示。

由表3可知,储能装设地点不同对电力运行的影响也各不相同。与将储能分别装设在电源侧相比较(方案3与方案4),储能靠近负荷侧(方案2),其对保障电力安全供电的能力相对越强。相应地,

表3 不同储能装设位置的电网风险评估指标

Table 3 Grid risk assessment indicators for different ESS installation locations

方案	LOLF/(次·年 <sup>-1</sup> )	LOLP	EENS/MW
方案2	1.305 5	0.005 3	1.320 0
方案3	1.387 8	0.005 7	1.364 1
方案4	1.385 0	0.005 4	1.335 0

运行风险评估指标越小。究其原因在于,节点5属于独立负荷节点,线路4与线路5任意一条停运均会导致负荷脱扣。将储能装设在该节点显然能一定程度提高负荷被迫脱扣的概率与严重度。

## 6 结束语

本文以储能对提升电力系统安全效益作为研究背景,结合马尔科夫链蒙特卡洛仿真提出一套崭新的电力系统运行风险评估方案。该方法考虑了储能设备对电力系统短期运行的影响以及储能电站工况转换实际物理约束,通过建立精确有效的储能单体数学模型及其状态分析模型,实现了电力系统运行风险的精细化评价。最后以修正的IEEE-6节点测试系统为例,论证了所提模型的有效性。该方法为短期时间尺度下研究储能对提升电网安全及其效益评价提供了新思路。D

## 参考文献:

[1] 李湘旗,禹海峰,李欣然,等.考虑储能系统动态全寿命周期特性的多功能应用需求规划方法[J].电力建设,2020,41(1):45-54.  
LI Xiangqi, YU Haifeng, LI Xinran, et al. Planning method for multi-functional demand considering dynamic life cycle characteristics of energy storage[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(1):45-54.

[2] 胡迪,丁明,毕锐,等.基于集群划分的网-源-储多目标两步规划[J].电力系统自动化,2020,44(2):94-103.  
HU Di, DING Ming, BI Rui, et al. Two-step planning of grid-resource-storage based on cluster partition[J]. 2020, 44(2):94-103.

[3] 严海波,康林贤,周冬.考虑随机性的微电网日前调度与储能优化模型[J].电网与清洁能源,2019,35(11):61-65.  
YAN Haibo, KANG Linxian, ZHOU Dong. Optimal model of day-ahead dispatching and energy storage for micro-grid considering randomness[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(11):61-65.

[4] 李东辉,时玉莹,李扬.储能系统在能源互联网中的商业模式研究[J].电力需求侧管理,2020,22(2):77-82.  
LI Donghui, SHI Yuying, LI Yang. Research on business model of storage system in energy Internet[J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(2):77-82.

[5] 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.  
GUO li, XUE Guiyuan, WU Chen, et al. Research on economic evaluation of energy storage applied to load shift[J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(5):31-34.

[6] 王睿喆.基于分布式电源功率预测的虚拟电厂优化调度模型研究[D].北京:华北电力大学,2017.  
WANG Ruizhe. Research on the optimal dispatching model of virtual power plant based on electrical power forecast of distribution generation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.

[7] SEYED A B, JAMSHID A, SASAN P, et al. Robust planning of distributed battery energy storage systems in flexible smart distribution networks: a comprehensive study[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 123.

[8] 张文亮,丘明,来小康.储能技术在电力系统中的应用[J].电网技术,2008(7):1-9.  
ZHANG Wenliang, QIU Ming, LAI Xiaokang. Application of storage techniques in power systems[J]. Power System Techniques, 2008(7):1-9.

[9] 黎淑娟,李爱魁,黄际元,等.储能在高占比可再生能源系统中的应用及关键技术[J].供用电,2020,37(2):3-7,40.  
LI Shujuan, LI Aikui, HUANG Jiyuan, et al. The application and key technologies of energy storage in high-proportion renewable energy systems[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(2):3-7, 40.

[10] 王蔓莉.多风电场一抽水蓄能联合系统的可靠性评估和容量可信度模型[D].重庆:重庆大学,2016.  
WANG Manli. Reliability evaluation and credible capacity model of joint system consist of multi-wind farms and pumped power storage station[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.

[11] 禹海峰,潘力强,吴亚茹,等.储能提升含高比例风电电力系统可靠性分析[J].电网与清洁能源,2020,36(6):92-98.  
YU Haifeng, PAN Liqiang, WU Yaru, et al. Analysis of energy storage improving the reliability of power system with high proportional wind power[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(6):92-98.

[12] 石文辉,别朝红,王锡凡.大型电力系统可靠性评估中的马尔可夫链蒙特卡洛方法[J].中国电机工程学报,2008(4):9-15.  
SHI Wenhui, BIE Zhaohong, WANG Xifan. Applications of markov chain monte carlo in large-scale system reliability evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008(4):9-15.

[13] 倪伟,吕林,向月,等.基于马尔可夫过程蒙特卡洛法的综合能源系统可靠性评估[J].电网技术,2020,44(1):150-158.  
NI Wei, LYU Lin, XIANG Yue, et al. Reliability evaluation of integrated energy system based on markov process monte carlo method[J]. Power System Technology, 2020, 44(1):150-158.

### 作者简介:

姜明军(1981),男,山东潍坊人,高级工程师,主要从事电力市场开拓、业扩报装与电能替代管理工作;  
王文婷(1987),女,甘肃兰州人,硕士,研究方向为电力系统自动化。

(责任编辑 曹阳)