

考虑频率-电压稳定性提升的配电网储能 优化配置方法研究

苏其莉¹, 刘珈毅², 阮鹏¹, 张柳丽¹, 赵亚一¹, 肖迁²

(1. 平高集团储能科技有限公司, 天津 300308;

2. 天津大学 智能配用电装备与系统全国重点实验室, 天津 300072)

摘要: 随着高比例新能源的规模化接入, 配电网的频率和电压稳定性显著降低, 为此, 提出一种考虑频率-电压稳定性提升的配电网储能优化配置方法。首先, 基于惯量理论和转子运动方程推导新能源扰动与频率变化关系式, 提出一种考虑频率安全约束的储能系统装机总容量测算方法; 其次, 基于潮流计算方程, 推导配电网电压稳定性评估指标; 然后, 综合考虑电压稳定性指标和储能装设成本, 构建配电网潮流平衡、节点电压、考虑频率安全的储能建造以及储能功率约束条件, 建立面向频率-电压稳定性提升的储能优化配置模型; 最后, 通过改进 IEEE 33 节点系统算例仿真, 验证了所提配置方法的有效性。结果表明, 采用所提方法配置储能, 能够在功率扰动下将频率偏差值和各线路电压稳定性控制在安全范围内, 同时有效降低储能安装的经济成本, 有助于提升配电网的频率-电压稳定性。

关键词: 高比例新能源; 配电网; 频率-电压稳定性; 储能优化配置

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd26628

Research on the Optimal Configuration of Energy Storage in Distribution Networks Considering the Improvement of Frequency-Voltage Stability

SU Qili¹, LIU Jiayi², RUAN Peng¹, ZHANG Liuli¹, ZHAO Yayi¹, XIAO Qian²

(1. Pinggao Group Energy Storage Technology Co., Ltd., Tianjin 300308, China;

2. State Key Laboratory of Smart Power Distribution Equipment and System, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: With the large-scale access of a high proportion of new energy, the frequency and voltage stability of the distribution network has significantly decreased. Therefore, an optimal configuration method for energy storage in the distribution network considering the improvement of frequency-voltage stability was proposed. Firstly, based on the inertia theory and the rotor motion equation, the relationship between the disturbance of new energy and the frequency change was derived, and a calculation method for the total installed capacity of the energy storage system considering the frequency safety constraint was proposed; secondly, based on the power flow calculation equation, the evaluation index of voltage stability of the distribution network was derived; then, comprehensively considering the voltage stability index and the installation cost of energy storage, the power flow balance of the distribution network, the node voltage, the construction of energy storage considering frequency safety, and the power constraint conditions of energy storage were constructed, and the energy storage optimization configuration model for improving the frequency-voltage stability was established; finally, the effectiveness of the proposed configuration method was verified through the simulation of the improved IEEE 33-node system example. The results show that configuring energy storage by the proposed method can control the frequency deviation value and the voltage stability of each line within a safe range under power disturbance. At the same time, it effectively reduces the economic cost of energy storage installation and helps to improve the frequency-voltage stability of the

基金项目: 国家自然科学基金(52477117, U24B6008); 平高集团储能科技有限公司科技项目(PGKJ2024-234)

作者简介: 苏其莉(1983—), 女, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化、储能技术, Email: 15037573391@163.com

通讯作者: 刘珈毅(2003—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为高比例新能源配电网优化调度, Email: jiayiliu216@tju.edu.cn

distribution network.

Key words: high proportion of new energy; distribution network; frequency-voltage stability; optimal allocation of energy storage

随着“双碳”目标的深入推进与能源结构的加速转型,配电网正经历着从传统辐射状结构向高比例新能源、多元负荷融合系统转变^[1-2]。新能源发电的间歇性、电力电子设备的广泛接入以及负荷动态特性的显著变化,导致配电网惯量支撑能力下降、频率波动加剧、电压调控难度增大,给系统安全稳定运行带来严峻挑战^[3]。储能系统作为能源存储与释放核心环节,具备快速功率调节、能量转移特性,可通过提供惯量响应、参与频率调节、支撑电压稳定等功能,有效弥补新能源接入带来的系统惯性不足与动态调节能力缺陷^[4-5]。通过储能系统的合理配置与容量优化,实现对系统频率偏差的精准控制以及电压稳定的均衡调节,对于提升配电网抗扰动能力、增强运行韧性具有重要理论意义与工程价值。

现有研究针对频率-电压稳定性评估指标和储能优化配置展开了相关研究。保障频率安全是配电网稳定运行的核心目标之一,其安全特性评估需综合考虑系统惯量支撑能力、频率波动幅度及恢复特性。传统配电网依赖同步发电机提供转动惯量,而高比例新能源接入导致系统惯量水平下降,频率安全性问题凸显。在频率安全性评估指标方面,现有研究多聚焦于频率偏差、频率变化率、惯量响应能力及频率恢复时间等关键参数。文献[6]提出一种综合稳定性指标,通过量化电压与频率动态过程中的耦合效应,为含新能源的配电网频率安全性评估提供了新视角。文献[7]在研究含分布式能源与储能系统的配电网动态恢复策略时,将频率偏差阈值和恢复时间作为核心约束条件,强调储能系统在快速响应频率波动中的关键作用。针对高比例电力电子设备接入引发的惯量支撑不足问题,文献[8]在AC/DC混合配电网储能配置中引入惯量等效系数,通过建立储能系统充放电功率与系统惯量的映射关系,量化储能对频率安全性的提升效果。文献[9]提出的移动储能车预配置方法,以频率波动幅度和持续时间为优化目标,验证了储能动态调度对改善间歇性负荷导致的频率振荡问题的有效性。上述研究表明,频率安全性评估指标正从单一的稳态偏差分析向动态过程量化转变,为储能优化

配置提供了约束条件。

电压稳定性是配电网安全运行的另一重要维度,当前研究大多将节点电压偏移、谐波畸变率及电压恢复能力等指标纳入评估体系。文献[10]在含高比例光伏的配电网混合储能配置中,将节点电压偏差率和电压波动幅值作为核心评估指标,通过需求侧响应与储能协同优化,有效抑制了光伏接入引发的电压波动。文献[11]提出的分布式储能分层优化配置方法,以电压合格率和电压稳定裕度为约束条件,结合灵敏度分析确定储能最佳接入位置,提升了配电网电压调控能力。

随着配电网向高可靠性方向发展,单一稳定性指标已无法满足复杂运行场景需求,综合评估指标的建立成为研究热点。配电网稳定运行综合评估通常融合频率与电压稳定性指标,同时考虑经济性、可靠性、新能源消纳能力等多类目标。文献[12]中指出,综合评估指标需涵盖频率偏差均方根值、电压稳定裕度、储能利用效率及碳减排效益,为含电-氢混合储能系统的优化配置提供了指标框架。文献[13]提出的云边协同调度框架,将频率响应速度、电压调节精度与系统运行经济性耦合,构建了多目标综合评估模型,验证了储能在提升配电网综合稳定性中的协同效应。在可靠性与经济性协同方面,文献[14]建立了含可靠性约束的储能配置模型,以频率/电压越限时间、停电损失成本及投资运维费用为综合目标,通过机会约束规划方法平衡稳定性与经济性。文献[15]在输配电网协同规划中,将频率-电压稳定性指标与微电网接入容量、网络损耗结合,提出基于非均匀离散选择的综合评估方法,为大规模储能接入提供了规划依据。此外,文献[16]和文献[17]分别采用目标级联分析算法和改进粒子群算法,在光储协同配置和双层储能容量优化中,将频率波动幅值、电压偏差率与系统经济性指标联立,验证多目标优化对提升配电网综合稳定性的有效性。上述研究表明,综合评估指标体系正朝着多物理量耦合、多目标协同的方向发展,为储能优化配置提供了更全面的决策依据。

在高比例分布式能源接入配电网背景下,储能设备的精细化建模也逐渐成为储能设备实际运行中提升系统稳定性与经济性的关键环节。文献[18]针对储能提升系统可靠性与降低运行经济性问题,提出综合考虑配电网可靠性和运行经济性的两阶段储能优化配置方法,但该研究在储能建模维度方面存在局限,储能充放电过程中物理特性等实际运行场景下的动态细节未被纳入模型考量,实际应用价值受限。文献[19]通过阿伦尼乌斯方程,揭示低温条件下电池寿命衰减机理,构建电池全温度范围的老化模型,进而制定了考虑电池寿命衰减的微电网优化调度策略,为储能精细化建模与调度、配置方法的结合提供新思路。除了寿命衰减,储能充放电倍率、变流器效率等因素将制约系统扰动下储能设备响应速度,威胁系统恢复稳定运行的调节能力^[20]。同时,储能调度也将影响储能运行的维护成本,进而影响系统运行经济性^[18]。上述研究为本文刻画并网储能变流器动态效率约束与构建储能装设成本函数提供理论基础,使得配置方案中储能充放电行为更贴合实际应用中并网变流器效率随工况波动的复杂特性,进而准确全面地考量储能装设经济成本,实现多目标下储能最优配置。

为提升配电网稳定运行能力,本文提出一种考虑频率-电压稳定性提升的配电网储能优化配置方法。首先,推导新能源扰动与频率变化关系式,提出考虑频率安全约束的储能系统装机总容量测算方法;其次,基于潮流计算方程推导电压稳定性评估指标;然后,综合考虑电压稳定性指标和储能装设成本,构建配电网潮流平衡、节点电压等约束条件,建立面向频率-电压稳定性提升的储能优化配置模型;最后,通过改进的IEEE 33节点系统进行算例仿真,验证了所提配电网储能优化配置方法的有效性。

1 考虑频率安全约束的储能系统装机总容量测算方法

1.1 新能源扰动与频率变化关系式

在电力系统中,惯量是用于衡量物体惯性大小的物理量,反映着电力系统内发电机或系统整体维持当前运行状态保持不变的能力。同步发电机中的动能本质上属于机械能范畴,是旋转元件旋转运动蓄积的能量,其动能计算公式可以表示为

$$E_k = \frac{1}{2} J \omega_n^2 \quad (1)$$

式中: E_k 为发电机动能; J 为发电机转动惯量; ω_n 为发电机额定转速。

当电力系统内发生功率缺额导致频率波动时,同步发电机转子动能转化为电磁功率,短时间内可为系统提供惯性支撑,因此,同步发电机的等效惯性常数 H_C 可以表示为

$$H_C = \frac{E_k}{S_N} \quad (2)$$

式中: S_N 为发电机额定容量。

当系统中存在多同步发电机时,系统惯量可认为由多同步发电机共同提供,系统惯量定义 H_{sys} 为所有发电机动能之和与容量之和的比值,表达式如下式所示:

$$H_{sys} = \frac{\sum_{i \in C} E_{k,i}}{\sum_{i \in C} S_{N,i}} \quad (3)$$

式中: $E_{k,i}$ 为第 i 台同步发电机动能; $S_{k,i}$ 为第 i 台同步发电机的额定容量; C 为系统内包含的所有同步发电机集合。

同步发电机的转子运动方程描述了其转子的机械运动状态,反映了作用在转子上的转矩与转子运动之间的关系。在频率安全性分析中,扰动后的系统频率动态变化过程可以用等效转子运动方程刻画:

$$2H_{sys} \frac{d\Delta f_{sys}}{dt} + D\Delta f_{sys} = \Delta P_m - \Delta P_e \quad (4)$$

式中: $d\Delta f_{sys}/dt$ 为系统频率变化率,记作 $RoCoF_{sys}$; D 为阻尼系数; ΔP_m 为总机械功率变化量; ΔP_e 为总电磁功率变化量;各变量均取标么值。

在扰动发生短时间内,因机械摩擦和电磁感应产生的阻尼项作用较小,可以忽略该项,则等效转子运动方程可进一步简化为

$$2H_{sys} \frac{d\Delta f_{sys}}{dt} = \Delta P \quad (5)$$

式中: ΔP 为系统总功率变化量。

1.2 储能系统装机总容量测算方法

储能可以作为电源主动向并网系统供电,也能作为负荷主动消纳并网系统中多余电能,具有功率双向性。在电力系统突发功率缺额时,基于上述特性储能可快速充、放电实现功率补偿,以抑制功率扰动引发的频率波动,降低频率偏差过大触发系统低频减载误动作。储能爬坡速率直

接决定其响应功率波动的快慢,高爬坡速率的储能系统可以在短时间内输出大量功率,快速弥补功率缺口,减少频率持续下降的时间,维持稳定系统频率。

储能爬坡公式用于描述储能系统功率随时间的变化情况:

$$P(t) = \begin{cases} P_0 & t = 0 \\ P_0 + \frac{E_{\text{capacity}}}{t_{\text{max}}} t & 0 < t \leq t_{\text{ramp}} \\ P_{\text{max}} & t > t_{\text{ramp}} \end{cases} \quad (6)$$

$$t_{\text{ramp}} = \frac{P_{\text{max}} t_{\text{max}}}{E_{\text{capacity}}} \quad (7)$$

式中: $P(t)$ 为储能系统在 t 时刻的输出功率, $P(t)$ 为正值时表示储能放电功率, $P(t)$ 为负值时表示储能充电功率; P_0 为储能初始功率; E_{capacity} 为当前装设的同类型储能总容量; t_{max} 为储能由完全放电至完全充电所需最短时间; t_{ramp} 为储能从初始功率到达最大/最小功率所需的爬坡时间; P_{max} 为储能所允许的最大放电功率或最小充电功率限制。

由式(5)可得出频率变化率表达式如下:

$$\frac{d\Delta f_{\text{sys}}}{dt} = \frac{\Delta P}{2H_{\text{sys}}} \quad (8)$$

储能的接入可以通过充放电动作平抑功率波动,即储能开始作用后的系统功率扰动为

$$\Delta P_t = \Delta P - P(t) \quad (9)$$

式中: ΔP_t 为储能开始作用后 t 时刻系统功率扰动。因此,考虑储能响应能力的系统扰动下频率变化率为

$$\frac{d\Delta f_{\text{sys},t}}{dt} = \frac{\Delta P - P(t)}{2H_{\text{sys}}} \quad (10)$$

在等效转子运动方程成立的短时间期限内,对式(10)两端同时对时间 t 取积分,可得:

$$\Delta f_{\text{sys},t} = \int \frac{\Delta P - P(t)}{2H_{\text{sys}}} dt \quad (11)$$

式中: $\Delta f_{\text{sys},t}$ 为系统发生扰动且储能开始作用 t 时刻的系统频率偏差值。

为避免触发低频减载设备动作,需将频率偏差值维持在最大频率偏差值 Δf_{max} 以内,即需满足下式:

$$\Delta f_{\text{sys},t} \leq \Delta f_{\text{max}} \quad (12)$$

联合式(11)、式(12)可得:

$$E_{\text{capacity}} \geq \left[\frac{2(\Delta P - P_0)}{t} - \frac{4\Delta f_{\text{sys},t} H_{\text{sys}}}{t^2} \right] t_{\text{max}} \quad (13)$$

为使储能尽可能快速响应系统扰动,储能响

应时间至少应满足:

$$t \leq t_{\text{max}} \quad (14)$$

因此,代入 $t=t_{\text{max}}$ 可取得式(13)右侧最大值:

$$E_{\text{capacity}} \geq \left[2(\Delta P - P_0) - \frac{4\Delta f_{\text{sys},t} H_{\text{sys}}}{t_{\text{max}}} \right] t_{\text{max}} \quad (15)$$

为保障系统功率扰动下的频率安全,接入储能的容量至少应满足式(15)。

2 电压安全评估指标

本文基于如图1所示的线路模型构建电压安全评估指标。图中, U_1, U_2 为线路始、末端母线电压。

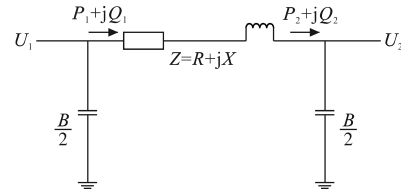


图1 输电线路示意图

Fig.1 Diagram of transmission line

根据图1,建立潮流方程:

$$\begin{cases} P_1 - P_2 = \frac{(P_2^2 + Q_2^2)R}{U_2^2} \\ Q_1 - Q_2 = \frac{(P_2^2 + Q_2^2)X}{U_2^2} \end{cases} \quad (16)$$

式中: R, X 为线路上电阻、电抗; P_1, P_2 为线路始、末端有功功率; Q_1, Q_2 为线路始、末端无功功率。

以 P_2 为自变量,可得:

$$0 = \frac{R^2 + X^2}{U_2^2} P_2^2 + \left[R + \frac{2X}{U_2^2} (RQ_1 - XP_1) \right] P_2 + \frac{1}{U_2^2} (RQ_1 - XP_1)^2 - RP_1 \quad (17)$$

构建电压稳定性指标为

$$L_j = \frac{4}{U_2^4} (RQ_1 - XP_1)^2 - \frac{4}{U_2^2} (XQ_1 + RP_1) \quad (18)$$

式中: L_j 为 j 线路的电压稳定性指标,其数值越小,表征该线路电压稳定性越强^[21]。

根据一元二次方程根的判别式,当 $L_j < 1$,配电网安全运行;当 $L_j = 1$,配电网接近安全风险;当 $L_j > 1$,配电网处于崩溃。

由于配电网将从最薄弱线路开始崩溃,因此全系统的电压稳定指标 L 取所有支路中电压稳定指标的最大值,即

$$L = \max(L_1, L_2, \dots, L_m) \quad (19)$$

式中: m 为城市电网线路总数。

3 面向频率-电压稳定性提升的储能优化配置模型

3.1 目标函数

所提模型的目标函数为

$$y = \min(L + P) \quad (20)$$

其中

$$P = \sum_{i=1}^N C_i x_i y_i \quad (21)$$

式中: L 为电压稳定性指标; P 为储能装设成本; N 为可安装储能位置总数; C_i 为装设第*i*台储能单位容量(1 MW)的总成本; x_i 为第*i*个储能可装设点是否装设储能标志位; y_i 为第*i*个储能可装设点储能装设容量。

装设储能标志位 x_i 赋值规则如下:

$$x_i = \begin{cases} 0 & \text{该位置不装设储能} \\ 1 & \text{该位置需装设储能} \end{cases} \quad (22)$$

3.2 约束条件

1) 配电网潮流平衡约束:

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j \in N_i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j \in N_i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (23)$$

式中: P_i, Q_i 分别为节点*i*处注入的有功、无功功率; U_i 为节点*i*的电压幅值; N_i 为与节点*i*相邻支路末端节点集合; G_{ij}, B_{ij} 分别为节点*i*和节点*j*之间电导、电纳; θ_{ij} 为节点*i*与节点*j*之间电压相角差值。

2) 节点电压约束:

$$U_{\min,i} \leq U_i \leq U_{\max,i} \quad (24)$$

式中: $U_{\min,i}, U_{\max,i}$ 分别为节点*i*的电压最小、最大幅值。

3) 考虑频率安全的储能建造约束:

$$\sum_{i=1}^N x_i y_i \geq E_{\text{capacity}} \quad (25)$$

其中, E_{capacity} 参考式(15)计算可得。

4) 储能功率约束:

$$|P_0| \leq |P_i(t)| \leq |P_{\max}| \quad (26)$$

式中: $P_i(t)$ 为*t*时刻配置的第*i*台储能设备的输出功率。

5) 储能变流器动态效率:

$$\eta_{\text{con},i} = k_1 P_{R,i} + k_2 / P_{R,i} + k_3 \quad (27)$$

式中: $\eta_{\text{con},i}$ 为第*i*台储能变流器动态效率; $P_{R,i}$ 为变流器传输功率比,即 $P_{R,i} = P / P_N, P_N$ 为储能设备额

定传输功率。

4 算例仿真

4.1 算例设置

本研究在改进的IEEE 33节点系统(如图2所示)中开展仿真验证,并选取典型时刻的系统节点负荷数据,反映了电力系统长期运行时可能出现的各类负荷情况,具有一定代表性和实用性。在该系统的具体配置方面,节点1处接入发电机组,为整个系统稳定供电;节点17和节点32处分别接入了光伏发电机组,且在 $t=t_0$ 时刻因光照变化分别发生1 MW和0.5 MW波动。

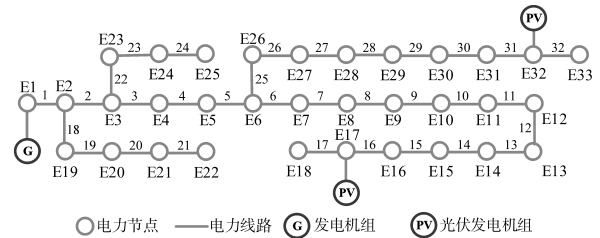


图2 改进的IEEE 33节点系统

Fig.2 Improved IEEE 33-node system

在该场景中各节点均可配置储能,且各节点装设1 MW·h储能的单位价格如图3所示。储能装设位置通过 x_i 标识,对应位置的储能装设容量使用 y_i 标识,组成储能选址定容矩阵 X :

$$X = [x_1, \dots, x_{33}, y_1, \dots, y_{33}] \quad (28)$$

以上过程采用粒子群算法对储能优化配置模型进行求解。

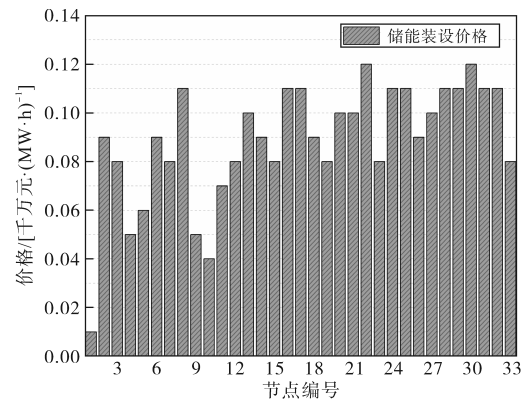


图3 各节点储能装设价格图

Fig.3 Cost diagram of energy storage installation at various nodes

为证明本文所提储能优化配置策略的可行性及其优势,设计以下3种调度方案进行验证:

方案1:未配置储能。

方案2:采用所提指标,配置2 MW·h储能(该容量未满足本文所提考虑频率安全约束的储能装设容量最小需求)。

方案3:采用所提指标,配置2.15 MW·h储能(该容量满足本文所提考虑频率安全约束的储能装设容量最小需求)。

4.2 仿真验证

4.2.1 储能优化配置结果

在方案3中采用本文所提指标,装设总容量为2.15 MW·h储能系统优化配置后的结果为:在18节点安装0.842 2 MW·h储能,33节点安装1.283 2 MW·h储能。

各方案对比结果如表1所示。

表1 方案对比结果

Tab.1 Table of comparison of results between different schemes

方案	频率偏差值/Hz	电压稳定性指标	储能装设成本/千万元
1	0.422 5	0.290 7	—
2	0.120 0	0.006 3	0.191 6
3	0.114 3	-0.006 2	0.170 0

从表1中数据可知,方案1未安装储能,其频率偏差值高达0.422 5 Hz,已超出0.2 Hz安全范围限制,系统在扰动下频率波动明显,极易造成系统频率全面崩溃^[22]。此外,该方案电压稳定性指标较高且为正数,线路电压稳定性相对较差,当系统遭受更大规模功率扰动时,极易引发薄弱线路崩溃。

方案2和方案3安装储能后,频率偏差值分别为0.120 0 Hz和0.114 3 Hz,均处于频率安全范围以内,相较于方案1,这两种方案的频率安全风险分别降低71.60%和72.95%。在电压稳定性方面,方案2和方案3的电压稳定性指标均为正值,相较于方案1的电压稳定性指标分别在数值降低97.83%和102.13%,且方案3的电压稳定性指标呈现负数,说明该方案能够提升系统应对更严重功率扰动时保持电压稳定的能力。

在储能装设成本方面,在方案3储能装设总容量略大于方案2的前提下,其储能装设成本相较于方案2降低了11.27%,即通过“低单价节点集中化、大容量配置规模化”优化配置策略,达到了降低储能装设成本的优化效果。

因此,依据考虑频率安全约束的储能装设总容量测定方法,以电压稳定性指标和储能装设成本为目标函数,制定储能优化配置策略可在抑制频率波动、维持电压稳定、经济效益提升多方面体现优越性。

4.2.2 配电网频率安全性提升效果

在未安装储能辅助平抑功率扰动的系统中,

通常在扰动发生时仅通过发电机组响应功率波动,但该过程的响应速率通常由系统接入的发电机组功率爬坡能力决定。为进一步验证本文所提方法对配电网频率安全性的提升效果,将从时间角度刻画方案1、方案2、方案3扰动发生后频率偏差值变化过程,如图4所示。

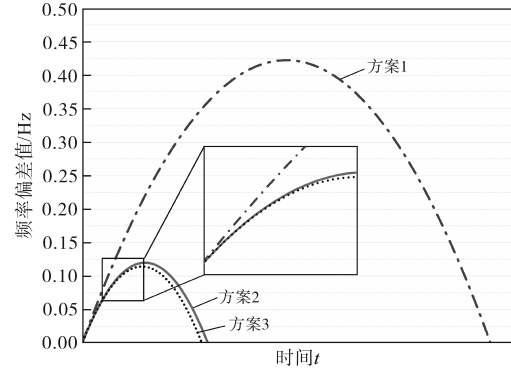


图4 频率偏差函数

Fig.4 Frequency deviation function

方案1中未接入储能,其应对功率扰动仅依靠发电机组功率爬坡响应^[23],发电机组功率响应能力通过线性简化后代入式(11)中 $P(t)$ 项表达式得到频率偏差函数。

方案2和方案3中分别接入总容量为2 MW·h和2.15 MW·h储能系统,系统应对功率扰动将同时依靠发电机组功率爬坡响应和储能功率爬坡响应,储能在扰动初期基于功率双向特性快速爬坡响应,补偿功率缺额平抑功率波动,避免频率过度跌落。在方案2和方案3中相较于方案1,增添储能响应功率波动,两种响应机制平抑作用叠加,代入式(11)中 $P(t)$ 项表达式后可得到储能系统作用下的频率偏差函数。

以上3种方案的频率偏差函数在计算过程中均取绝对值,频率偏差变化过程见图4。

通过对比频率偏差函数曲线可知,方案1在功率扰动发生初期,频率偏差迅速增大,且在较长时间内维持快速增长趋势,其曲线斜率即频率变化率也明显大于方案2和方案3对应曲线斜率。当方案1的频率偏差函数达到顶点时,频率偏差值为0.422 5 Hz,已超出频率安全范围,出现频率越限风险。方案2和方案3在发电机组和储能共同响应下,曲线顶点频率偏差值分别为0.120 0 Hz和0.114 3 Hz,均保持在0.2 Hz频率安全范围以内,且扰动发生初始时刻曲线斜率明显小于方案1曲线斜率,频率变化率减缓,说明相较于单一的发电机组功率爬坡响应能力,储能系统

的接入能够提供快速响应能力,与发电机组共同响应以平抑功率波动,抑制频率大幅变化,该响应特性叠加可降低频率越限导致的设备保护动作风险。此外,方案3的最高点频率偏差值相较于方案2降低了4.75%,表明当储能总容量满足频率安全约束条件时,能更加适配当前所装设系统,更好地发挥储能调节作用,维持系统频率安全。

4.2.3 配电网电压稳定性提升效果

由于方案1中未安装储能,将进一步在方案1中设定以下两种场景,对比功率扰动对未安装储能系统的电压稳定性影响。同时,将展示方案2和方案3面临相同功率扰动时,储能分别在放电、充电两种行为模式下,各线路电压稳定性指标变化情况,以反映本文所提储能优化配置方法在维持电压稳定方面的有效性。

场景1:无功功率扰动。

场景2:光伏输出功率发生1.5 MW波动。

3种方案的仿真结果如图5~图7所示。

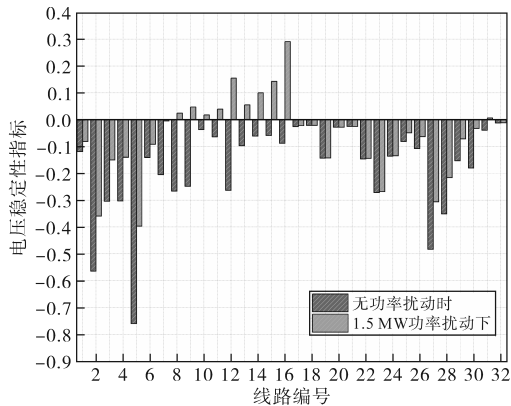


图5 方案1电压稳定性指标

Fig.5 Voltage stability index of scheme 1

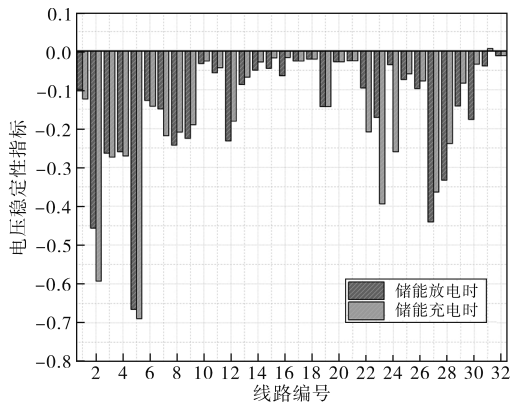


图6 方案2电压稳定性指标

Fig.6 Voltage stability index of scheme 2

观察方案1的电压稳定性指标图可知,8~16号线路、31号线路的电压稳定性指标均为正值,

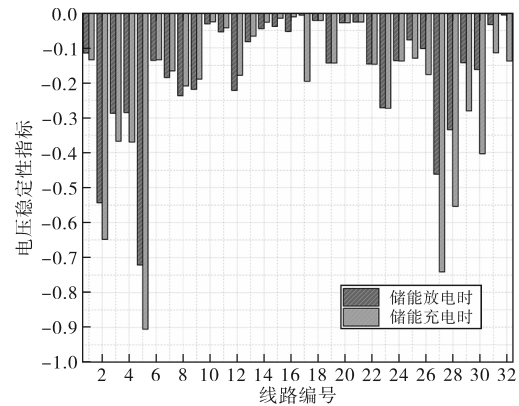


图7 方案3静态电压安全指标

Fig.7 Voltage stability index of scheme 3

其中16号线路电压稳定性指标最高,当17节点和32节点接入的光伏发电单元发生波动时,由于未配置储能调节抑制功率波动,该线路无法缓解功率变化引起的电压波动,将造成设备损坏,降低供电质量,不利于维持系统稳定运行。

方案2在安装储能后,各线路的电压稳定性指标有了明显改善,仅31号线路电压稳定性指标出现正值,其余线路指标均为负值,表明储能的接入改变了配电网的功率流动路径,通过优化潮流分布缓解线路过载与电压薄弱问题。同时,通过充放电调节行为,主动消纳并抑制突发功率波动,有效缓解了线路电压波动。

方案3的电压稳定性指标表现最优,相较于方案1场景2中薄弱线路正数电压稳定性指标,该方案相应线路指标均为负数,且全线路未出现正数指标,整体稳定性指标数值小于方案2,表明在以上3种方案中,采用方案3储能优化配置策略能够更有效平衡系统应对功率扰动,进一步降低电压越限的风险,为配电网安全稳定运行提供可靠保障。

5 结论

针对高比例新能源规模化接入下配电网频率-电压稳定性降低的问题,本文通过推导新能源扰动与频率变化关系式,综合考虑配电网频率-电压稳定性需求,建立配电网储能优化配置模型,并通过改进的IEEE 33节点系统算例验证了所提配置方法的有效性,得到如下结论:

1)与未配置储能相比,本文所提的面向频率-电压稳定性提升的储能优化配置模型能够实现频率偏差缩小了72.95%,电压稳定性提升了102.13%;

2)本文所提的考虑频率安全约束的储能系统装机总容量测算方法可在新能源扰动下实现储能最优配置容量计算。与未考虑频率安全约束相比,储能装设成本降低了11.27%。

参考文献

- [1] 刘德涛. 基于蚁群算法的多电源配电网储能功率合理控制方法[J]. 电气传动, 2023, 53(10): 64-70.
LIU Detao. Rational control method of energy storage power in multi-power distribution network based on ant colony algorithm [J]. Electric Drive, 2023, 53(10): 64-70.
- [2] 宋鹏飞, 汪马翔, 杨桂兴, 等. 混合储能系统的鲁棒配置与优化运行策略[J]. 电气传动, 2024, 54(10): 58-66.
SONG Pengfei, WANG Maxiang, YANG Guixing, et al. Robust configuration and optimized operation strategy of hybrid energy storage system[J]. Electric Drive, 2024, 54(10): 58-66.
- [3] 李红, 王浩, 董海鹰, 等. 考虑配电网脆弱性与经济性的储能优化配置[J]. 南方电网技术, 2025, 19(11): 132-140.
LI Hong, WANG Hao, DONG Haiying, et al. Optimal allocation of energy storage considering distribution network vulnerability and economics[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(11): 132-140.
- [4] 龚锐, 李华强, 许立雄. 面向配电网综合承载力提升的储能优化配置方法[J]. 电网技术, 2025, 49(9): 3860-3869.
GONG Rui, LI Huaqiang, XU Lixiong. Optimal allocation method of energy storage systems for improving the comprehensive carrying capacity of distribution network[J]. Power System Technology, 2025, 49(9): 3860-3869.
- [5] 彭钢, 寇启龙, 方涛, 等. 考虑新能源消纳率的主动配电网储能优化配置策略[J]. 浙江电力, 2025, 44(1): 84-94.
PENG Gang, KOU Qilong, FANG Tao, et al. An optimal strategy for energy storage allocation in active distribution networks considering new energy consumption rates[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(1): 84-94.
- [6] HSU Y W, CHEN C L, LIN C H. A comprehensive stability index for power systems considering voltage and frequency dynamics[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 2345-2354.
- [7] CARRION C E C, FARIA W R, MACEDO L H, et al. Dynamic service restoration of distribution networks with volt-var devices, distributed energy resources, and energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2024, 15(2): 903-919.
- [8] MENG H, JIA H, XU T, et al. Battery storage configuration of AC/DC hybrid distribution networks[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023, 9(3): 859-872.
- [9] 时雨, 孙勇, 王佳旭, 等. 考虑农网间歇性负荷的配电网移动储能车预配置方法及调度策略[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(12): 204-212.
SHI Yu, SUN Yong, WANG Jiaxu, et al. Pre-configuration method and scheduling strategy of mobile energy storage vehicles in distribution network considering intermittent load of rural network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(12): 204-212.
- [10] 马丽, 李伟, 裴玮, 等. 含高比例光伏配电网中计及需求侧响应的混合储能配置优化[J]. 高电压技术, 2024, 50(4): 1416-1425.
MA Li, LI Wei, PEI Wei, et al. Hybrid energy storage configuration optimization in distribution network with high-proportion PV considering demand response[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(4): 1416-1425.
- [11] 刘欣, 宁新福, 金翼, 等. 配电网分布式储能的分层优化配置方法[J]. 浙江电力, 2023, 42(5): 95-104.
LIU Xin, NING Xinfu, JIN Yi, et al. A hierarchical optimal configuration method for distributed energy storage in distribution networks[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(5): 95-104.
- [12] 葛磊蛟, 郑轶文, 李小平, 等. 高比例分布式光伏接入下配电网多类型储能优化配置技术综述[J]. 浙江电力, 2025, 44(5): 1-11.
GE Leijiao, ZHENG Yiwen, LI Xiaoping, et al. A review of optimal allocation technologies for multi-type energy storage in distribution networks with high penetration of DPV[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(5): 1-11.
- [13] JIA Q, JIAO W, CHEN S, et al. A trustworthy cloud-edge collaboration framework for scheduling distributed energy resources in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2025, 16(3): 2691-2694.
- [14] 李渊, 郑舒, 陈永华, 等. 计及系统可靠性约束的配电网储能优化配置[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(1): 193-202.
LI Yuan, ZHENG Shu, CHEN Yonghua, et al. Optimization configuration of distribution network energy storage considering system reliability constraints[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(1): 193-202.
- [15] HAN X, LI Z, GE J, et al. Coordinated planning of transmission network expansion and distribution network modernization with microgrids under non-uniform discrete choices[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2025, 16(2): 1405-1421.
- [16] 王启明, 夏坤, 焦平洋, 等. 基于目标级联分析算法的城乡配电网光储协同优化配置[J]. 浙江电力, 2025, 44(4): 93-102.
WANG Qiming, XIA Kun, JIAO Pingyang, et al. Collaborative optimization of photovoltaic and energy storage devices in urban and rural distribution networks based on the target cascade analysis method[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(4): 93-102.
- [17] 焦乾致, 梁浩, 韩昌建, 等. 基于改进粒子群算法的配电网双层储能容量优化[J]. 黑龙江电力, 2025, 47(2): 118-124, 130.
JIAO Qianzhi, LIANG Hao, HAN Changjian, et al. Optimization of double-layer energy storage capacity for grid-connected wind power based on improved particle swarm algorithm[J]. Heilongjiang Electric Power, 2025, 47(2): 118-124, 130.
- [18] 张晋铭, 欧阳森, 吴晗, 等. 计及配电网可靠性和运行经济性

的电网侧储能优化配置[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(7): 62-68, 85.

ZHANG Jinming, OUYANG Sen, WU Han, et al. Optimal configuration of grid-side energy storage considering reliability and operation economy of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(7): 62-68, 85.

[19] 赵晶晶, 樊濠诚, 王涵, 等. 考虑碳减排的配电网电-氢混合储能系统优化配置[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(11): 153-160.

ZHAO Jingjing, FAN Haocheng, WANG Han, et al. Optimal configuration of electricity-hydrogen hybrid energy storage system in distribution network considering carbon emission reduction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(11): 153-160.

[20] 张云晓. 计及供电可靠性与经济性的混合储能容量优化配置研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2024.

ZHANG Yunxiao. Research on the optimal configuration of hybrid energy storage capacity considering power supply reliability and economy[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2024.

[21] 闫大威, 张天宇, 李天翔, 等. 考虑静态电压稳定性的城市电网储能优化配置研究[J]. 浙江电力, 2024, 43(7): 76-85.

YAN Dawei, ZHANG Tianyu, LI Tianxiang, et al. Research on optimal allocation of energy storage in urban power grids considering static voltage stability[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(7): 76-85.

[22] 花赟玥, 杨超然, 何国庆, 等. 考虑小干扰稳定和频率稳定的虚拟惯量配置分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(5): 437-445.

HUA Yunyue, YANG Chaoran, HE Guoqing, et al. Virtual inertia configuration analysis considering small-signal stability and frequency stability[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(5): 437-445.

[23] 张景淳, 陈胜, 彭琰, 等. 计及灵活爬坡的气-电耦合综合能源系统低碳经济调度研究[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3315-3325.

ZHANG Jingchun, CHEN Sheng, PENG Yan, et al. Low carbon economic scheduling of gas-electric coupling integrated energy system considering flexible ramping products[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3315-3325.

收稿日期: 2025-05-16
修改稿日期: 2025-06-06

(上接第13页)

tion model for reserve of power system with renewable energy considering reliability constraints of dynamic partitioning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(23): 65-75.

[16] 葛维春, 张艳军, 高超, 等. 基于风电消纳能力态势划分的源荷储系统分阶段优化策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 26-33, 70.

GE Weichun, ZHANG Yanjun, GAO Chao, et al. Phased optimal strategy of source-load storage system based on state partition of accommodation capacity of wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 26-33, 70.

[17] 苏永新, 聂伟棋, 谭貌. 考虑风电接入和气电转换的综合能源系统日前区间优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 63-71.

SU Yongxin, NIE Weiqi, TAN Mao. Day-ahead interval optimization of integrated energy system considering wind power integration and gas-electricity transformation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 63-71.

[18] 孙浩锋. “源网荷储”协调的主动配电网运行优化分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2022.

SUN Haofeng. Operation optimization analysis of active distribution network based on “source-network-load-storage” coordination[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2022.

[19] 王成山, 于波, 肖峻, 等. 平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 1-8.

WANG Chengshan, YU Bo, XIAO Jun, et al. Sizing of energy storage systems for output smoothing of renewable energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 1-8.

[20] 汪赛. 储能辅助电力系统调峰的容量需求研究[D]. 南宁: 广西大学, 2018.

WANG Sai. Research on capacity demand of the energy storage in power system peak shaving[D]. Nanning: Guangxi University, 2018.

收稿日期: 2025-10-31
修改稿日期: 2025-12-08