

储能参与配电网削峰填谷对网络损耗及电压偏差的影响分析

李学斌^{1,✉}, 刘剑¹, 马麟¹, 韩云阳², 赵洁琼¹, 李富春³

(1. 中国能源建设集团天津电力设计院有限公司, 天津 300000; 2. 中国电力工程顾问集团有限公司, 北京 100120;
3. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要: [目的] 针对配电网接入储能进行削峰填谷的应用场景开展研究, 以明确储能接入对配电网网络损耗和电压质量的影响。[方法] 分析了高峰时段储能放电时, 网损功率随储能注入电流和接入位置的变化趋势, 然后分析了低谷时段, 储能系统接入并进行充电时, 网损功率随储能注入电流和接入位置的变化趋势。对于储能接入配电网进行削峰填谷对配电网电压的影响, 分别从高峰时段储能放电和低谷时段储能充电的角度, 研究了储能不同注入电流和接入位置对配电网沿线电压分布的影响。最后, 考虑配电网总电压偏差指标, 研究了配电网接入储能后对总电压偏差指标的影响。[结果] 通过仿真计算, 分析了储能电流和接入位置取不同固定或连续值时储能参与配电网削峰填谷对网损功率和电压损耗的影响趋势, 并与理论分析进行了对比分析。[结论] 研究将对各类储能设施在配电网中的协调规划和优化运行提供有益参考, 具有较好的工程参考价值。

关键词: 电池储能系统; 削峰填谷; 网络损耗; 电压偏差; 配电网

中图分类号: TM7; TP391

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)06-0051-13

开放科学(资源服务)二维码:



Impact Analysis of Energy Storage Participating in Peak Shaving and Valley Filling for Distribution Network on Network Loss and Voltage Deviation

LI Xuebin^{1,✉}, LIU Jian¹, MA Lin¹, HAN Yunyang², ZHAO Jieqiong¹, LI Fuchun³

(1. China Energy Engineering Group Tianjin Electric Power Design Institute Co., Ltd., Tianjin 300000, China;

2. China Power Engineering Consulting Group Co., Ltd. Beijing 100120, China;

3. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: [Introduction] The application scenarios of peak shaving and valley filling by energy storage connected to the distribution network are studied to clarify the influence of energy storage access on network losses and voltage quality on the distribution network side. [Method] The paper analyzed the change trend of network loss power with the energy storage injection current and access position during peak hours of energy storage discharge, and then analyzed the change trend of network loss power with the energy storage injection current and access position when the energy storage system was connected and charged during valley hours. For the influence of energy storage connected to the distribution network for peak shaving and valley filling on the voltage of the distribution network, the influence of different energy storage injection currents and access positions on the voltage distribution along the distribution network was studied from the perspective of energy storage discharge during peak hours and energy storage charging during valley hours. Finally, considering the total voltage deviation index of the distribution network, the influence on the total voltage deviation index after the distribution network which was connected to energy storage was studied. [Result] Through simulation calculations, the influence trend of energy storage participating in peak shaving and valley filling for the distribution network on network loss power and voltage loss is analyzed when different fixed or continuous values of energy storage current and access position are taken, and it is compared with theoretical analysis. [Conclusion] The study will provide useful references for the coordinated planning and optimized operation of various energy storage facilities in the distribution network, and it has good engineering reference value.

Key words: battery energy storage system; peak shaving and valley filling; network loss; voltage deviation; distribution network

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2022-07-15 修回日期: 2023-05-05

基金项目: 中国电力工程顾问集团有限公司科技项目“碳中和目标下省级储能规划技术研究”(DG2-X01-2022)

0 引言

随着我国经济快速发展和“双碳”目标的深入推进,多类型分布式发电、电动汽车充换电站、储能等资源大量接入配电网,使配电网从传统的供电方式逐渐向多主体参与、潮流双向流动的方向转变,且电力用户用电量增加,对供电质量的要求也越来越高^[1-3]。由于我国配电系统建设水平相比于发、输电系统落后,导致配电网网络损耗和电压质量问题较为突出^[4]。电池储能系统作为灵活可控资源,具有安装位置灵活、充放电效率高等优点,是提高配电网可再生能源消纳能力和优化供电能力的可行途径。然而,储能的大量接入必然对配电网网损和电压质量产生影响,明确影响程度和产生机理对于储能在配电网中的协调规划和优化运行至关重要。

配电网运行网络损耗和电压质量特征是在“双碳”背景下进行配电网可再生能源和灵活性资源配置的基础。文献[5]通过挖掘园区配网用户负荷大数据,对配电网峰谷特性和潜力进行了细致分析。文献[6]基于配电网同步相量测量终端构建了中压配电网网络损耗实时同步监测系统,提高了损耗测量精度,为配电网损耗管理和治理提供了有益借鉴。文献[7-8]借助配电网广域同步相量测量体系提出了电压质量监测和溯源定位方法,在示范工程中应用并验证了所提方案的可行性。国内外学者对各类间歇性可再生能源和灵活性资源对配电网的影响也开展了广泛的研究。文献[9-11]以分布式光伏为代表的间歇性可再生能源接入配电网为研究对象,探讨了配电网薄弱环节识别、分布式发电消纳能力以及优化运行控制策略等问题。文献[12-14]则侧重于以主被动需求响应、集群电动汽车为代表的负荷侧资源特性,从配电网扩展规划、控制策略和优化调度等方面进行了深入研究。也有研究综合考虑了分布式发电和负荷侧资源接入对配电网的影响,提出了有针对性的规划和运行方法^[15-17]。

上述研究工作主要涉及网络特性、分布式发电和灵活可控负荷对配电网规划和运行的影响,对于分布式储能接入配电网或用户侧电网场景,已有学者开展了初步研究。文献[18]提出了提升配电网电压质量的分布式储能配置方法,综合考虑了投资成本、电压偏差、购电费用等因素。文献[19]基于全生命周期成本进行了配电网储能配置研究,以全寿

命周期内总的净收益最大为目标建立了混合优化模型,并分析了相关经济性指标。文献[20]则分别对储能在用户侧、交直流配电网侧及参与碳/证交易等场景下的电池储能经济性测算、优化调度和协调控制等内容进行了分析和讨论。

文章针对配电网接入储能的应用场景,分析了高峰时段储能放电时,在一定馈线始端电流和单位长度电阻情况下网损功率随储能注入电流和接入位置的变化趋势,然后分析了低谷时段,储能系统接入并进行充电时,在一定馈线始端电流和单位长度电阻情况下网损功率随储能充电电流和接入位置的变化趋势,并综合储能放电和充电过程,分析了储能电流和接入位置对增加网损的影响。对于储能参与削峰填谷对配电网电压的影响,分别从高峰时段储能放电和低谷时段储能充电两个角度,理论分析了不同储能电流和接入位置与配电网沿线电压分布的关系,考虑配电网总电压偏差指标,研究了配电网接入储能后对总电压偏差指标的影响,对相关结果进行了必要说明。最后,通过仿真计算验证了文章的相关分析结论,以期为配电网储能规划工作提供一些参考。

1 储能削峰填谷对配电网网损影响分析

1.1 未接入储能系统

配电网的接线方式大多是辐射状链式接线,或采用环状接线,开环运行的状态。

以 1 条辐射状配电网馈线为研究对象,不考虑其与其他馈线间的联络关系,并进行适当简化后如图 1 所示。本文主要关注较长时间尺度的配电网馈线网损和电压偏差等稳态特征,因此,为便于分析,配电负荷采用侧重于综合负荷随接入电压呈一次关系的静态负荷模型,即恒电流模型,以体现负荷功率随电压的变化关系,且配电负荷沿线均匀分布,沿线电流连续变化。将一天分为高峰时段、低谷时段和平时时段,并假定高峰时段和低谷时段时间长度相同(均为 T),高峰时段馈线始端电流为 I_1 ,末端电流为 0,低谷时段馈线始端电流为 I_2 ,末端电流为 0。则高峰时段沿线电流分布为:

$$i_1(x) = I_1(1-x) \quad (1)$$

式中:

x ——距馈线始端的距离与馈线总长度之比,本

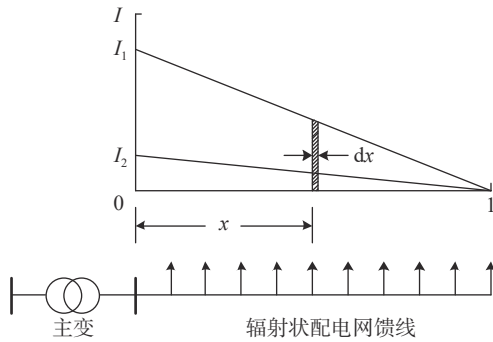


图1 负荷均匀分布的辐射状配电网馈线电流分布

Fig. 1 Feeder current distribution of a radial distribution network with even load distribution

文假定馈线总长度为1,则 $x \in (0, 1)$;

$i_1(x)$ ——高峰时段沿线电流分布。

若馈线单位长度电阻为 R ,则高峰时段在 x 处的小馈线段 Δx 内线损功率为 $i_1^2(x)R\Delta x$,可以得到高峰时段线损功率 P_1 为:

$$P_1 = 3 \int_0^1 i_1^2(x) R dx = I_1^2 R \quad (2)$$

由式(2)可知,高峰时段线损功率取决于馈线始端电流和馈线总电阻(当馈线总长度为1时,单位长度电阻 R 即为馈线总电阻),等效为馈线始端电流在馈线总电阻上产生的损耗。

同样地,低谷时段沿线电流分布 $i_2(x)$ 和线损功率 P_2 分别如式(3)、式(4)所示,式(4)中 R 仍代表馈线总长度为1时的馈线总电阻。

$$i_2(x) = I_2(1-x) \quad (3)$$

$$P_2 = 3 \int_0^1 i_2^2(x) R dx = I_2^2 R \quad (4)$$

1.2 接入储能系统

1.2.1 高峰时段储能放电

在距馈线始端 x_1 处接入储能系统(Battery Energy Storage System, BESS),储能系统也采用恒电流模型,分别在高峰时段、低谷时段以恒定电流进行削峰填谷。对于实际配网侧储能系统,在平时时段仍可能进行充电或放电,以缩短项目回收期或实现其他优化目标,本文仅考虑在高峰时段、低谷时段进行充放电的情况。配电网中常采用就地无功补偿,在线路中传输的无功较少,即可认为沿馈线负荷的功率因数较高,接入配电网的储能设备一般不参与AVC(自动电压控制, Automatic Voltage Control)调节,所配置的无功补偿装置通常用于补偿其自身的

无功损耗,因此,可令储能系统运行于单位功率因数输出状态,或其输出功率因数与负荷功率因数基本相同。若储能系统在高峰时段提供电流为 I_B ($I_B > 0$),则高峰时段储能系统接入后,馈线电流分布如图2及式(5)所示。

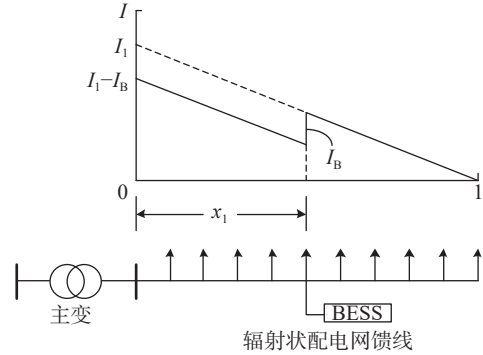


图2 储能系统接入后辐射状配电网馈线电流分布(放电)

Fig. 2 Feeder current distribution of a radial distribution network when battery energy storage system is connected (discharge)

$$\tilde{i}_1(x) = \begin{cases} I_1(1-x) - I_B & 0 < x \leq x_1 \\ I_1(1-x) & x_1 < x < 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中:

$\tilde{i}_1(x)$ ——高峰时段储能系统接入后沿线电流分布;

x_1 ——储能系统接入点距馈线始端的距离与馈线总长度之比。

从式(5)可以看到, $x \in (0, x_1)$ 时,令 $\tilde{i}_1(x)=0$,得到 $x_0 = (I_1 - I_B)/I_1$,当储能系统注入电流 I_B 不变时,若接入位置 $x_1 < x_0$,则配电网馈线潮流方向不发生变化,由于配电网电压损耗主要由电压纵分量决定,沿线有功和无功需求均会增加电压降落纵分量,因此沿馈线潮流方向电压逐渐降低,馈线末端电流、电压达到极小值;若接入位置 $x_1 > x_0$,则在 (x_0, x_1) 区间内配电网馈线潮流方向将发生改变,沿馈线潮流方向电压也将出现波动,电流、电压极小值可能位于馈线段内。高峰时段在馈线 x_1 处接入储能系统,且储能系统注入电流为 I_B 时的线损功率 \tilde{P}_1 为:

$$\tilde{P}_1 = 3R \left[I_1 I_B x_1^2 - I_B (2I_1 - I_B) x_1 + \frac{1}{3} I_1^2 \right] \quad (6)$$

若储能系统注入电流 I_B 不变,将线损功率 \tilde{P}_1 对 x_1 求导,令 $d\tilde{P}_1/dx_1 = 0$,得到:

$$x_1 = \frac{2I_1 - I_B}{2I_1} \quad (7)$$

因 $d^2\tilde{P}_1/dx_1^2 = 6RI_B > 0$,则储能系统接入位置 x_1

满足式(7)时,取得线损功率的极小值。此外,从式(7)中可知, I_B 越小, x_1 越接近馈线末端,馈线网损功率越小,随 I_B 逐渐增大,取得线损功率极小值时 x_1 将逐渐靠近馈线始端。

由式(6)可知,在高峰时段馈线始端电流 I_1 、馈线单位长度电阻 R 一定时,线损功率 \tilde{P}_1 与储能系统注入电流 I_B 、储能系统接入位置 x_1 均有关,且 \tilde{P}_1 随储能系统注入电流 I_B 、储能系统接入位置 x_1 的变化均不是单调,因此,在储能系统注入电流和储能系统接入位置的可取值范围内,可能存在极值点或最值点,使得网损功率最小。

进而,令

$$\begin{cases} \partial \tilde{P}_1 / \partial I_B = 3x_1^2 - 3x_1(2 - 2I_B) = 0 \\ \partial \tilde{P}_1 / \partial x_1 = 6I_B x_1 - 3I_B(2 - I_B) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

解得: $I_B = 2/3 \text{ pu}$ 、 $x_1 = 2/3$ 。

同时考虑到 $\partial^2 \tilde{P}_1 / \partial I_B^2 > 0$ 、 $\partial^2 \tilde{P}_1 / \partial x_1^2 > 0$,可知当 $I_B = 2/3 \text{ pu}$ 、 $x_1 = 2/3$ 时,网损功率 \tilde{P}_1 取得极小值,通过与边界点的比较可知,其为最小值, $\min(\tilde{P}_1)$ 为 0.11 pu 。由式(8)解出的另一极值点为 $I_B = 0$ 、 $x_1 = 0$,此时网损功率 \tilde{P}_1 为 1 pu ,不是全局最值点。可见,若 $I_1 = 1 \text{ pu}$ 、 $R = 1 \text{ pu}$,储能系统注入电流 $I_B = 2/3 \text{ pu}$,接入位置距馈线始端 $2/3$ 处时网损功率取得极小值。

应该指出,单位长度电阻 R 取不同值时不影响网损功率取得最小值时的储能注入电流和接入位置,仅网损功率与 R 成正比关系。但由式(6)和式(8)可知,馈线始端电流 I_1 的变化将影响网损功率取得最小值时的储能注入电流 I_B 和接入位置 x_1 ,且 I_1 与 I_B 、 x_1 均呈非线性关系,需根据不同的馈线始端电流 I_1 进行计算。

1.2.2 低谷时段储能充电

低谷时段,储能系统以电流 I_B ($I_B > 0$)进行充电,即储能注入电流为 $-I_B$,此时馈线电流分布如图3及式(9)所示。

$$\tilde{i}_2(x) = \begin{cases} I_2(1-x) + I_B & 0 < x < x_1 \\ I_2(1-x) & x_1 < x < 1 \end{cases} \quad (9)$$

从式(9)可以看到, $x \in (0, x_1)$ 时,令 $\tilde{i}_2(x) = 0$,得到 $x_0 = (I_2 + I_B) / I_2 > 1$,与 x 的取值范围矛盾,可知在此种情况下,沿馈线潮流方向不发生变化,电流单调减小,沿馈线潮流方向电压也逐渐降低,馈线末端电流、电压达到极小值。低谷时段在馈线 x_1 处接入储能系统,

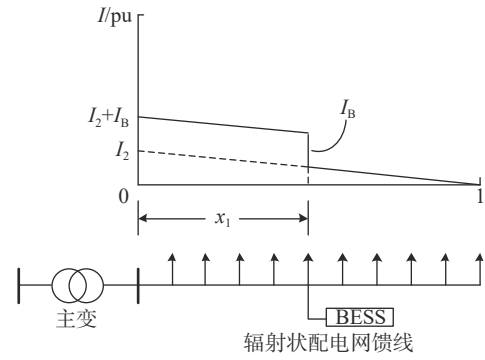


图3 储能系统接入后辐射状配电网馈线电流分布(充电)
Fig. 3 Feeder current distribution of a radial distribution network when battery energy storage system is connected (charge)

且储能系统注入电流为 $-I_B$ 时的线损功率 \tilde{P}_2 为:

$$\tilde{P}_2 = 3R \left[-I_2 I_B x_1^2 + I_B (2I_2 + I_B) x_1 + \frac{1}{3} I_2^2 \right] \quad (10)$$

若储能系统注入电流 $-I_B$ 不变,将线损功率 \tilde{P}_2 对 x_1 求导,令 $d\tilde{P}_2/dx_1 = 0$,得到:

$$x_1 = \frac{2I_2 + I_B}{2I_2} \quad (11)$$

因式(7)得到的 x_1 超出了其取值范围 $(0, 1)$,考虑到 $d^2 \tilde{P}_2 / dx_1^2 = 6RI_2 I_B < 0$,则储能系统接入并进行充电时,无论充电电流 I_B 取何值,线损功率均随接入位置单调增大,接于馈线末端时网损功率最大,即充电电流 I_B 越大、接入位置 x_1 越大(越靠近馈线末端),馈线网损功率越大。

当储能系统接入位置为 x_1 时,一天内的总网损(不考虑平时时段)为:

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_L = (\tilde{P}_1 + \tilde{P}_2)T = 3RT [I_B(I_1 - I_2)x_1^2 - \\ 2I_B(I_1 - I_2 - I_B)x_1 + \frac{1}{3}(I_1^2 + I_2^2)] \end{aligned} \quad (12)$$

若储能系统注入电流 I_B (充电时为 $-I_B$)不变,将总网损 \tilde{Q}_L 对 x_1 求导,令 $d\tilde{Q}_L/dx_1 = 0$,得到:

$$x_1 = 1 - \frac{I_B}{I_1 - I_2} \quad (13)$$

储能系统未接入时,一天内的总网损(不考虑平时时段)为:

$$Q_L = (P_1 + P_2)T = RT(I_1^2 + I_2^2) \quad (14)$$

则由于安装储能系统进行削峰填谷而增加的网损为:

$$\begin{aligned} \Delta Q = \tilde{Q}_L - Q_L = \\ 3RT [I_B(I_1 - I_2)x_1^2 - 2I_B(I_1 - I_2 - I_B)x_1] \end{aligned} \quad (15)$$

将增加的网损 ΔQ 对 x_1 求导,令 $\Delta Q' = 0$,解得接入位置与式(13)相同。若令 $\Delta Q = 0$,则解为0或 $2x_1$ 。考虑到 $d^2\Delta Q/dt^2 > 0$,可知对于式(13),当 $I_B > (I_1 - I_2)$ 时,无论储能系统接于馈线何处,均将导致网损增加,因此,从储能系统接入后降低网损的角度,储能系统充放电电流 I_B 的范围是:

$$I_B < (I_1 - I_2) \quad (16)$$

以满足式(16)为前提,若充放电电流 I_B 较小,则总网损取得最小值时储能接入位置 x_1 更靠近馈线末端,注入电流 I_B 越大,则总网损取得最小值时储能接入位置 x_1 越靠近馈线始端,且在 $(0, 2x_1)$ 内接入储能系统进行削峰填谷时,均有助于减小网损。此外,将式(13)与式(5)进行比较可知,当按式(13)确定储能系统接入位置时, x_1 必然小于由式(5)确定的临界接入位置 x_0 ,不会造成馈线潮流方向发生变化。

当储能系统注入电流 I_B 和接入位置 x_1 满足式(13)所示关系时,由式(15)计算的增加网损 ΔQ 在储能系统接入位置在 $(0, 2x_1)$ 区间内时将为负值,即减小了一天内的总网损。

进而,令

$$\begin{cases} \partial\Delta Q/\partial I_B = 2.4x_1^2 - 6x_1(0.8 - 2I_B) = 0 \\ \partial\Delta Q/\partial x_1 = 4.8I_Bx_1 - 6I_B(0.8 - I_B) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

解得 $I_B = 4/15$ pu、 $x_1 = 2/3$,同时考虑到 $\partial^2\tilde{P}_1/\partial I_B^2 > 0$ 、 $\partial^2\tilde{P}_1/\partial x_1^2 > 0$,可知当 $I_B = 4/15$ pu、 $x_1 = 2/3$ 时,增加的总网损 ΔQ 取得最小值, $\min(\Delta Q)$ 为 -0.2844 pu。由式(17)解出的另一极值点为 $I_B = 0$ 、 $x_1 = 0$,此时 ΔQ 为0,相当于未接入储能,不是全局最值点。可见,对于一定的高峰时段、低谷时段馈线始端电流,存在最优的储能注入电流 I_B 和接入位置 x_1 ,使得增加的网损最小(负值),即减小的网损最多。

同样,单位长度电阻 R 取不同值时不影响总网损取得最小值时的储能注入电流和接入位置,仅总网损与 R 成正比关系。但由式(17)可知,馈线始端电流 I_1 、 I_2 的变化将影响总网损取得最小值时的储能充放电电流 I_B 和接入位置 x_1 ,且与 I_B 、 x_1 均呈非线性关系,需根据不同的馈线始端电流 I_1 、 I_2 进行计算。

在实际配电网馈线中,馈线始端电流 I_1 、 I_2 随馈线负荷的变化而变动,当以削峰填谷为控制目标时,不可能在任何时刻都实现网损功率最小,此时,需在一定的负荷预测曲线下,通过不同季节典型日曲线或较长时间尺度生产模拟优化的方法求得储能系统

最佳接入电流和接入位置,同时考虑储能的经济性,即全寿命周期成本和相关收益。

2 储能削峰填谷对配电网电压偏差影响分析

2.1 未接入储能系统

本节仍针对不考虑与其他馈线联络关系的单条辐射状配电网馈线进行研究,如图1所示。配电负荷仍采用恒电流模型,且沿线均匀分布,同时,将一天分为高峰时段、低谷时段和平时时段,并假定高峰时段和低谷时段时间长度相同(均为 T),高峰时段馈线始端电流为 I_1 ,末端电流为0,低谷时段馈线始端电流为 I_2 ,末端电流为0。

本节分析中,仍假定 x 为距馈线始端的距离与馈线总长度之比,馈线总长度为1,则 $x \in (0, 1)$ 。正常运行时,配电网馈线两端相角差较小,电压降落的横分量对电压损耗的贡献也较小,故认为电压降落的模即为电压损耗。若单位长度馈线的阻抗的模为 Z ,则在高峰时段,距馈线始端 x 处的小馈线段 Δx 内的电压损耗为 $I_1(1-x)Z\Delta x$ 。因此,未接入储能系统时,高峰时段距馈线始端 x 处对于送端母线的电压损耗 $\Delta U_1(x)$ 为:

$$\Delta U_1(x) = \int_0^x I_1(1-y)Zdy = I_1Z\left(x - \frac{1}{2}x^2\right) \quad (18)$$

低谷时段距馈线始端 x 处对于送端母线的电压损耗 $\Delta U_2(x)$ 为:

$$\Delta U_2(x) = I_2Z\left(x - \frac{1}{2}x^2\right) \quad (19)$$

2.2 接入储能系统

2.2.1 高峰时段储能放电

在距馈线始端 x_1 处接入储能系统,储能系统也采用恒电流模型,分别在高峰时段、低谷时段以恒定电流进行削峰填谷。储能系统在高峰时段注入电流为 I_B ,馈线电流分布如式(5)所示,则高峰时段接入储能后,距馈线始端 x 处的电压损耗 $\Delta\tilde{U}_1(x)$ 为:

$$\Delta\tilde{U}_1(x) = \begin{cases} Z\left[-I_Bx + I_1\left(x - \frac{1}{2}x^2\right)\right], 0 < x \leq x_1 \\ Z\left[-I_Bx_1 + I_1\left(x - \frac{1}{2}x^2\right)\right], x_1 < x < 1 \end{cases} \quad (20)$$

若储能系统注入电流 I_B 不变, $x \in (0, x_1)$ 时,将电压损耗 $\Delta\tilde{U}_1(x)$ 对 x 求导,令 $d\Delta\tilde{U}_1(x)/dx = 0$,得到:

$$x_c = 1 - \frac{I_B}{I_1} \quad (21)$$

考虑到 $d\Delta\tilde{U}_1^2(x)/dx^2 < 0$, 可知在 $x = x_c$ 处, 电压损耗达到极大值(不一定是馈线范围内的最大值)。需要说明的是, 虽然式(21)中, 电压损耗极大值点位置 x_c 仅与储能注入电流 I_B 、馈线始端电流 I_1 有关, 但储能接入位置 x_1 将影响馈线范围是否会出现电压损耗极值点。若储能系统接入位置 $x_1 < x_c$, 即由式(21)确定的 x_c 不在 $(0, x_1)$ 范围内, 则电压损耗无极大值点, 沿馈线电压损耗单调增大。若 $x_1 > x_c$, 则电压损耗存在极大值点, 极大值点位置至储能接入位置为电压损耗恢复段, 且当储能接入位置 $x_1 = 2(I_1 - I_B)/I_1 = 2x_c$ 时, 电压损耗恢复至 0, 但储能接入位置不能大于馈线全长, 因此, 若由式(21)确定的 x_c 的 2 倍大于馈线全长时, 电压损耗将不会恢复至 0。

$x \in (x_1, 1)$ 时, 将电压损耗 $\Delta\tilde{U}_1(x)$ 对 x 求导, 令 $d\Delta\tilde{U}_1(x)/dx = 0$, 得到 $x = 1$, 且为极大值, 即从储能接入位置至馈线末端电压损耗单调增大, 馈线末端 $x = 1$ 处取得极大值, 但不一定是馈线范围内的最大值, 电压损耗最大值和最大值位置取决于储能接入位置和注入电流的大小。

2.2.2 低谷时段储能充电

储能系统在低谷时段充电电流为 I_B , 则储能注入电流为 $-I_B$, 馈线电流分布如式(9)所示, 则低谷时段接入储能后, 距馈线始端 x 处的电压损耗 $\Delta\tilde{U}_2(x)$ 为:

$$\Delta\tilde{U}_2(x) = \begin{cases} Z \left[I_B x + I_2 \left(x - \frac{1}{2} x^2 \right) \right], 0 < x \leq x_1 \\ Z \left[I_B x_1 + I_2 \left(x - \frac{1}{2} x^2 \right) \right], x_1 < x < 1 \end{cases} \quad (22)$$

若储能系统注入电流 $-I_B$ 不变, $x \in (0, x_1)$ 时, 将电压损耗 $\Delta\tilde{U}_2(x)$ 对 x 求导, 令 $d\Delta\tilde{U}_2(x)/dx = 0$, 得到 $x_c = (I_2 + I_B)/I_2$, 即电压损耗 $\Delta\tilde{U}_2(x)$ 在 $x = x_c$ 处取得极大值, 但此时 $x_c > 1$, 超出馈线范围, 可知在 $(0, x_1)$ 沿馈线电压损耗单调增大。

$x \in (x_1, 1)$ 时, 将电压损耗 $\Delta\tilde{U}_2(x)$ 对 x 求导, 令 $d\Delta\tilde{U}_2(x)/dx = 0$, 得到 $x = 1$, 且为极大值, 即从馈线接入位置至馈线末端电压损耗单调增大, 馈线末端 $x = 1$ 处取得极大值, 也是馈线范围内的最大值。

根据文献 [1], 采用馈线整体电压偏差 D 衡量馈线电压损耗程度。对于如图 1 所示的负荷均匀分布配电网馈线, 高峰时段储能放电时, 整体电压偏差为

$$\tilde{D}_1 = \frac{\int_0^1 \Delta\tilde{U}_1(x) dx}{U_N} = \frac{Z \left[\left(-I_B x_1 + \frac{1}{3} I_1 \right) + \frac{1}{2} I_B x_1^2 \right]}{U_N} \quad (23)$$

式中:

U_N ——馈线电压标称值。

将 \tilde{D}_1 对 x_1 求导, 令 $d\tilde{D}_1/dx_1 = 0$, 得到 $x_1 = 1$, 因此, 储能放电时, 总是布置在馈线末端才可使整体电压偏差取得极小值, 同时也是最小值。

低谷时段储能充电时, 整体电压偏差为:

$$\tilde{D}_2 = \frac{\int_0^1 \Delta\tilde{U}_2(x) dx}{U_N} = \frac{Z \left[\left(I_B x_1 + \frac{1}{3} I_2 \right) - \frac{1}{2} I_B x_1^2 \right]}{U_N} \quad (24)$$

将 \tilde{D}_2 对 x_1 求导, 令 $d\tilde{D}_2/dx_1 = 0$, 得到 $x_1 = 1$, 因此, 储能充电时, 总是布置在馈线末端才使整体电压偏差取得极大值, 同时也是最大值。

忽略平时时段, 则总体电压偏差 \tilde{D} 为:

$$\tilde{D} = \tilde{D}_1 + \tilde{D}_2 = \frac{Z(I_1 + I_2)}{3U_N} \quad (25)$$

可见, 在本文所述的参与配电网削峰填谷场景下, 储能系统的接入位置、充放电电流并不影响总体电压偏差值 \tilde{D} , 总体电压偏差主要由配电网馈线参数以及高峰时段、低谷时段馈线始端电流决定。而未接入储能时, 高峰时段、低谷时段总体电压偏差 D 为:

$$D = D_1 + D_2 = \frac{Z(I_1 + I_2)}{3U_N} \quad (26)$$

因此, 可知 $\tilde{D} = D$, 说明无论储能布置于何处, 对总体电压损耗指标均无改善, 而只能在一定程度上减小最大电压损耗, 从而平滑电压损耗, 即使得在高峰时段整体电压偏差适当减小, 在低谷时段增大整体电压偏差适当增大。

3 仿真分析

3.1 储能接入对网损影响的仿真分析

由式(6)可知, 高峰时段储能放电时, 线损功率 \tilde{P}_1 由储能提供电流 I_B 、储能接入位置 x_1 两个主要变量决定, 为便于明确线损功率 \tilde{P}_1 与上述两个主要变量间的关系, 令式(6)中 $I_1 = 1$ pu、 $R = 1$ pu, 并考虑式(7), 则 $I_B \in (0, 2$ pu), $x_1 \in (0, 1)$, 利用 Matlab 软件进行仿真分析, 得到高峰时段储能放电时线损功率 \tilde{P}_1 随 I_B 、 x_1 变化曲面图, 如图 4 所示, 颜色越深对应的 \tilde{P}_1 越小。

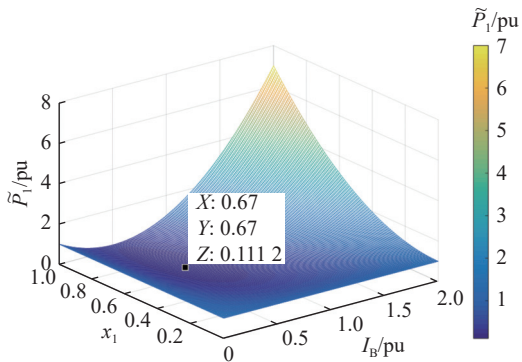


图 4 线损功率随储能注入电流、接入位置变化曲面图
Fig. 4 Surface plot of line loss power varying with the energy storage injection current and access position

由图 4 可知, 线损功率 \tilde{P}_1 存在极小值, 也是全局最小值, 最小值点为 $I_B = 2/3$ pu、 $x_1 = 2/3$, 最小网损约为 0.11 pu。

为了更加直观地观察高峰时段储能放电时储能提供电流 I_B 和储能接入位置 x_1 分别对线损功率 \tilde{P}_1 影响, 将接入位置取 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1 等固定值, 将图 4 所示曲面图中截出的各曲线投影到 \tilde{P}_1 - I_B 坐标平面, 则对于各接入位置, 线损功率 \tilde{P}_1 随储能注入电流 I_B 的变化曲线如图 5 所示, 将储能注入电流取 0、0.5 pu、1 pu、1.5 pu、2 pu 等固定值, 将图 4 所示曲面图中截出的各曲线投影到 \tilde{P}_1 - x_1 坐标平面, 线损功率 \tilde{P}_1 随储能接入位置 x_1 的变化曲线如图 6 所示。

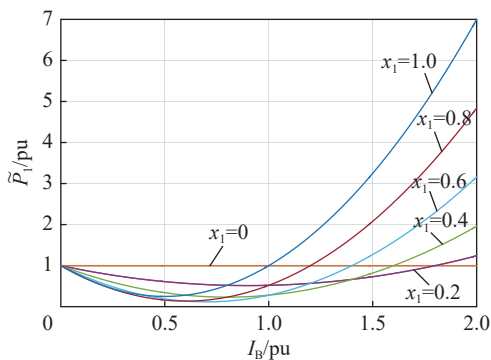


图 5 接入位置一定时线损功率随储能注入电流变化曲线
Fig. 5 Curves of line loss power varying with the energy storage injection current when the access position is fixed

由图 5 可知, 高峰时段储能放电时, 当储能接入馈线始端 $x_1 = 0$ 处时, 储能注入电流对线损功率无影响, 储能接入位置取 0.2、0.4、0.6、0.8、1 等值时, 线损功率随储能注入电流变化的趋势基本一致, 接入

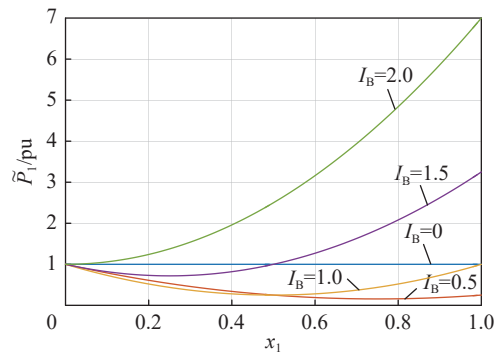


图 6 储能注入电流一定时线损功率随接入位置变化曲线
Fig. 6 Curves of line loss power varying with the access position when the energy storage injection current is fixed

位置越靠近馈线末端, 取得线损功率极小值时的储能接入电流越小, 能够使得线损功率取得最小值的接入位置在 0.6~0.8 之间, 此外, 接入位置越靠近馈线末端, 线损功率随储能注入电流增加而增大的速度越快。

由图 6 可知, 高峰时段储能放电时, 若储能注入电流为 0, 则不影响线损功率, 若储能注入电流较大, 如 $I_B = 2$ 时, 将使得按式 (7) 计算的线损功率取极小值时的接入位置为 0, 即随接入位置靠近馈线末端, 线损功率单调增大, 储能注入电流取 0.5 pu、1 pu、1.5 pu 等值时的线损功率变化趋势基本一致, 且取消线损功率极小值时的接入位置符合式 (7) 的计算结果, 此外, 当储能注入电流较小, 如 $I_B = 0.5$ pu、1 pu 时, 无论在哪个位置接入储能, 均可减小线损功率。结合图 5 和图 6, 可粗略估计线损功率取得最小值时储能的注入电流和接入位置, 与图 4 所示的全局最小值点基本相同。

低谷时段储能充电时, 线损功率 \tilde{P}_2 由储能充电电流 I_B 、储能接入位置 x_1 两个主要变量决定, 令式 (10) 中 $I_2 = 0.2$ pu、 $R = 1$ pu, 并考虑式 (11), 则 $I_B \in (0, 2)$ pu, $x_1 \in (0, 1)$, 仿真得到线损功率 \tilde{P}_2 随 I_B 、 x_1 变化曲面图, 如图 7 所示, 颜色越深代表对应的 \tilde{P}_2 越小。

采用前文所述固定某一变量的方式绘制图 8 和图 9, 分析可知, 低谷时段储能充电时, 接入位置取 0, 即接入馈线始端情况下的线损功率取得最小值, 且不随储能充电电流变化, 接入位置取 0.2、0.4、0.6、0.8、1 等情况下的线损功率随储能充电电流的增加而单调增大, 接入位置越靠近馈线末端, 线损功率越

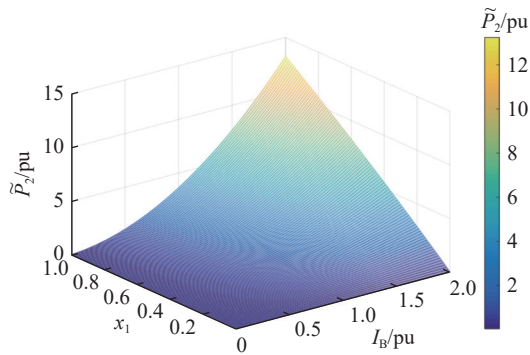


图 7 线损功率随储能充电电流、接入位置变化曲面图
Fig. 7 Surface plot of line loss power varying with the energy storage charging current and access position

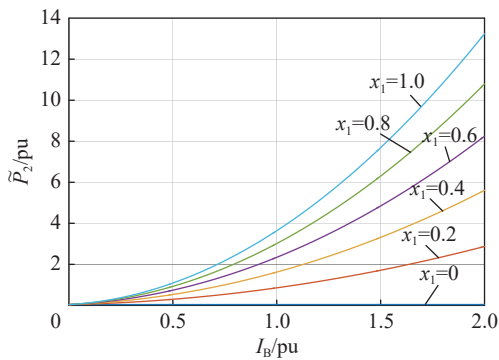


图 8 接入位置一定时线损功率随储能充电电流变化曲线
Fig. 8 Curves of line loss power varying with the energy storage charging current when the access position is fixed

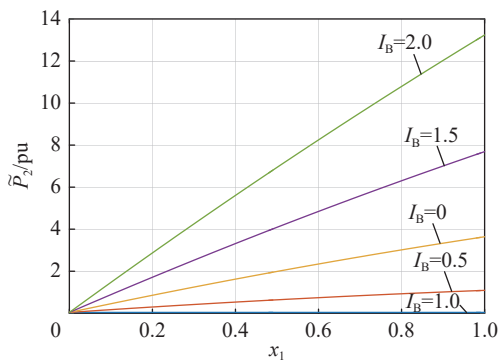


图 9 储能充电电流一定时线损功率随接入位置变化曲线
Fig. 9 Curves of line loss power varying with the access position when the energy storage charging current is fixed

大。同样，储能充电电流取 0，即储能对沿线电流无影响情况下的线损功率取得最小值，且不随储能接入位置变化，储能充电电流取 0.5 pu、1 pu、1.5 pu、2 pu 等情况下的线损功率随储能接入位置靠近馈线末端程度的增加而单调增大，储能充电电流越大，线

损功率越大。在图 7 中，线损功率的最小值出现在储能接入馈线始端 (\$x_1=0\$) 和储能无充电电流 (\$I_B=0\$)，即图 7 中 \$\tilde{P}_2-x_1\$ 坐标平面中的 \$\tilde{P}_2=0.04\$ pu 曲线和 \$\tilde{P}_2-I_B\$ 坐标平面中的 \$\tilde{P}_2=0.04\$ pu 曲线。

综合考虑高峰时段储能放电和低谷时段储能充电两种情况，在式(15)中，安装储能系统进行削峰填谷后增加的网损 \$\Delta Q\$ 与储能系统注入电流 \$I_B\$ (充电时为 \$-I_B\$)、储能系统接入位置 \$x_1\$ 均有关，为便于明确 \$\Delta Q\$ 与 \$I_B\$、\$x_1\$ 的关系，令式(15)中 \$I_1=1\$ pu、\$I_2=0.2\$ pu、\$R=1\$ pu、\$T=1\$ pu，考虑式(13)和式(16)，则 \$I_B \in (0, 1\$ pu)，\$x_1 \in (0, 1)\$，线损功率增加的网损 \$\Delta Q\$ 随 \$I_B\$、\$x_1\$ 变化的曲面图如图 10 所示，颜色越深对应的 \$\Delta Q\$ 越小。

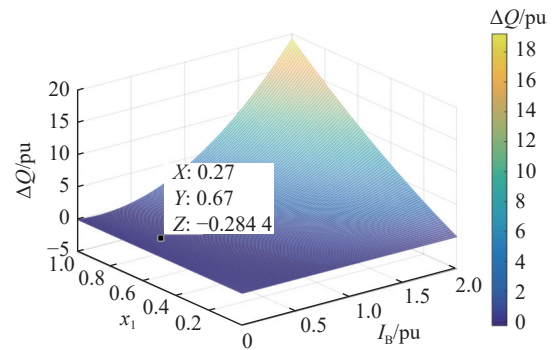


图 10 增加总网损随储能注入电流、接入位置变化曲面图
Fig. 10 Surface plot of increased total network loss varying with the energy storage injection current and access position

由图 10 可知，\$\Delta Q\$ 存在极小值，也是全局最小值，且最小值小于 0，最小值点为 \$I_B=4/15\$ pu、\$x_1=2/3\$，增加的网损最小值约为 \$-0.2844\$ pu。

采用前文所述固定某一变量的方式绘制图 11 和图 12，分析可知，当储能接入馈线始端 \$x_1=0\$ 处时，储能电流对增加的网损无影响，储能接入位置取 0.2、0.4、0.6、0.8、1 等值时，增加的网损随储能注入电流变化的趋势基本一致，随储能电流增大，增加的网损先减小后增大，且最小值较接近 0 值，此外，接入位置越靠近馈线末端，增加的网损随储能注入电流增加而增大的速度越快。若储能电流为 0，即未参与削峰填谷，则不影响增加的网损，若储能电流较小，如 \$I_B=0.5\$ pu 时，增加的网损先减小后增大，且最小值较接近 0 值，储能电流取 1 pu、1.5 pu、2 pu 等值时，增加的网损随储能接入位置靠近馈线末端的程度增加而单调增大，此外，储能电流越大，增加的网损随接

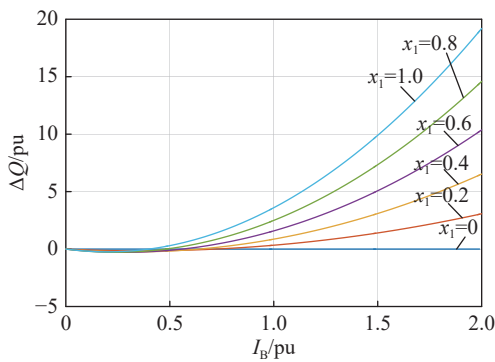


图 11 接入位置一定时增加总网损随储能电流变化曲线
Fig. 11 Curves of increased total network loss varying with the energy storage current when the access position is fixed

入位置靠近馈线末端的程度增加而增大的速度越快。结合图 11 和图 12, 可粗略估计增加的网损取得最小值时的储能电流和接入位置, 与图 10 所示的全局最小值点基本相同。

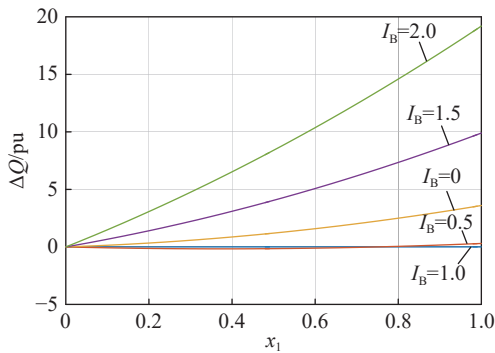


图 12 储能电流一定时增加总网损随接入位置变化曲线
Fig. 12 Curves of increased total network loss varying with the access position when the energy storage current is fixed

当增加的网损为负值时, 可降低馈线损耗, 但从图 10~图 12 可以看到, 能实现该目标的储能电流和接入位置的选择区间较小, 仅在一个较小的范围内才可实现降低馈线损耗, 且能达到的馈线损耗降低量较小, 图 10 中的馈线损耗降低量约为 0.284 4 pu, 而在储能电流和接入位置的较大选择区间内会增加馈线损耗, 且如果储能电流和接入位置选择不当, 将导致馈线损耗的显著增大。因此, 若通过储能参与配电网削峰填谷来降低馈线网损, 则需通过本文方法及原则优选储能电流和接入位置, 并结合实际负荷情况进行综合分析。

3.2 储能接入对电压影响的仿真分析

式(20)给出了高峰时段储能放电时, 储能在距

馈线始端 x_1 处接入后, 电压损耗 $\Delta\tilde{U}_1$ 与储能提供电流 I_B 和距馈线始端距离 x 之间的关系, 即沿线电压损耗与储能接入位置、储能注入电流和距馈线始端距离三个因素相关。若未接入储能, 则高峰时段储能放电时的沿线电压损耗由式(18)决定, 令式(18)、式(20)中 $I_1=1$ pu、 $Z=1$ pu, 并考虑式(7), 则 $I_B \in (0, 2)$, $x_1 \in (0, 1)$, 利用 Matlab 软件进行仿真分析, 得到高峰时段储能放电时未接入储能情况下沿线电压损耗 $\Delta\tilde{U}_1$ 随 I_B 变化曲线, 如图 13 所示, 以及考虑储能接入且接入位置取不同值 ($x_1=0.2、0.5、1$) 时, 颜色越深对应的 $\Delta\tilde{U}_1$ 越小沿线电压损耗 $\Delta\tilde{U}_1$ 随 $I_B、x$ 变化曲面图, 如图 14~图 16 所示, 颜色越深代表对应的 $\Delta\tilde{U}_1$ 越低。

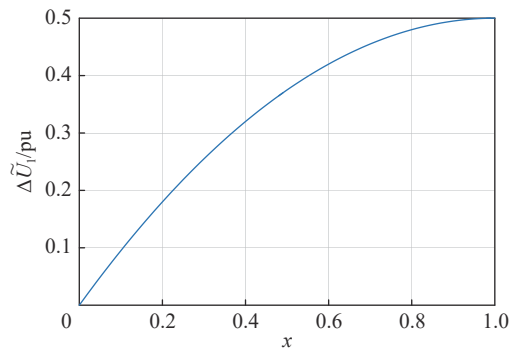


图 13 未接入储能时高峰时段沿线电压损耗变化曲线
Fig. 13 Curve of voltage loss change along the line during peak hours when the energy storage is not connected

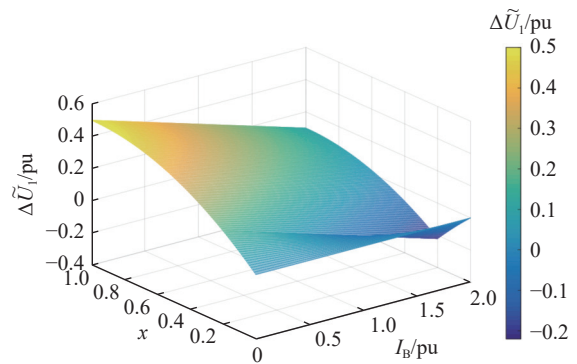


图 14 沿线电压损耗随储能注入电流变化曲面图 ($x_1=0.2$)
Fig. 14 Surface plot of voltage loss along the line varying with the energy storage injection current ($x_1=0.2$)

分析图 13~图 16 可知, 高峰时段未接入储能时, 沿线电压损耗随距馈线始端距离单调增大, 但增大速度逐渐减小, 图 13 中的曲线即为图 14~图 16 中储能注入电流为 0 时的 $\Delta\tilde{U}_1-x$ 坐标平面上的曲线, 由于

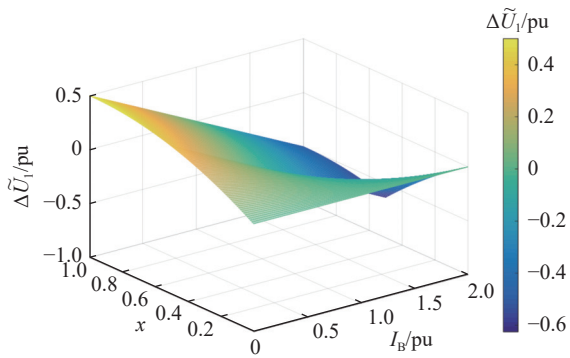


图 15 沿线电压损耗随储能注入电流变化曲面图($x_1=0.5$)
Fig. 15 Surface plot of voltage loss along the line varying with the energy storage injection current ($x_1=0.5$)

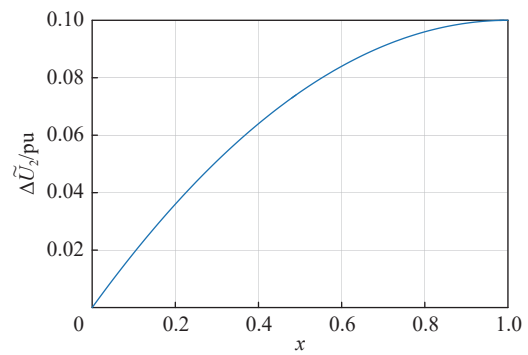


图 17 未接入储能时低谷时段沿线电压损耗变化曲线
Fig. 17 Curve of voltage loss along the line during valley hours when the energy storage is not connected

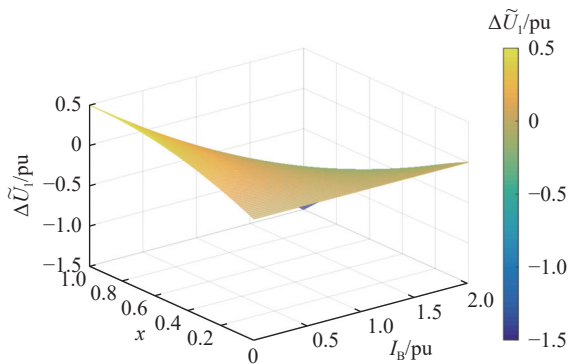


图 16 沿线电压损耗随储能注入电流变化曲面图($x_1=1$)
Fig. 16 Surface plot of voltage loss along the line varying with the energy storage injection current ($x_1=1$)

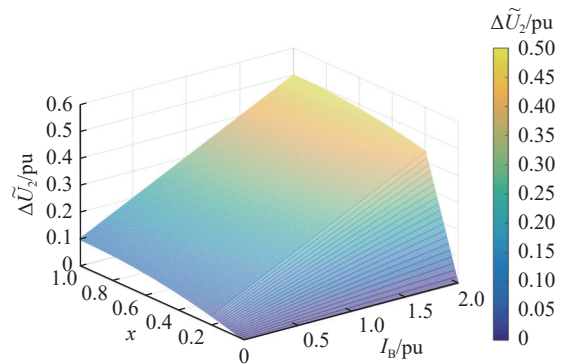


图 18 沿线电压损耗随储能充电电流变化曲面图($x_1=0.2$)
Fig. 18 Surface plot of voltage loss along the line varying with the energy storage charging current ($x_1=0.2$)

坐标轴标注值和标注方向不同而略显不同。图 14~图 15 的折线位置对应储能接入位置,说明在储能接入位置处,沿线电压损耗的变化率发生了突变,在储能注入电流的某段取值范围内,在 $(0, x_1)$ 位置区间内存在电压损耗的极大值,与第 2.2.1 节中的分析相一致,图 16 中由于储能接入位置为馈线末端,故没有出现对应的折线。

式(22)给出了低谷时段储能充电时,储能在距馈线始端 x_1 处接入后,电压损耗 ΔU_2 与储能提供电流 I_B 和距馈线始端距离 x 之间的关系。若未接入储能,则低谷时段储能充电时的沿线电压损耗由式(19)决定,令式(19)、式(22)中 $I_2=0.2$ pu、 $Z=1$ pu,并考虑式(11),则 $I_B \in (0, 0.2$ pu), $x_1 \in (0, 1)$,仍考虑储能接入且接入位置取不同值($x_1 = 0.2, 0.5, 1$),相应的仿真结果如图 17~图 20 所示,图 18~图 20 中,颜色越深对应的 ΔU_2 越小。

分析图 17~图 20 可知,低谷时段未接入储能时,

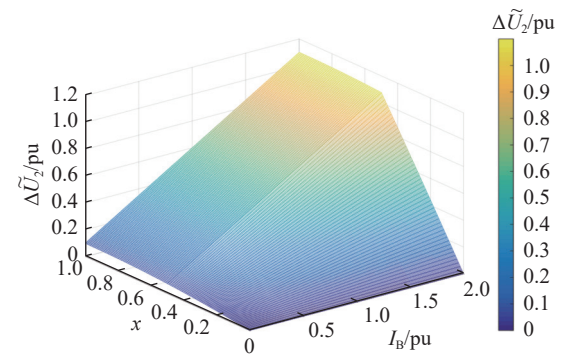


图 19 沿线电压损耗随储能充电电流变化曲面图($x_1=0.5$)
Fig. 19 Surface plot of voltage loss along the line varying with the energy storage charging current ($x_1=0.5$)

沿线电压损耗随距馈线始端距离同样单调增大,且增大速度逐渐减小,图 17 中的曲线即为图 18~图 20 中储能充电电流为 0 时的 ΔU_2 - x 坐标平面上的曲线。图 18~图 20 的折线位置对应储能接入位置,说明在储能接入位置处,沿线电压损耗的变化率发生了突

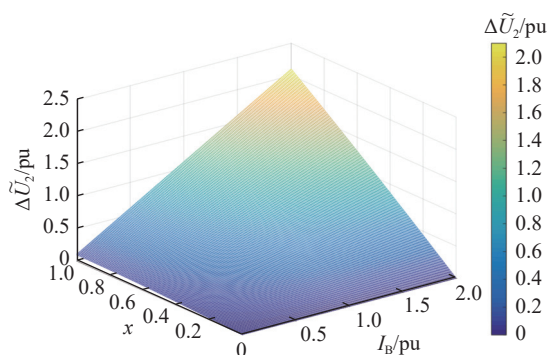


图20 沿线电压损耗随储能充电电流变化曲面图($x_1=1$)

Fig. 20 Surface plot of voltage loss along the line varying with the energy storage charging current ($x_1=1$)

变,但折线的趋势方向与图14~图16不同。无论储能充电电流为何值,在整个馈线段内沿线电压损耗随距馈线始端距离单调增大,馈线末端电压损耗最大,与第2.2.2节中的分析相一致,同样,图20中由于储能接入位置为馈线末端,故没有出现对应的折线。

综合考虑高峰时段储能放电和低谷时段储能充电对馈线整体电压偏差的影响,可知在适当的接入位置,储能放电总体上降低了馈线电压偏差,而储能充电总体上提高了馈线电压偏差,使得从馈线整体的角度对总体电压偏差没有影响,只能在一定程度上平滑电压偏差。

4 结论

1)高峰时段储能放电时,单位长度电阻取不同值时不影响网损功率取得最小值时的储能注入电流和接入位置,仅网损功率与单位长度电阻成正比关系。馈线始端电流的变化将影响网损功率取得最小值时的储能注入电流和接入位置,且始端电流与储能注入电流、接入位置均呈非线性关系,需根据不同的馈线始端电流进行计算。

2)低谷时段,储能系统接入并进行充电时,无论充电电流取何值,线损功率均单调增大,接于馈线末端时网损功率最大,即充电电流越大、接入位置越靠近馈线末端,馈线网损功率越大。

3)单位长度电阻取不同值时不影响增加总网损取得最小值时的储能注入电流和接入位置。馈线始端电流的变化将影响增加总网损取得最小值时的储能注入电流和接入位置,且与它们均呈非线性关系,

需根据不同的馈线始端电流进行计算。

4)高峰时段储能放电时,从储能接入位置至馈线末端电压损耗单调增大,馈线末端处取得极大值(不一定是馈线范围内的最大值)。

5)低谷时段储能充电时,从储能接入位置至馈线末端电压损耗单调增大,馈线末端处取得极大值,也是馈线范围内的最大值。

6)综合考虑储能充电和放电情况,无论储能布置于何处,对总体电压偏差指标均无改善,而只能在一定程度上平滑电压偏差。

参考文献:

- [1] 黄盛,解文艳,黄楚鸿,等.电力物联网在电网的应用方案研究[J].南方能源建设,2021,8(增刊1):20-25. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.S1.003.
HUANG S, XIE W Y, HUANG C H, et al. Research on application scheme of power internet of things in power grid [J]. Southern energy construction, 2021, 8(Suppl. 1): 20-25. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.S1.003.
- [2] 陆子凯,简翔浩,张明瀚.多端柔性直流配电网的可靠性和经济性评估[J].南方能源建设,2020,7(4):67-74. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.010.
LU Z K, JIAN X H, ZHANG M H. Reliability and economy assessment of multi-terminal flexible DC distribution network [J]. Southern energy construction, 2020, 7(4): 67-74. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.010.
- [3] 郭凯,阿敏夫,雅斯太,等.计及碳交易-绿证和储能成本的含风光发电的电力系统优化调度[J].内蒙古电力技术,2023,41(4):1-7. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2023.0047.
GUO K, Aminfu, Yasitai, et al. Optimized dispatching of power system including wind and solar power generation considering carbon trading-green certificate and energy storage cost [J]. Inner Mongolia electric power, 2023, 41(4): 1-7. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2023.0047.
- [4] 刘科研,贾东梨,王薇嘉,等.考虑分布式光伏电源接入模式的低压配电网不平衡线损计算方法[J].电力建设,2021,42(10):129-138. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2021.10.014.
LIU K Y, JIA D L, WANG W J, et al. Calculation method of unbalanced line loss in low-voltage distribution network considering the access mode of distributed photovoltaic generation [J]. Electric power construction, 2021, 42(10): 129-

138. DOI: [10.12204/j.issn.1000-7229.2021.10.014](https://doi.org/10.12204/j.issn.1000-7229.2021.10.014).
- [5] 张琳, 许可, 黄耀, 等. 基于模糊聚类的园区配网峰谷特性和潜力分析研究 [J]. *南方能源建设*, 2020, 7(1): 27-32. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.004](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.004).
- ZHANG L, XU K, HUANG Y, et al. Analysis of potential shifting and filling potential of campus distribution network based on fuzzy clustering [J]. *Southern energy construction*, 2020, 7(1): 27-32. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.004](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.004).
- [6] 劳永钊, 吴任博, 肖健, 等. 中压配电网线损实时同步监测系统设计方案研究 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(增刊1): 139-146. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S1.021](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S1.021).
- LAO Y Z, WU R B, XIAO J, et al. Research on design scheme of real-time synchronous monitoring system for line loss of medium voltage distribution network [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(Suppl. 1): 139-146. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S1.021](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S1.021).
- [7] 熊文, 危国恩, 王莉, 等. 智能配电网广域同步相量测量体系设计方案研究 [J]. *南方能源建设*, 2021, 8(2): 85-90. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.02.013](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.02.013).
- XIONG W, WEI G E, WANG L, et al. Research on the design scheme of wide area synchronous phasor measurement system for smart distribution grid [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(2): 85-90. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.02.013](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.02.013).
- [8] 劳永钊, 吴任博, 肖健, 等. 基于同步相量测量的配电网电压暂降溯源系统设计研究 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(1): 115-121. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.017](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.017).
- LAO Y Z, WU R B, XIAO J, et al. Research on voltage sag source-locating system design of distribution network based on synchronous phasor measurement [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(1): 115-121. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.017](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.017).
- [9] 孙媛媛, 程凯强, 许庆棠, 等. 考虑光伏出力相关性的主动配电网薄弱环节识别 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(15): 96-103. DOI: [10.7500/AEPS20211214001](https://doi.org/10.7500/AEPS20211214001).
- SUN Y Y, CHENG K Q, XU Q S, et al. Identification of weak link for active distribution network considering correlation of photovoltaic output [J]. *Automation of electric power systems*, 2022, 46(15): 96-103. DOI: [10.7500/AEPS20211214001](https://doi.org/10.7500/AEPS20211214001).
- [10] 王莹, 肖峻, 曹严. 柔性配电网间歇性分布式发电消纳能力分析 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(13): 74-83. DOI: [10.7500/AEPS20210831004](https://doi.org/10.7500/AEPS20210831004).
- WANG Y, XIAO J, CAO Y. Analysis on accommodation capability of intermittent distributed generation in flexible distribution network [J]. *Automation of electric power systems*, 2022, 46(13): 74-83. DOI: [10.7500/AEPS20210831004](https://doi.org/10.7500/AEPS20210831004).
- [11] 李翠萍, 东哲民, 李军徽, 等. 提升配电网新能源消纳能力的分布式储能集群优化控制策略 [J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(23): 76-83. DOI: [10.7500/AEPS20210224004](https://doi.org/10.7500/AEPS20210224004).
- LI C P, DONG Z M, LI J H, et al. Optimal control strategy of distributed energy storage cluster for prompting renewable energy accommodation in distribution network [J]. *Automation of electric power systems*, 2021, 45(23): 76-83. DOI: [10.7500/AEPS20210224004](https://doi.org/10.7500/AEPS20210224004).
- [12] 雷霞, 唐文左, 李逐云, 等. 考虑区域综合能源系统优化运行的配电网扩展规划 [J]. *电网技术*, 2018, 42(11): 3459-3468. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2018.1171](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2018.1171).
- LEI X, TANG W Z, LI Z Y, et al. Distribution network expansion planning considering optimal operation of regional integrated energy system [J]. *Power system technology*, 2018, 42(11): 3459-3468. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2018.1171](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2018.1171).
- [13] 唐佳, 王丹, 贾宏杰, 等. 基于迟滞模型的集群电动汽车参与实时需求响应V2G控制策略研究 [J]. *电网技术*, 2017, 41(7): 2155-2164. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2016.2709](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2016.2709).
- TANG J, WANG D, JIA H J, et al. A study of V2G control strategies of aggregated electric vehicles for real-time demand response based on hysteresis model [J]. *Power system technology*, 2017, 41(7): 2155-2164. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2016.2709](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2016.2709).
- [14] 范添圆, 王海云, 王维庆, 等. 计及主/被动需求响应下基于合作博弈的微网-配电网协调优化调度 [J]. *电网技术*, 2022, 46(2): 453-462. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0889](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0889).
- FAN T Y, WANG H Y, WANG W Q, et al. Coordinated optimization scheduling of microgrid and distribution network based on cooperative game considering active/passive demand response [J]. *Power system technology*, 2022, 46(2): 453-462. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0889](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0889).
- [15] 胡戎, 邱晓燕, 张志荣. 计及灵活性资源的交直流混合配电网双层优化 [J]. *电网技术*, 2022, 46(6): 2259-2267. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1036](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1036).
- HU R, QIU X Y, ZHANG Z R. Bi-level optimization of AC/DC

- hybrid distribution network considering flexible resources [J]. *Power system technology*, 2022, 46(6): 2259-2267. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1036.
- [16] 赵晓敏, 赵影, 李斯特, 等. 基于MMC的交直流混合配电网交流系统协调控制策略分析 [J]. *内蒙古电力技术*, 2021, 39(5): 15-21. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2021.0093.
- ZHAO X M, ZHAO Y, Liste, et al. Coordinated control strategy of AC system failure for AC-DC hybrid distribution network based on MMC [J]. *Inner Mongolia electric power*, 2021, 39(5): 15-21. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2021.0093.
- [17] 吴涵, 孙力文, 项晟, 等. 计及可再生能源与负荷高维时序相关性的主动配电网扩展规划 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(16): 40-51. DOI: 10.7500/AEPS20220104004.
- WU H, SUN L W, XIANG S, et al. Expansion planning of active distribution network considering high-dimensional temporal correlation between renewable energy and load [J]. *Automation of electric power systems*, 2022, 46(16): 40-51. DOI: 10.7500/AEPS20220104004.
- [18] 陈厚合, 刘丽娜, 姜涛, 等. 提升配电网电压质量的分布式储能经济优化配置方法 [J]. *电网技术*, 2018, 42(7): 2127-2135. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2018.0270.
- CHEN H H, LIU L N, JIANG T, et al. Optimal economic configuration of distributed energy storage systems for improving voltage quality in distribution network [J]. *Power system technology*, 2018, 42(7): 2127-2135. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2018.0270.
- [19] 向育鹏, 王志农, 孙国强, 等. 基于全寿命周期成本的配电网蓄电池储能系统的优化配置 [J]. *电网技术*, 2015, 39(1): 264-270. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2015.01.040.
- XIANG Y P, WEI Z N, SUN G Q, et al. Life cycle cost based optimal configuration of battery energy storage system in distribution network [J]. *Power system technology*, 2015, 39(1): 264-270. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2015.01.040.
- [20] 薛金花, 叶季蕾, 陶琼, 等. 采用全寿命周期成本模型的用户侧电池储能经济可行性研究 [J]. *电网技术*, 2016, 40(8): 2471-2476. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.08.032.
- XUE J H, YE J L, TAO Q, et al. Economic feasibility of user-side battery energy storage based on whole-life-cycle cost model [J]. *Power system technology*, 2016, 40(8): 2471-2476. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.08.032.

作者简介:



李学斌

李学斌(第一作者, 通信作者)

1983-, 男, 高级工程师, 工学硕士, 主要从事电力系统保护、智能电网和能源存储系统研究工作(e-mail)lxbtju@163.com。

刘剑

1984-, 男, 高级工程师, 工学硕士, 主要从事智能电网、主动配电网及综合能源系统研究工作(e-mail)285883038@qq.com。

马麟

1979-, 男, 教授级高级工程师, 工学博士, 主要从事智能配电网研究工作(e-mail)lma126@126.com。

韩云阳

1989-, 女, 高级经济师, 理学硕士, 主要从事科技管理工作(e-mail)yyhan@cpecc.com。

赵洁琼

1984-, 女, 高级工程师, 工学硕士, 主要从事电力系统规划研究工作(e-mail)jqzhao2021@163.com。

李富春

1982-, 男, 高级工程师, 工学硕士, 主要从事电力系统规划研究方面工作(e-mail)lifuchun@nwepdi.com。

项目简介:

项目名称 碳中和目标下省级储能规划技术研究(DG2-X01-2022)

承担单位 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司、中国能源建设集团天津电力设计院有限公司、中国能源建设集团云南省电力设计院有限公司

项目概述 在碳中和背景下, 项目以省级储能规划技术为研究对象, 分析以新能源为主体的新型电力系统中不同时间尺度的调峰调频需求, 根据不同储能电源的技术特征和调峰调频成本, 结合储能功能定位提出新型电力系统省级电网中储能电源优化配置方法。

主要创新点 (1) 调研多种储能形式技术参数、运行特性和成本下降趋势, 分析不同储能技术在我国省级电网中的应用场景; (2) 分析新型电力系统省级电网中不同时间尺度的调峰需求, 分别从向上调峰和向下调峰角度研究储能电源优化配置方法和流程; (3) 分析高比例新能源系统频率响应机理, 研究新型电力系统惯量评估方法, 结合不同储能技术调频特性, 提出高比例新能源电力系统中储能电源调频配置方法。

(编辑 赵琪)