

提高配电网新能源消纳比例的分布式储能系统优化配置方法

张 昊

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 随着配电网中新能源接入比例的不断提高, 配电网负荷低谷时刻的弃风弃光现象日益严重。为了提高配电网对新能源的消纳比例, 提升分布式储能的运行收益, 首先对分布式储能系统在配电网的应用进行了需求分析, 明确了利用分布式储能系统提升新能源消纳比例的合理性。然后, 构建了分布式储能系统优化配置方法, 兼顾了储能系统的套利收益及其投运成本, 以储能系统日运行净收益最优为目标, 研究分布式储能系统的优化配置。最后, 利用 IEEE 33 节点算例系统验证所提出方法的有效性, 结果证明所提出的储能系统配置方法在提升配电网对新能源消纳比例的同时, 提升了配电网运行的安全稳定性。
关键词: 配电网; 新能源消纳; 分布式储能系统; 优化配置

Optimized configuration method of distributed energy storage for improving renewable energy accomodation in distribution network

ZHANG Hao

(School of Electrscal Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012,China)

Abstract: With the increasing proportion of new energy in distribution power grid, the phenomenon of abandoning wind and light in off-peak load of distribution power grid becomes more and more serious. In order to improve the proportion of new energy consumption in distribution power grid and improve the operating income of distributed energy storage system, firstly the demand for the application of distributed energy storage system in distribution power grid is analyzed, and the rationality of using distributed energy storage system to improve the proportion of new energy consumption is made clear. Then, a distributed energy storage system optimal allocation method is constructed, which takes into account the arbitrage benefits and operation costs of energy storage system, and studies the optimal allocation of distributed energy storage system with the goal of optimizing the net income of energy storage system daily operation. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by the IEEE-33 node example system. The results show that the proposed energy storage system configuration method not only improves the proportion of new energy consumption in the distribution power prid, but also improves the safety and stability of the distribution power grid operation.

Key words: distribution power grid; New energy consumption; distributed energy storage system; optimal configuration

0 引言

随着化石能源的日渐枯竭, 环境问题日益

突出, 分布式电源 (Distributed Generations, DG) 凭借无污染的优点得到快速发展。预

计到2030年，DG并网装机总容量将达到130 GW^[1-2]，实现非化石能源占一次能源消费比重25%的目标。DG出力具有间歇性与随机性，无法和负荷时空匹配，大规模DG接入影响了传统配电网结构，改变了系统潮流分布，给配电网的安全、经济运行带来了巨大的挑战^[3]。其中，以配电网对DG的消纳能力不足尤为突出，在配电网负荷低谷时刻，大量DG无法被配电网消纳，这一部分电量倒送至主电网，造成了能源的浪费并影响了配电网运行的安全性和稳定性。分布式储能系统以低储高发的特点，可以在负荷低谷时刻吸收该部分倒送功率，并在负荷高峰时刻释放电能，是有效提升配电网对新能源消纳比例的有效手段。

有关提升配电网对分布式电源消纳能力方面的分布式储能优化配置研究，文献[4]指出利用分布式储能系统可以有效提高配电网对新能源的消纳比例，提升配电网运行的经济性。文献[5]指出储能系统接入后可以有效平抑因大规模新能源接入配电网导致的负荷波动情况。文献[6]指出协调配置新能源与分布式储能系统配置容量可以提升配电网对新能源的消纳比例。文献[7]指出通过配置储能系统提高新能源消纳比例是当前智能配电网的发展趋势。文献[8]设计了一种利用储能系统与新能源协调配置方法，以实现降低配电网的弃风弃光总量。但仅从提升新能源消纳

比例的角度制定储能系统优化配置方法，虽然可以有效提高DG消纳比例，却忽视了储能系统运行的经济性，难以提高储能系统消纳新能源时带来的综合收益。

综上所述，关于利用储能系统提升配电网对新能源消纳能力的研究，现有研究主要从技术约束角度出发，对储能系统实际运行中的经济性考虑不足，虽然考虑了储能系统投入运行期间获得的收益，但考虑的经济性目标大多较为单一，难以实现储能系统投资收益最大化。原有的储能系统容量优化配置方法难以适用于高比例分布式储能系统及电动汽车接入后的配电网。本文综合考虑储能系统套利收益以及储能系统投运成本，以储能系统日运行净收益最优为目标，对储能系统进行优化配置，达到提升配电网对新能源的消纳比例的目的，保证配电网整体运行经济性最优。

1 含DG/EV/DES的典型配电网结构

随着分布式电源和电动汽车的大规模接入，使传统配电网由被动转变为主动，配电网中潮流的分布由单向转变为多向，同时配电网功率传输路径以及运行模式也发生了相应变化。为了分析分散式风电、分布式光伏、电动汽车以及分布式储能系统接入后对配电网特性的影响，本文构建了典型配电网结构如图1所示。

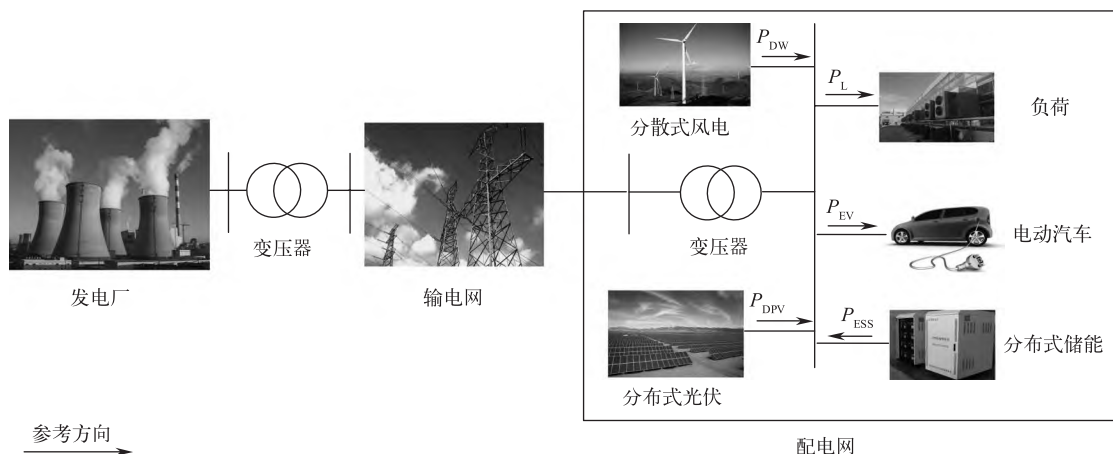


图1 含DG/EV/DES的典型配电网结构

Fig. 1 Typical distribution network structure with DG / EV / DES

分布式电源、电动汽车以及分布式储能系统的接入,使配电网与主电网间“源-网-荷”的互动机制日益复杂。本文在研究配电网与主电网间的功率特性时,考虑了电动汽车充电负荷特性以及分布式电源的调峰特性,将分布式电源作为负的负荷与电动汽车、常规负荷叠加,通过潮流计算可得到主电网供电负荷。同时,本文考虑了分布式储能系统在不同时刻的运行机制,将 t 时刻分布式储能系统的有功功率定义为 $P_{DES,t}$, $P_{DES,t}>0$ 时,储能放电; $P_{DES,t}<0$ 时,储能充电。综合上述分析, t 时刻主网的有功功率 $P_{G,t}$ 计算公式为

$$P_{G,t} = P_{TL,t} + P_{EV,t} - (P_{DPV,t} + P_{DW,t}) + \sum_{n=1}^N P_{N,t}^n + P_{DES,t} \quad (1)$$

式中, $P_{TL,t}$ 、 $P_{EV,t}$ 、 $P_{DPV,t}$ 和 $P_{DW,t}$ 分别为配电网原始负荷、电动汽车、分布式光伏及分散式风电在 t 时刻的有功功率; $P_{N,t}^n$ 为配电网第 n 个支路在 t 时刻的有功功率损耗,MW; N 为配电网支路的总个数。

由于随机性和波动性,DG出力的变化会影响主电网功率流动的方向。当DG出力较小时,此时 $P_{G,t}>0$,即电网功率流动的方向是由主电网至配电网。当主电网的有功功率高于配电网变压器额定功率时,此时变压器将面临过负荷运行问题。当DG出力较大时,易出现 $P_{G,t}<0$,即出现配电网向主电网倒送功率的情况。此时配电网面临着消纳DG能力不足,配电网整体运行经济性和安全性降低的情况。基于上述分析,针对大规模DG及电动汽车接入对配电网造成的一系列问题,应充分利用储能系统对功率响应迅速,能够就地吞吐功率的特性,解决当前配电网遇到的典型问题。

2 面向提升DG消纳的分布式储能系统优化配置方法

当DG出力较大,配电网负荷较小时,出现了向主电网功率倒送的情况。若不进行有效处理,会导致DG接入点及沿馈线节点电压不同幅度的上升,造成节点电压越上限问题,严重危害

电能质量。为了减少配电网对主电网的影响,传统采取弃风、弃光手段,不利于配电网对清洁能源的消纳。

为了减少弃风弃光现象的发生,保证节点电压不超过偏差允许范围,利用分布式储能系统在配电网功率倒送期间存储倒送的电能,减小配电网对主电网的影响。在负荷高峰时释放,可以获得可观的售电收益。但若完全消纳弃风弃光,对应配置的储能系统容量也会过大,导致分布式储能系统投资的经济性不佳。因此如何对储能系统进行优化配置成为有效促进配电网对新能源消纳能力的关键。

2.1 配电网分布式储能系统需求分析

当DG及电动汽车大规模接入配电网后,主电网负荷相应发生变化。由于分布式光伏和分散式风电的出力取决于光照、风速的影响,因此出力具有不确定性、间歇性的特点。当DG出力较大或者满发时,其出力往往大于配电网负荷需求量。以配电网某日负荷为例,当 t 时刻主网供电负荷功率 $P_{G,t}<0$ 时,表明 t 时刻配电网发电功率过剩,此时配电网处于功率倒送时段,即该时刻总负荷小于DG出力。配电网总负荷计算公式为

$$P_{TL,t} < P_{DG,t} \quad (2)$$

式中, $P_{TL,t}$ 为 t 时刻配电网总负荷大小,MW; $P_{DG,t}$ 为 t 时刻DG出力大小,MW。

图2为DG接入配电网后,配电网某日的等效负荷运行曲线。该典型日DG出力较大,导致DG与配电网原始负荷叠加后出现负值,对电网产生倒送功率,造成了弃风弃光的现象。

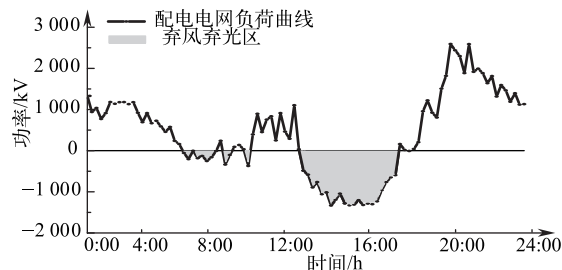


图2 配电网典型日净负荷曲线

Fig. 2 Typical daily net load curve of distribution power grid

当配电网处于功率倒送时段，分布式储能系统应在该时段充电存储倒送电能，使主电网供电负荷不小于0，即

$$P_{G,t} = P_{TL,t} - P_{DG,t} + P_{DES,t} \geq 0 \quad (3)$$

式中， $P_{TL,t}$ 为t时刻配电网总负荷大小，MW； $P_{DG,t}$ 为t时刻DG出力大小，MW； $P_{ESS,t}$ 为t时刻储能系统功率大小，MW。

基于上述分析，DG接入比例较高，出力较大时，配电网向主电网倒送功率造成弃风、弃光现象。利用分布式储能系统时空平移的功能，将倒送电能储存并在电价高峰时售出，在提高配电网运行经济收益的同时，提高对新能源的消纳能力。

2.2 分布式储能系统优化配置方法设计

2.2.1 目标函数

本文针对DG接入比例较高，即DG出力大于配电网负荷所需功率时，配电网出现向主电网倒送功率的场景，提出配置分布式储能系统提高分布式电源消纳比例。由于配电网功率倒送的时段出现在一天内的负荷低谷时刻，基于储能系统低储高发的特性，利用储能系统存储低谷时刻倒送至主网的功率，在负荷高峰时刻释放功率获得相应的售电收益，同时提升配电网运行的经济性。

考虑到储能系统的初始投资、运维成本及其售电收益，构建储能系统日运行收益最大的目标函数，获得储能系统的最优配置

$$\max F_{P,ESS} = F_A - F_{ESS} \quad (4)$$

式中， $F_{P,ESS}$ 为储能系统日运行收益； F_A 为储能系统套利收益； F_{ESS} 为储能系统的投运成本。

(1) 储能系统套利收益

$$F_A = F_{sale}^{ESS} - F_{buy}^{ESS} \quad (5)$$

$$F_{sale}^{ESS} = \sum_{t=1}^{96} \sum_{i=1}^N TOU(t) P_{ESSdis,i}(t) \Delta t \quad (6)$$

$$F_{buy}^{ESS} = \sum_{t=1}^{96} \sum_{i=1}^N TOU(t) P_{ESSc,i}(t) \Delta t \quad (7)$$

式中， F_{sale}^{ESS} 为储能系统在负荷高峰时刻释放电能所获得的售电收益； F_{buy}^{ESS} 为储能系统在负荷低谷时刻向主电网支付的购电费用； N 为储能

接入个数； $TOU(t)$ 为主电网t时刻的分时电价； $P_{ESSdis,i}(t)$ 、 $P_{ESSc,i}(t)$ 分别为第i个储能t时刻的放电功率和充电功率； Δt 为时间间隔，本文取15 min为一个时间间隔。

(2) 储能系统投运成本

$$F_{ESS} = F_{inv}^{ESS} + F_{OM}^{ESS} \quad (5)$$

$$F_{inv}^{ESS} = C_E \sum_{i=1}^N E_{ESS,i} + C_P \sum_{i=1}^N P_{ESS,i} \quad (6)$$

$$F_{OM}^{ESS} = C_{OM}^{ESS} (P_{ESSdis,e}(t) + P_{ESSc,e}(t)) \Delta t \quad (7)$$

式中， F_{inv}^{ESS} 为储能系统初始投资成本； F_{OM}^{ESS} 为储能系统维护成本； C_E 、 C_P 分别为储能系统的单位容量成本和单位功率成本； $E_{ESS,i}$ 、 $P_{ESS,i}$ 分别为第i个储能系统的额定容量和额定功率； C_{OM}^{ESS} 为储能系统单位容量的维护成本。

2.2.2 约束条件

本节建立了储能系统优化配置模型，计及了配电网潮流约束、节点电压约束、储能系统的充放电功率约束以及荷电状态约束。

(1) 潮流方程约束

$$P_i(t) = U_i(t) \sum_{j=1}^N U_j(t) [G_{ij} \cos \delta_{ij}(t) + B_{ij} \sin \delta_{ij}(t)] \quad (8)$$

$$Q_i(t) = U_i(t) \sum_{j=1}^N U_j(t) [G_{ij} \sin \delta_{ij}(t) - B_{ij} \cos \delta_{ij}(t)] \quad (9)$$

式中， $P_i(t)$ 、 $Q_i(t)$ 分别为t时刻配电网节点i的有功功率和无功功率； N 为配电网节点总个数； $U_i(t)$ 、 $U_j(t)$ 分别为t时刻节点i、j的电压； G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点i、j之间的电导和电纳； δ_{ij} 为节点i、j之间的相角。

(2) 储能系统荷电状态约束

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (10)$$

$$SOC_0 = SOC_{T_0} \quad (11)$$

式中， $SOC(t)$ 为储能t时刻的荷电状态； SOC_{max} 、 SOC_{min} 分别为储能系统荷电状态的最大值和最小值； SOC_0 为储能系统荷电状态初始值，本文荷电状态初始值取前一周期末储能系统的荷电状态 SOC_{T_0} 。

(3) 储能系统功率约束

$$P_{ESS,i,min} \leq P_{ESS,i}(t) \leq P_{ESS,i,max} \quad (12)$$

式中, $P_{ESS,i}(t)$ 为第 i 个储能系统 t 时刻的功率; $P_{ESS,i,max}$ 、 $P_{ESS,i,min}$ 分别表示第 i 个储能功率的最大值和最小值。

(4) 节点电压约束

$$U_{i,min} \leq U_i \leq U_{i,max} \quad (13)$$

式中, U_i 为节点 i 的电压; $U_{i,max}$ 、 $U_{i,min}$ 分别为节点 i 电压允许偏移的最大值和最小值, 本文规定电压偏移量应在额定电压 U_N 的 $\pm 5\%$ 范围内。

2.3 容量选择方法

计算各种储能系统容量大小对应的费用, 容量选择步骤如下:

1) 输入典型日配电网负荷、DG数据、充放电效率、储能初始时刻荷电状态 SOC_0 、荷电状态上限 SOC_{max} 以及荷电状态下限 SOC_{min} 。模拟DG接入配电网运行, 并进行潮流计算, 计算后得到配电网典型日各个时刻总负荷功率 $P_{TL,t}$ 的大小。

2) 计算为减少弃风弃光的最大充电量 $E_{c,max}$, 即完全吸收配电网向主电网倒送的电量。计算储能系统容量初值 E_{ESS} 。

3) 置迭代次数 $h=1$, 根据设定储能系统容量, 利用所提出的控制策略计算储能系统功率 $P_{ESS,h}(t)$, 根据放电功率 $P_{ESS,dis,h}(t)$ 计算套利收益 $F_{A,h}$ 。

4) 确定第 h 次的储能系统额定功率 $P_{ESS,h} = \max(\text{abs}[P_{ESS,h}(t)])$, 即储能系统运行功率绝对值的最大值。根据 $P_{ESS,h}$ 、 $E_{ESS,h}$ 计算对应储能系统投运成本 $F_{ESS,h}$, 然后计算第 h 次目标函数值 $F_{P,ESS,dis,h} = F_{A,h} - F_{ESS,h}$, 记录第 h 次目标函数值。

5) 判断第 h 次储能系统容量是否满足条件 $0 < E_{ESS,h} < \varepsilon$ (ε 为接近0且大于0的数)。若满足条件, 则输出各次对应的目标函数值, 确定目标函数值最小的那次, 输出该次迭代时对应的储能容量, 即储能系统配置的最优容量。若不满足条件, 则开始迭代, 储能系统容量以 $E_{ESS,h+1} = E_{ESS,h} - dE$ 开始递减, 返回步骤2) 继续计算。储能系统容量选择流程如图3所示。

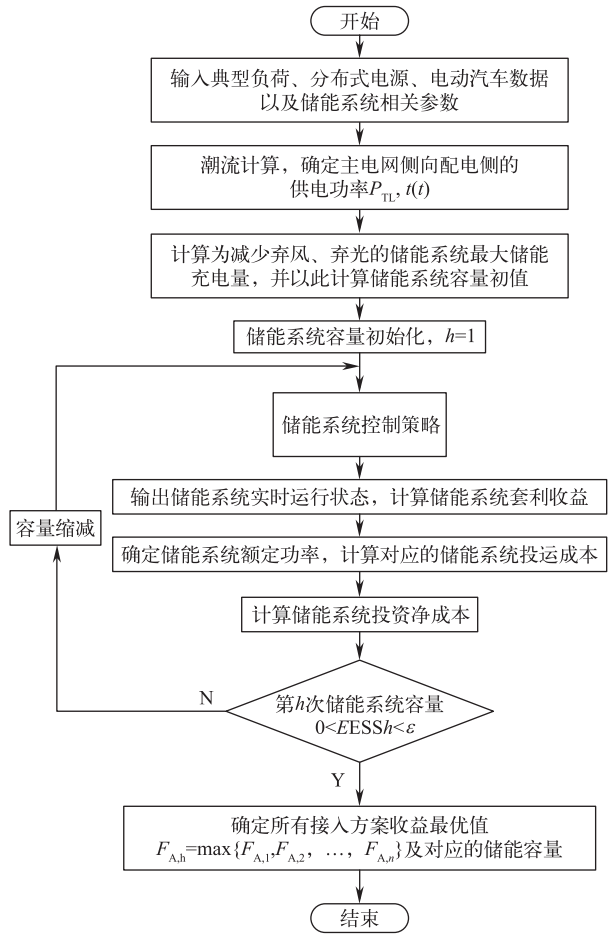


图3 储能系统容量选择流程

Fig. 3 Energy storage system capacity selection process

3 算例分析

3.1 算例条件

本文选取IEEE 33节点算例系统对所提出的储能系统优化配置方法进行验证, 如图4所示该系统的基准容量 $S_B = 10 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 基准电压等级为 12.66 kV , 变压器的额定容量为 $3500 \text{ kV} \cdot \text{A}$, 额定功率为 2976 kW 。该系统光伏、风电、电动汽车以及储能系统的接入位置和相关参数见下表。为了验证所提出方法的有效性, 对储能系统放电需求最大的场景制定储能容量, 在光伏接入点 (25、32) 与风电接入节点 (7、14) 配置储能系统。在考虑储能系统运行收益时, 以具体某地区分时电价作为参考, 配电网从主电网购电分时电价如图5所示, 其中峰时电价为1元, 平时电价为0.69元, 谷时电价为0.49元。

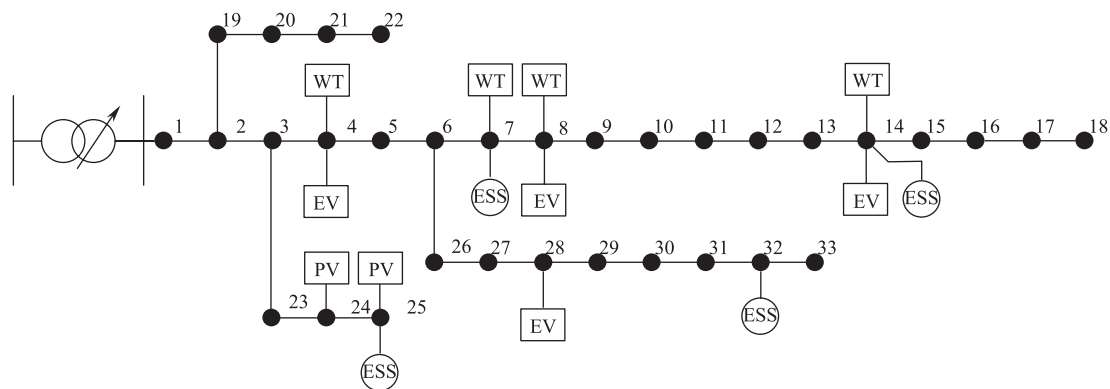


图4 IEEE 33节点算例系统
Fig. 4 IEEE 33 node example system

表 各设备分布及储能系统参数
Tab. Equipment distribution and energy storage system parameters

设备	节点号	容量 (MW/ MW·h)	储能系统参数
PV	24	1.5	C_p / (万元/MW) 150
	25	1.5	C_E / (万元/MW·h) 350
WT	4	0.5	SOC 范围 0.1 ~ 0.9
	7	0.5	
	8	0.5	
	14	0.5	
EV	4	0.16	充放电效率 (%) 95
	8	0.64	
	14	0.40	
	28	0.8	
ESS	7	0.3/0.6	使用年限 / 年 15
	14	0.3/0.6	
	25	0.5/1	
	32	0.5/1	

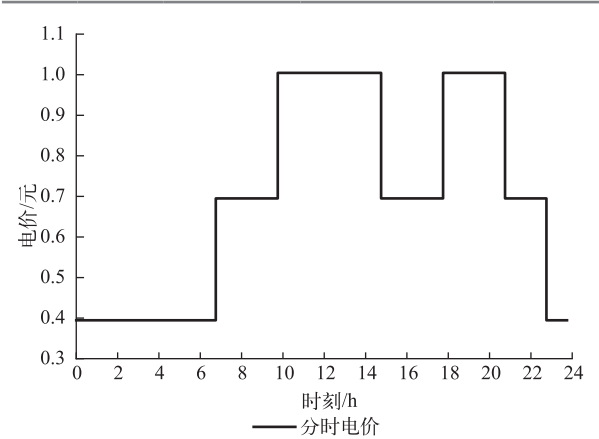


图5 主电网分时电价
Fig. 5 Electricity price at different times of main power grid

3.2 储能系统运行效果分析

配置储能系统后，对配电网负荷功率倒送情况的优化结果如图6所示。图6中黑色曲线为储能体系接入前配电网等效负荷，由于DG出力大于配电网负荷功率，在上午5:30~9:30与下午12:00~18:00负荷低谷期间，出现了功率倒送现象。为了提高配电网对新能源的消纳比例，基于储能系统控制策略，在配电网中配置分布式储能系统，其等效负荷曲线如图6中浅色线所示。基于分布式储能系统低储高发的特性，吸收低谷时刻倒送至主电网的电量并在负荷高峰期间放电套利，在提升配电网对新能源消纳能力的同时，提升配电网运行的经济性。

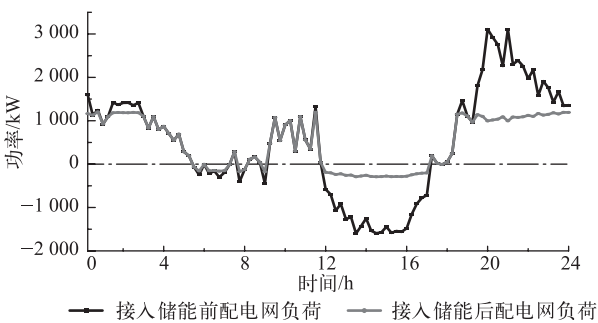


图6 储能系统接入前后配电网负荷对比
Fig.6 Load comparison of distribution power grid before and after energy storage access

基于上述所提的储能系统经济运行策略，以储能系统运行收益最优为目标，确定各个节点储能系统充放电功率曲线，如图7所示。对应的最优储能荷电状态变化时序图如图8所示。

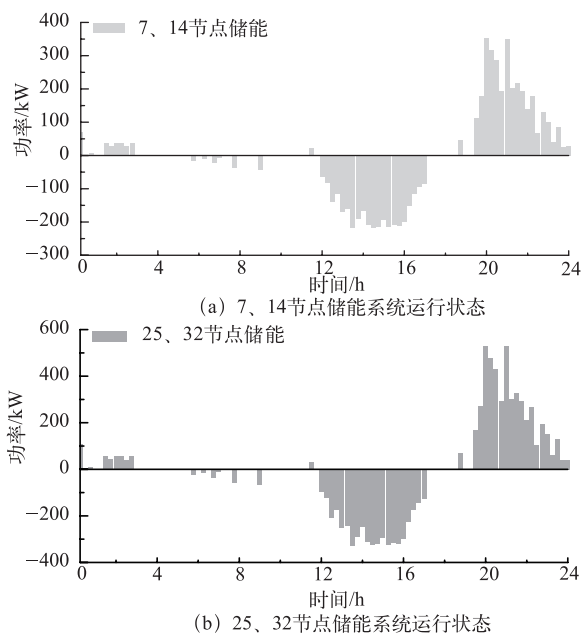


图7 各节点储能系统运行状态

Fig. 7 Energy storage system operation status of each node

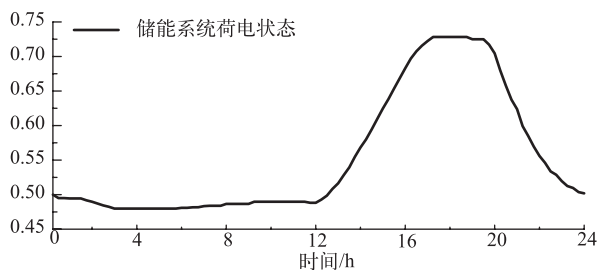


图8 储能荷电状态变化图

Fig. 8 Diagram of energy storage state of charge

对比配电网接入储能系统之后的网络损耗以及电压特性,用以验证分布式储能系统接入配电网后的作用效果。储能系统接入前后配电网网络损耗如图9所示。由图9分析可知,分布式储能系统接入配电网后,储能系统在中午以及晚上负荷高峰时刻放电。其中12:00~16:00时段网络损耗的总值由629.3 kW降低至315.1 kW, 20:00~24:00时段网络损耗总值由871.9 kW降低至414.5 kW,分布式储能系统就地吞吐电能能够降低配电网馈线上的功率流动,降低配电网的网络损耗。

配电网配置分布式储能系统前后的电压特性如图10、图11所示,对比储能系统接入前后配电网各节点电压波动,可知分布式储能系统接入后

各时刻配电网电压更加接近于标准值,降低了配电网节点电压的偏差和波动性。

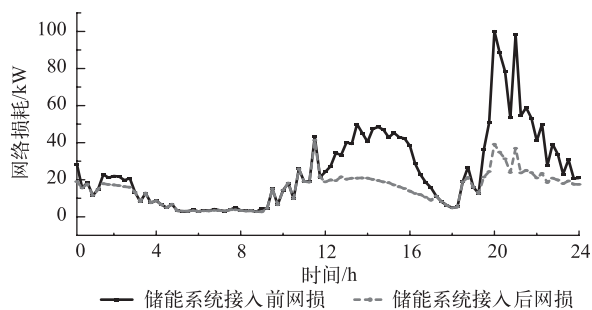


图9 储能系统接入前后配电网网络损耗

Fig. 9 Loss of power grid before and after energy storage system access

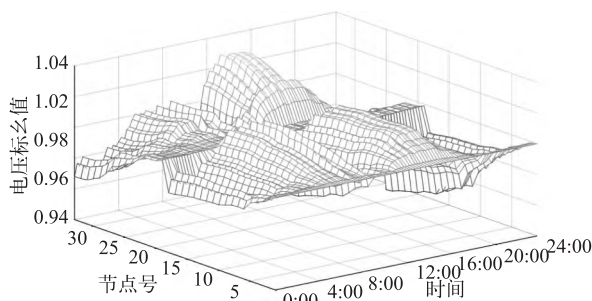


图10 配置储能系统前配电网各节点电压

Fig. 10 Each node voltage of the power grid before configure energy storage system

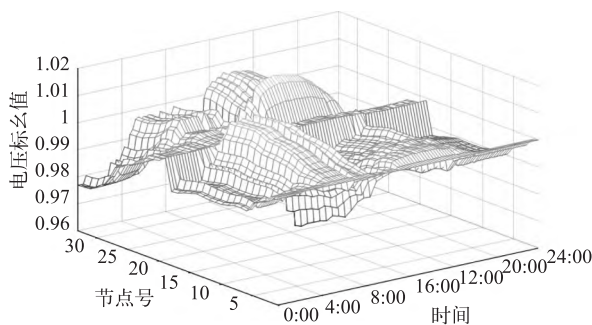


图11 配置储能系统后配电网各节点电压

Fig. 11 Each node voltage of the power grid after configure energy storage system

3.3 储能系统运行收益分析

根据本文提出的分布式储能系统优化配置方法,在计及储能系统套利收益以及其运维成本下的储能系统日运行净收益曲线如图12所示。储能系统的收益情况根据其消纳新能源的比例可分为新能源消纳区以及主电网购电区。在新能源消

纳区运行时, 储能系统消纳新能源向主电网倒送过剩功率, 并在负荷高峰时刻释放该部分电能, 获得售电收益, 其收益大致呈现为先增后减的趋势。当储能系统对新能源的消纳比例为41.67%时, 储能系统的日运行净收益取得最大值为102.6元/天。

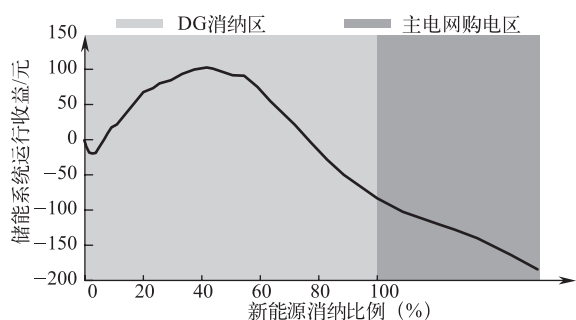


图 12 储能运行收益

Fig. 12 Energy storage system operation income

当新能源消纳比例超过100%时, 储能系统运行在主电网购电区, 储能系统所消纳的新能源倒送功率无法满足配电网负荷需求, 需要向主电网购电。此时储能系统需要支付对应时段的分时电价, 运行收益随着消纳比例的增加而降低。

4 结束语

本文针对当前配电网对DG消纳能力不足, 造成弃风弃光现象严重的问题, 提出了一种提升DG比例的配电网分布式储能系统优化配置方法。本文所提出的储能系统优化配置方法综合考虑了储能系统运行的套利收益以及储能系统的投运成本, 以储能系统日运行净收益最优为目标, 计及了配电网运行中的潮流约束、节点电压约束以及储能系统荷电状态约束。利用了IEEE 33节点算例系统验证所提出优化配置方法的有效性, 结果表明本文所提出的优化配置方法有效地降低了配电网运行中的网络损耗, 并平抑了配电网电压波动。所提出的优化配置方法在提升配电网对DG消纳比例的同时, 得到了储能系统日运行收益最优时对应的DG消纳比例。

参考文献

- [1] 欧阳森, 陈欣晖, 杨家豪. 配电网分布式风电与电池储能的协调优化配置[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017, 45(4): 30-36, 43.
- [2] 曾祥君, 罗莎, 胡晓曦, 等. 主动配电网系统负荷控制与电能质量监测[J]. 电力科学与技术学报, 2013, 28(1): 41-47.
- [3] 刘凯诚, 钟鸣, 曾平良, 等. 考虑分布式可再生能源和储能的智能配电网可靠性评估综述[J/OL]. 电测与仪表: 1-16[2020-05-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200421.1408.026.html>.
- [4] 韩自奋, 张柏林, 崔凯华, 等. 考虑新能源消纳能力及发电成本的风光火储联合调度策略研究[J]. 电工技术, 2020(8): 21-25.
- [5] LING AI WONG, VIGNA K, RAMACHANDARAMURTHY, et al. Review on the optimal placement, sizing and control of an energy storage system in the distribution network[J]. Journal of Energy Storage, 2019(21): 489-504.
- [6] LEKSAWAT S, SCHMELTER A, ORTJOHANN E, et al. Demonstration of cluster-based power system automation for future smart grids[C]. Leuven: 2016 IEEE International Energy Conference, 2016: 4-8.
- [7] GOLPIRA HEMIN, MESSINA A R, BEVRANI. Emulation of virtual inertia to accommodate higher penetration levels of distributed generation in power grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3384-3394.
- [8] 曾强, 谢善益, 周刚, 等. 倒送功率约束下的分布式电源最大接入容量分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 16-22.

作者简介

张昊(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 配电网分布式储能优化配置。

(收稿日期: 2021-12-15)