

计及调压辅助服务收益的光储系统优化运行策略

袁晓冬¹, 杨晓梅², 禹永洲³, 陆文涛³, 葛 乐³

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024;

3. 南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要:含高渗透率清洁能源配电网的电压越限问题日益严重。光储系统因具备 PQ 四象限调节能力, 具有向电网提供电压调节辅助服务的功能。提出了一种计及调压辅助服务收益的光储系统优化运行策略。给出了光储系统的拓扑结构和柔性并网运行方式; 考虑上网电量收益、辅助服务收益、购电费用、损耗费用以及运行约束条件, 构建了以光储系统经济收益最大为目标的最优运行模型。针对系统存在的连续多阶段全局有功/无功双决策问题, 采用多维动态规划算法进行求解。算例结果表明, 光储系统能主动响应调压辅助服务价格激励, 获得更高的经济收益, 同时有效地解决了配电网的电压越限问题。

关键词:光储系统; 柔性并网; 调压辅助服务; 多维动态规划

中图分类号: TM 615; TM 732

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.04.026

0 引言

配电网尤其是电缆化配电网的阻抗比 R/X 相对较大, 有功、无功潮流分布都会对节点电压产生较大的影响, 电压越限已成为近年来城市配电网安全运行的主要问题。以光伏为代表的分布式发电 DG (Distributed Generation) 在配电网中的渗透率日益提高, 常规 DG 并网只输出有功, 这一“刚性”并网方式进一步加剧了配电网的高电压问题^[1-3]。

解决配电网高电压问题的常规手段包括调节变压器分接头、并联电抗器以及静止同步补偿器等。变压器分接头有载调节无法从根本上解决系统无功不足引起的电压越限^[4], 并联电抗器以及静止同步补偿器等无功补偿装置对于由无功潮流引起的电压问题有显著的效果, 但无法有效地解决由高渗透率清洁能源并网引起的高电压问题, 并可能大幅增加系统的网损^[5-6]。

相较于上述传统方法, 配电网侧光储系统 PESS (Photovoltaic-Energy Storage System) 因具备 PQ 四象限输出调节能力, 其柔性并网方式可以在不限制光伏出力的同时, 有效地解决配电网的电压越限问题^[7-9]。一方面, 利用并网逆变器的剩余容量进行无

功调节, 类似于静止无功发生器 SVG (Static Var Generator); 另一方面, 在保证光伏以最大功率点跟踪 MPPT (Maximum Power Point Tracking) 发电的同时, 调节储能吸收部分时段的光伏出力, 降低 PESS 的有功输出。上述两方面相结合可从根本上解决高电压问题, 且因无需电网公司额外投资设备, 具有较好的经济性。

近年来, 利用储能调节配电网电压已成为国内外学者的研究热点之一。文献[10]提出一种综合考虑源荷峰谷特性的多时段 PESS 并网点电压控制方法以提高电压质量。文献[11]针对含高渗透率光伏配电网存在的电压问题, 提出一种分布式储能协调控制方法。文献[12]提出了 PESS 集中式、分散式以及分布式的典型控制方案, 优化系统电压水平。文献[13]考虑电压调节的经济性, 提出一种集中的储能控制策略, 能够提高储能的利用价值。上述文献已从多个层面对储能参与电网电压调节进行了有效的研究, 但都是建立在储能系统为电网公司所有或可完全接受电网调度这一前提下。需要注意的是, 我国配电网中的分布式 PESS 大多由用户投资, 其运行控制一般不受电网调度, 而是以自身经济收益最大为目标, 一般以价差套利模式并网运行。因此, 需要通过一定的激励措施引导 PESS 用户参与电网调压。需求响应^[14-15]为解决上述问题提供了新的思路, 电网公司根据调峰、调压、调频等需求制定相应的辅助服务电价及执行时段, 以需求响应的形式引导用户参与辅助服务^[16-17]。PESS 用户根据提供辅助服务的时段和激励电价情况, 基于自身的运行约束和经济收益, 制定最优运行策略, 在实现自身经济收益最大的同时, 为电网提供电压调节辅助服务。

基于上述分析, 本文提出了一种计及调压辅助

收稿日期: 2018-10-30; **修回日期:** 2019-03-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51707089); 国家重点研发计划“智能电网技术与装备”重点专项 (2017YFB-0903300); 国家电网公司总部科技项目 (5210EF17001C); 国网江苏省电力有限公司科技项目

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51707089), the National Key Research and Development Program of “Smart Grid Technology and Equipment” (2017YFB-0903300), the Science and Technology Project of SGCC (5210-EF17001C) and the Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd.

服务收益的 PESS 优化运行策略。首先,给出了 PESS 的拓扑结构和柔性并网方式;其次,构建了以 PESS 经济收益最大为目标的优化运行模型;然后,针对储能运行存在的连续多阶段全局有功/无功双决策问题,采用多维动态规划算法进行求解;最后,通过算例验证了所提运行策略的有效性。

1 柔性并网 PESS

PESS 的拓扑结构如图 1 所示,光伏发电单元和储能单元分别通过单向、双向 DC/DC 变换器汇集至公共直流母线,然后经 DC/AC 逆变器并网。共直流母线结构具有能量交换级数少、效率高和控制系统相对简单等优势^[18]。其柔性并网主要体现在:PESS 获得电网公司制定的不同时段的电价信息(包括上网电价、购电电价和辅助服务电价),上层决策基于运行约束,形成经济收益最大化的运行策略,并通过计算获得最优并网有功功率 $P_{\text{total}}(t)$ 以及无功功率 $Q_{\text{total}}(t)$;PESS 内部通过光伏 DC/DC 变换器实现 MPPT 控制,光伏最大输出功率 $P_{\text{pv}}(t)$ 与 $P_{\text{total}}(t)$ 的差值 $P_{\text{ess}}(t)$ 则通过共用的直流母线由储能充放电实现调节,DC/AC 并网逆变器统一控制并网输出的最优无功功率 $Q_{\text{total}}(t)$ 。因此,在柔性并网方式下,PESS 实现了最优有功/无功并网,经济收益最大,同时为电网提供了电压调节。

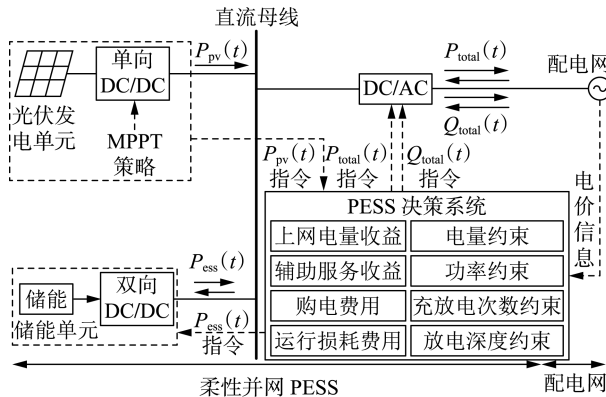


图 1 PESS 柔性并网运行方式

Fig.1 Flexible grid-connected operation mode of PESS

图 1 中的 PESS 辅助服务收益包括削减有功输出而获得的补偿和系统输出无功获得的收益这 2 个部分。

PESS 的并网有功功率 $P_{\text{total}}(t)$ 如式(1)所示,表示为光伏出力 $P_{\text{pv}}(t)$ 、储能充/放电功率 $P_{\text{ess}}(t)$ 及 DC/AC 逆变器转换效率 $\eta_{\text{dc-ac}}$ 的函数;受制于并网逆变器的容量限制,PESS 的并网有功功率 $P_{\text{total}}(t)$ 与无功功率 $Q_{\text{total}}(t)$ 相互制约,约束关系见式(2);光伏单元采用 MPPT 控制,始终输出最大功率 $P_{\text{pv}}(t)$,保证清洁能源的满额消纳,如式(3)所示,其中 $\eta_{\text{pv-dc}}$ 为光伏发电单元 DC/DC 变换器的转换效率;储能单元

的运行可划分为充电、空闲和放电 3 种状态,储能充/放电功率 $P_{\text{ess}}(t)$ 如式(4)所示。

$$P_{\text{total}}(t) = \eta_{\text{dc-ac}} (P_{\text{pv}}(t) + P_{\text{ess}}(t)) \quad (1)$$

$$|Q_{\text{total}}(t)| \leq \sqrt{S_{\text{inverter}}^2 - P_{\text{total}}^2(t)} \quad (2)$$

$$P_{\text{pv}}(t) = \eta_{\text{pv-dc}} P_{\text{MPPT}}(t) \quad (3)$$

$$P_{\text{ess}}(t) = \begin{cases} P_{\text{ess,c}}(t) & \text{充电状态} \\ 0 & \text{空闲状态} \\ P_{\text{ess,d}}(t) & \text{放电状态} \end{cases} \quad (4)$$

$P_{\text{ess}}(t)$ 的约束范围需考虑最大充/放电功率和避免“过充”及“过放”的储能荷电状态 $\text{SOC}(t)$ 的上/下限值(电量约束),根据式(5)和式(6)计算得到 $P_{\text{ess}}(t)$ 的约束范围,并将其代入式(1)即可确定 $P_{\text{total}}(t)$ 的输出约束范围;然后将其作为约束条件参与最优运行策略模型计算,将求解得到的 $P_{\text{total}}(t)$ 、 $P_{\text{ess}}(t)$ 作为初值,根据式(7)、(8)计算 $\text{SOC}(t+1)$,并将其作为 $P_{\text{ess}}(t+1)$ 的约束计算值;依此类推,得到所有时段储能充/放电功率的约束值。

$P_{\text{ess}}(t)$ 约束范围的计算公式如下。

a. 充电过程。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{ess,c}}(t) \leq P_{\text{ess,clim}}(t) \\ P_{\text{ess,clim}}(t) = \min \left\{ P_{\text{ess,cmax}}, C_{\text{ess}} \frac{\text{SOC}_{\text{max}} - \text{SOC}(t)}{\Delta t \eta_{\text{ess,c}}} \right\} \end{cases} \quad (5)$$

b. 放电过程。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{ess,d}}(t) \leq P_{\text{ess,dlim}}(t) \\ P_{\text{ess,dlim}}(t) = \min \left\{ P_{\text{ess,dmax}}, C_{\text{ess}} (\text{SOC}(t) - \text{SOC}_{\text{min}}) \frac{\eta_{\text{ess,d}}}{\Delta t} \right\} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $P_{\text{ess,clim}}(t)$ 、 $P_{\text{ess,dlim}}(t)$ 分别为时段 t 储能的充电、放电功率限值; C_{ess} 、 $P_{\text{ess,cmax}}$ 、 $P_{\text{ess,dmax}}$ 分别为储能的额定容量、最大充电功率、最大放电功率; SOC_{max} 、 SOC_{min} 分别为储能荷电状态的上、下限值; $\eta_{\text{ess,c}}$ 、 $\eta_{\text{ess,d}}$ 分别为储能的充电、放电效率,包括了储能单元 DC/DC 变换器的转换效率和储能本体的能量变换效率; Δt 为每个计算时段的时长。

储能荷电状态在时序上具有绝对的连续性,严格按照时间顺序根据实际充/放电功率进行累加计算,时序关系如下。

a. 充电过程。

$$\text{SOC}(t+1) = \text{SOC}(t) + \frac{\eta_{\text{ess,c}} P_{\text{ess,c}}(t) \Delta t}{C_{\text{ess}}} \quad (7)$$

b. 放电过程。

$$\text{SOC}(t+1) = \text{SOC}(t) - \frac{P_{\text{ess,d}}(t) \Delta t}{C_{\text{ess}} \eta_{\text{ess,d}}} \quad (8)$$

2 PESS 运行优化模型

PESS 收益最大运行优化主要有常规(价差套

利)和柔性并网提供辅助服务 2 种方式。本文中 PESS 的运行优化模型基于如下设定:已知 PESS 在 1 个运行周期内的负荷、DG 出力预测曲线,且该运行周期由若干个时段组成,并认为负荷大小和 DG 出力在每个时段中保持不变。现有预测技术已能保证负荷和新能源出力预测的精确度,因此上述设定对优化运行的结果影响较小。

2.1 常规运行方式

在常规运行方式下,PESS 通过光伏并网发电、储能峰谷价差套利获利,选取 PESS 经济收益最大作为目标函数。该运行方式下的经济收益可以表示为:

$$W_n = \max \sum_{t=1}^T (W_1(t) - W_2(t) - W_3(t)) \quad (9)$$

$$W_1(t) = K_1(t) P_{\text{total}}(t) \Delta t \quad (10)$$

$$W_2(t) = K_2(t) |P_{\text{total}}(t)| \Delta t \quad (11)$$

$$W_3(t) = \left(\frac{C_{\text{ess,rep}}}{2Q_{\text{lifetime}}} P_{\text{ess}}(t) + \frac{C_{\text{pv,rep}}}{T_{\text{lifetime}}} + K_3(t) P_{\text{total,loss}}(t) \right) \Delta t \quad (12)$$

其中, W_1 为上网电量收益; W_2 为 PESS 从电网购电的费用; W_3 为系统运行成本,包括运行损耗成本以及折旧成本^[19]; T 为运行周期时段数; $K_1(t)$ 为时段 t 的上网电价; $P_{\text{total}}(t)$ 为 PESS 在时段 t 的输出有功功率,为模型的决策变量; $K_2(t)$ 为时段 t 的购电电价; $C_{\text{ess,rep}}$ 为储能的建设成本; Q_{lifetime} 为储能在全寿命周期内输出的总电量; $C_{\text{pv,rep}}$ 为光伏的建设成本; T_{lifetime} 为光伏的服役寿命周期; $K_3(t)$ 为损耗电量电价,一般取为 $\max \{K_1(t), K_2(t)\}$; $P_{\text{total,loss}}(t)$ 为系统总损耗,包括 DC/AC 并网逆变器的损耗 $P_{\text{dc-ac,loss}}(t)$ 、光伏单元 DC/DC 变换器的损耗 $P_{\text{pv-dc,loss}}(t)$ 、储能充电损耗 $P_{\text{ess,c,loss}}(t)$ 和储能放电损耗 $P_{\text{ess,d,loss}}(t)$, 计算公式如式(13)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{total,loss}}(t) = P_{\text{dc-ac,loss}}(t) + P_{\text{pv-dc,loss}}(t) + P_{\text{ess,c,loss}}(t) + P_{\text{ess,d,loss}}(t) + P_{\xi,\text{loss}}(t) \\ P_{\text{dc-ac,loss}}(t) = \frac{1-\eta_{\text{dc-ac}}}{\eta_{\text{dc-ac}}} P_{\text{total}}(t) \\ P_{\text{pv-dc,loss}}(t) = \frac{1-\eta_{\text{pv-dc}}}{\eta_{\text{pv-dc}}} P_{\text{pv}}(t) \\ P_{\text{ess,c,loss}}(t) = \frac{1-\eta_{\text{ess,c}}}{\eta_{\text{ess,c}}} P_{\text{ess,c}}(t) \\ P_{\text{ess,d,loss}}(t) = \frac{1-\eta_{\text{ess,d}}}{\eta_{\text{ess,d}}} P_{\text{ess,d}}(t) \end{cases} \quad (13)$$

其中, $P_{\xi,\text{loss}}(t)$ 为储能充放电状态切换损耗,一般为定值。

2.2 柔性并网提供辅助服务运行方式

PESS 柔性并网提供辅助服务运行方式下的目

标函数是在式(9)的基础上增加了 PESS 为电网提供辅助服务获得的收益 W_4 , 如式(14)所示。

$$W_a = \max \sum_{t=1}^T (W_1(t) - W_2(t) - W_3(t) + W_4(t)) \quad (14)$$

当电网出现电压越限预警时,电网公司会发布部分时段内 PESS 的并网有功限额 $P_{\text{lim}}(t)$ 、补偿电价 $K_4(t)$ 、PESS 吸收或者发出的感性无功需求以及无功电价 $K_5(t)$ 。当 PESS 的有功出力大于有功限额时,PESS 将不会获得有功削减辅助服务收益;反之,PESS 将会根据有功削减量获得相应的收益。若 PESS 按照电网公司的要求吸收或发出感性无功,则其将会获得无功辅助服务收益。PESS 为电网提供辅助服务所获得收益 W_4 的具体计算公式如下:

$$W_4(t) = \begin{cases} K_5(t) |Q_{\text{total}}(t)| \Delta t & P_{\text{total}}(t) > P_{\text{lim}}(t) \\ K_4(t) (P_{\text{lim}}(t) - P_{\text{total}}(t)) \Delta t + K_5(t) |Q_{\text{total}}(t)| \Delta t & P_{\text{total}}(t) \leq P_{\text{lim}}(t) \end{cases} \quad (15)$$

2.3 约束条件

本文从 PESS 自身经济收益的角度建立运行优化模型,因此在约束条件中只需考虑 PESS 自身的运行约束,具体约束条件见式(1)~(6)。此外,储能能在 1 个运行周期结束时的荷电状态应与初始值一致,如式(16)所示。

$$\text{SOC}(0) = \text{SOC}(T) \quad (16)$$

化学储能的充放电次数直接关系着其寿命,因此需补充充放电次数约束。储能单元均工作于充电、放电、空闲这 3 种状态。将空闲状态看作是储能系统以零功率进行充放电,则在 1 个运行周期内储能系统的充电、放电阶段交替出现。1 次完整的充放电包括 1 个充电阶段、1 个放电阶段及若干个空闲阶段,因此可将充放电次数 X 约束描述为式(17)。

$$0 < X \leq k \quad (17)$$

其中, k 为给定的自然数。

3 策略求解

考虑到 PESS 优化运行模型属于长时间尺度上的多阶段连续非线性规划问题,需求解全局有功、无功功率的最优解,因此本文采用多维动态规划法^[9,20-21]求解最优模型。针对储能电量变化以及充放电动作的特点,将模型进行如下转化。

时段 t : PESS 的 1 个完整运行周期由若干个时段组成,将其标记为 $t (t \in \{1, 2, \dots, T\})$, 相邻时段间的间隔为 Δt 。

状态 $S(s_{p_t}, s_{q_t})$: 将 PESS 中储能的电量和逆变器的剩余无功容量分别作为状态 s_{p_t} 和 s_{q_t} , 对其进行离散化,相邻状态间的电量差和无功容量差分别记为 ΔS 和 ΔQ 。为了满足储能充放电次数约束,将每

个时段的状态 s_{pt} 划分为充电组和放电组(共分为 k 个组),充、放电组中包含了相应的允许状态集合,并从下往上依次排列充电组、放电组。在充电组中,储能可以处于空闲、充电状态或者跳转到其上的放电组;在放电组中,储能可以处于空闲、放电状态或者跳转到其下的充电组。

决策 $U(u_{pt}, u_{qt})$: 决策 u_{pt} 和 u_{qt} 分别对应 PESS 在每个时段内的 $P_{\text{total}}(t)$ 和 $Q_{\text{total}}(t)$, 其满足 PESS 运行约束(式(1)~(6))。策略包含所有时段的决策。

状态转移方程: 可由式(7)、(8)所示的储能系统电量与充/放电功率之间的关系方程推导得到 s_{pt} 的状态转移方程; PESS 相邻时段间的状态 s_{qt} 没有绝对的转移关系, 通过 PESS 的当前状态 s_{pt} 和逆变器容量确定其允许状态集合, 见式(2)。

指标函数: 时段 t 的目标函数 $V_t[S(s_{pt}, s_{qt}), U(u_{pt}, u_{qt})]$ 为 PESS 经济收益最大, 那么时段 t 的前推过程指标函数如式(18)所示。

$$F(S(s_{pt}, s_{qt})) = \max_{U(u_{pt}, u_{qt}) \in D(u_{pt}, u_{qt})} \{V_t[S(s_{pt}, s_{qt}), U(u_{pt}, u_{qt})] + F(S(s_{p(t-1)}), s_{q(t-1)})\} \quad (18)$$

其中, $D(u_{pt}, u_{qt})$ 为允许的决策集合。

整个寻优求解过程中需要在每个时段的 k 个充、放电组中完成, 从而使 PESS 运行约束以及储能充放电次数约束能够得到满足。

储能的初始电量确定了初始时刻的允许状态集合, 在对时段 t 的允许状态集合进行求解时, 由时段 $t-1$ 的允许状态集合以及决策 $u_{p(t-1)}$ 约束确定 s_{pt} 的允许状态范围, 在此基础上, 由每个 s_{pt} 以及决策 u_{qt} 约束确定时段 t s_{qt} 的允许状态范围, 最后求得时段 t 完整的允许状态集合。

V_t 可由相邻时段间的状态及 $P_{\text{total}}(t)$ 和 $Q_{\text{total}}(t)$ 求得, F 可根据前一时段的最优指标函数求得, 依此类推进行递归计算, 通过对储能初始状态到最终状态的所有决策 $P_{\text{total}}(t)$ 、 $Q_{\text{total}}(t)$ 进行求解, 即可得到最优策略。图2为多维动态规划法的求解流程。

4 算例分析

4.1 算例设置

本文采用的算例为经修改后的10节点配电系统^[22], 系统结构如图3所示, 为了反映我国城市配电网大多采用电缆的实际, 线路选用主流使用的YJV22-3×400型电缆, 电缆参数和系统拓扑参数分别见附录A中的表A1和A2(表A2中的电阻、电抗、电纳均为标么值)。该配电系统的电压等级为10 kV, 包含1个风电系统(WG)、3个光伏系统(PV₁—PV₃), 具体参数见表1。L₁—L₅为负荷所在位置。PESS_A和PESS_B分别由PV₂和PV₃升级改造而成, 逆变器的额定容量为0.65 MV·A。PESS_A、

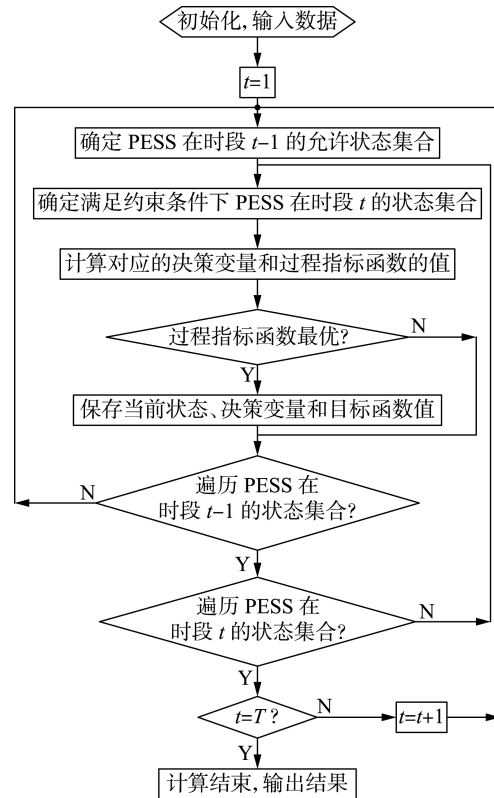


图2 多维动态规划法的求解流程

Fig.2 Flowchart of multi-dimensional dynamic programming method

PESS_B 的储能参数如表2所示。典型日负荷与DG的出力曲线见附录B中的图B1。

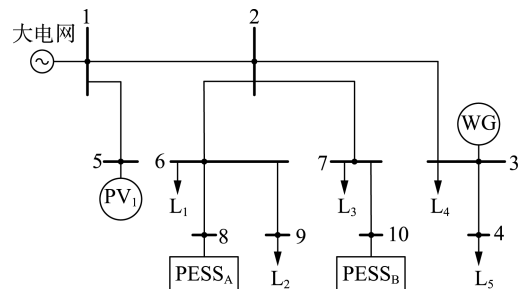


图3 10节点配电系统结构

Fig.3 Structure of 10-bus distribution system

表1 DG 参数

Table 1 Parameters of DGs

DG	接入节点	额定功率/MW	DG	接入节点	额定功率/MW
WG	3	0.55	PV ₂	8	0.25
PV ₁	5	0.30	PV ₃	10	0.25

表2 储能参数

Table 2 Parameters of energy storage

系统	最大容量/(MW·h)	最小容量/(MW·h)	最大充放电功率/MW	充放电效率
PESS _A	1.5	0.2	0.4	0.9
PESS _B	1.0	0.1	0.4	0.9

算例规定1个完整的运行周期时长为24 h, 将其分为96个时段, 每个时段15 min。系统负荷、光

伏以及风电的预测曲线已知,见附录 B 中的图 B1。购/售电电价参考文献[23]。基于文献[19]的计算方法及当前主流电池储能技术的经济参数,储能折旧成本折算为 0.4 元/(kW·h)。

需要说明的是,关于分布式能源提供调压辅助服务的补偿激励电价政策,相关部门正在制定中。为了便于计算,本文算例参考了《关于促进电储能参与“三北”地区电力辅助服务补偿(市场)机制试点工作的通知》及国外电力市场较成熟国家的辅助服务定价,给出相应的补偿价格。PESS 提供无功辅助服务的电价为 0.6 元/(kvar·h)(21:00 至次日 06:00 及 11:00—13:00),有功削减电价为 0.2 元/(kW·h)(11:00—15:00 内 PESS 限制最高出力为 0.2 MW)。

采用多维动态规划法求解模型,电量差 ΔS 设置为 0.01 MW×15 min,无功容量差 ΔQ 设置为 0.01 Mvar×15 min。综合考虑储能的寿命损耗以及提供辅助服务的灵活性,储能日充放电次数限制取为 7 次^[20,24]。

4.2 计算结果与分析

4.2.1 PESS 提供辅助服务运行策略分析

以 PESS_A 为例,图 4—6 给出了其运行结果。图 4 为 PESS_A 在常规与柔性并网运行方式下储能的充/放电功率曲线。从图中可看出,在 00:00—06:00 以及 21:00—22:00 时段,在柔性并网运行方式下储能不工作,一方面该时段内光伏出力为 0,储能无需调节光伏出力,另一方面为了取得无功并网收益,逆变器容量全用于向电网提供吸收感性无功功率的辅助服务;在 16:00—19:00 时段,相较于柔性并网运行方式,储能在常规运行方式下的充电功率较大,储能运行损耗也会相应地增大。图 5 为 PESS 在柔性并网运行方式下的输出有功功率与无功功率曲线。由图可知,在辅助服务收益激励的时段,系统为了提高收益,利用逆变器吸收感性无功,但在 22:00—24:00 时段,储能需从电网购电使电量恢复到初始状态,受制于逆变器容量约束,该时段逆变器不能以最大容量吸收感性无功。图 6 为在常规与柔性并网运

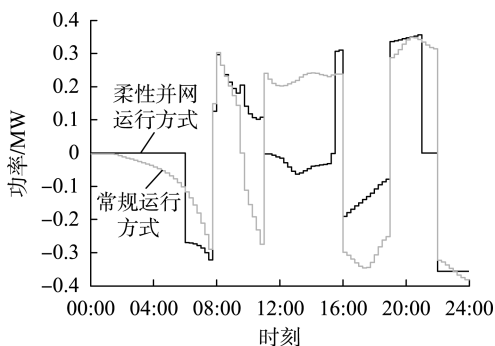


图 4 2 种运行方式下储能的充/放电功率曲线

Fig.4 Charging and discharging power curves of energy storage under two operation modes

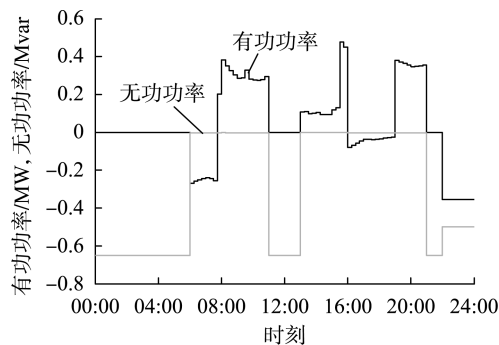


图 5 PESS 在柔性并网运行方式下的有功、无功功率曲线

Fig.5 Active and reactive power curves of PESS under flexible grid-connection mode

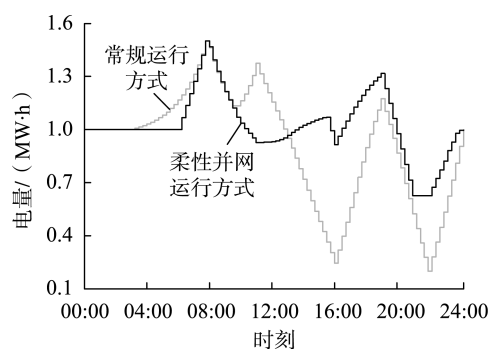


图 6 2 种运行方式下储能的电量曲线

Fig.6 Electricity curves of energy storage under two operation modes

行方式下储能的电量曲线。由图可知,从 06:00 开始,为了获得“低储高发”价差套利,利用储能存储光伏电量,直至接近 08:00 时储能系统电量达到限值;在 11:00—15:00 时段,光伏出力最大,系统响应电网公司的有功削减需求,将光伏单元的发电量部分转移给储能,降低了 PESS 的整体出力,既保证了光伏发电的满额消纳,又获取了相应的辅助服务收益。对比 PESS 在 2 种运行方式下储能的电量曲线可以看出,常规运行方式下储能的充放电深度较大,寿命折损也会相应增大。

经计算,在 1 个运行周期内,相比传统单纯的价差套利模式,计及电压辅助服务收益时 PESS_A 和 PESS_B 的总收益分别提高了 437 元和 353 元。可推知,在辅助服务电价激励的背景下,PESS 用户基于自身利益最大化必然会选择响应电网调压辅助服务这一运行方式。

4.2.2 PESS 运行策略对电网电压的影响分析

同样以 PESS_A 为例,在不同运行方式下系统节点电压的变化曲线如图 7 所示(图中电压为标幺值),最高电压曲线取分时段系统电压最高节点电压,最低电压曲线取分时段系统电压最低节点电压。可看出,当 PESS 以常规方式运行时,在 23:00 至次日 06:00 时段、11:00—15:00 时段及 21:00—22:00

时段,发生了电网节点电压越限的情况。经分析可知,在夜晚至凌晨的时段内负荷处于较低的水平,且风电机组仍能并网发电,在电缆充电电流的作用下,部分节点出现高电压问题。11:00—15:00 为全天光伏出力的高峰时段,再经叠加风电机组出力,部分近电源点的电压越上限。因此为了解决因夜晚负荷较轻等引起的电压偏高问题,系统需要提供无功支撑。对于由光伏出力高峰引起的节点电压升高问题,文献[9]已有结论:单纯地提供无功补偿并不能解决高电压问题,需辅以并网有功限制。

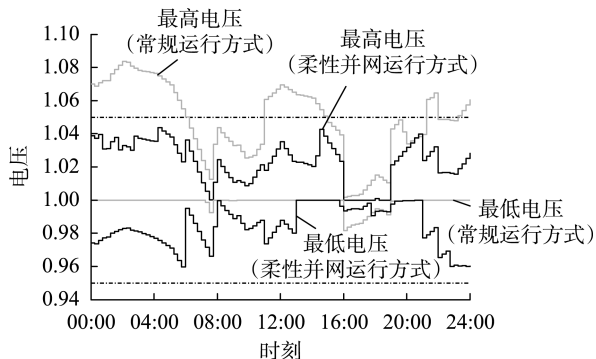


图7 2种运行方式下系统的电压

Fig.7 System voltage under two operation modes

当 PESS 采取柔性并网响应辅助服务运行方式时,全网节点电压水平得到了较大的改善,各时段电压都处于安全范围内。结合图 4、5 分析可知,PESS 在辅助服务收益的激励下,21:00—22:00 及 23:00 至次日 06:00 时段内,PESS_A 以接近逆变器最大额定容量吸收感性无功;11:00—15:00 时段内,PESS 一方面削减有功出力,另一方面吸收感性无功,系统高电压问题得到了有效的解决。

4.2.3 辅助服务电价及储能折旧成本对电网及 PESS 运行的影响分析

上文已分析了在一定的电价及成本条件下,PESS 的运行策略及其对电网电压的调节效果。由本文所提策略模型可知,辅助服务电价及储能折旧成本均会对 PESS 的运行策略(用户收益)及电网节点电压水平产生影响,不同成本及电价情况下的运行结果比较如表 3 所示。首先,在当前储能折旧成本 0.4 元/(kW·h)不变的前提下,将有功削减补偿电价降低至 0.1 元/(kW·h)(将该场景设置为场景 2,上文分析场景设置为场景 1)。场景 1 和场景 2 下 PESS 的有功出力曲线见附录 B 中的图 B2。场景 2 下系统的电压曲线见附录 B 中的图 B3。由图 B2、B3 可看出,13:00—15:00 时段内 PESS 的有功出力曲线发生了变化,同时电网部分节点电压超出了安全范围。由此可知,电网公司虽减少了辅助服务支出,但并未达到充分激励用户参与调压的目的。因此,较低的有功削减电价不能充分激励用户充分参

与电压调节。考虑储能技术仍然在飞速发展中,其成本未来仍有较大的下降空间,设置折旧成本下降至 0.3 元/(kW·h),保持辅助服务电价不变(场景 3),可以发现此时用户的总收益增长较大。若有功削减补偿电价下降至 0.1 元/(kW·h),场景 1 和场景 4 下 PESS 的有功功率曲线如附录 B 中的图 B4 所示,场景 4 下系统的电压如附录 B 中的图 B5 所示。由图 B4、B5 可见,用户的运行策略和电网的电压水平基本未发生变化,电网公司的支出显著减少,而用户的收益相比成本下降前变化不大。

表3 不同成本及电价情况下的运行结果比较

Table 3 Comparison of operation results under different costs and electricity prices

场景	折旧成本/ [元·(kW·h) ⁻¹]	有功削减电价/ [元·(kW·h) ⁻¹]	电网公司支 出成本/元	用户总收 益/元
1	0.4	0.2	1 580	1 719
2	0.4	0.1	1 368	1 685
3	0.3	0.2	1 596	1 854
4	0.3	0.1	1 385	1 708

5 结论

基于我国配电网对电压调节的需求和分布式能源的发展趋势,本文提出了一种计及调压辅助服务收益的光储优化运行策略,给出了 PESS 的拓扑结构和柔性并网运行方式。构建了以经济收益最大为目标的 PESS 优化运行模型,采用多维动态规划法求解这一连续多阶段全局最优解问题。通过仿真算例分析表明:在一定的电价激励下,PESS 用户基于自身利益最大化,会选择响应电网调压辅助服务需求,有效地解决城市配电网电压偏差问题;不同的电价激励对用户运行策略和电网调压效果会带来显著的影响,通过储能转移高峰光伏出力是兼顾能源绿色化和调节成本的有效手段;未来储能成本的下降将可进一步减小电网的调压成本。

调压辅助服务激励电价关系着电网公司和 PESS 用户的利益博弈均衡,这是下一步需深入研究的课题。此外,为了消除实际运行中存在的负荷和新能源出力与预测值的偏差影响,将考虑在日内实时控制中引入模型预测控制技术。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] SHAYANI R A, DE OLIVEIRA M A G. Photovoltaic generation penetration limits in radial distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1625-1631.
- [2] 李蕊,李跃,郭威,等. 分布式电源接入对配电网可靠性影响的仿真分析[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2016-2021.
LI Rui, LI Yue, GUO Wei, et al. Simulation analysis of the influence of distributed generation on the reliability of distribution network [J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2016-2021.
- [3] 李清然,张建成. 含分布式光伏电源的配电网电压越限解决方

- 案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 117-123.
- LI Qingran, ZHANG Jiancheng. Solutions of voltage beyond limits in distribution network with distributed photovoltaic generators [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 117-123.
- [4] 陈飞, 刘东, 陈云辉. 主动配电网电压分层协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 61-67.
- CHEN Fei, LIU Dong, CHEN Yunhui. Hierarchically distributed voltage control strategy for active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 61-67.
- [5] 高红均, 刘俊勇, 魏震波, 等. 主动配电网分层鲁棒规划模型及其求解方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1389-1400.
- GAO Hongjun, LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. A b-level robust planning model of active distribution network and its solution method [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1389-1400.
- [6] 张玮亚, 李永丽, 孙广宇, 等. 基于静止同步补偿器的主动配电网分区电压控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1644-1656.
- ZHANG Weiya, LI Yongli, SUN Guangyu, et al. Zonal-voltage control for active distribution network based on distributed static synchronous compensator [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1644-1656.
- [7] 陈旭, 张勇军, 黄向敏. 主动配电网背景下无功电压控制方法综述[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 143-151.
- CHEN Xu, ZHANG Yongjun, HUANG Xiangmin. Review of reactive power and voltage control method in the background of active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 143-151.
- [8] 赵金利, 于莹莹, 李鹏, 等. 基于锥优化的储能系统参与配电网运行调节快速计算方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(2): 30-35, 48.
- ZHAO Jinli, YU Yingying, LI Peng, et al. A fast calculation method of energy storage system for distribution network regulation based on conic programming [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2): 30-35, 48.
- [9] 葛乐, 陆文涛, 袁晓冬, 等. 基于多维动态规划的柔性光储参与主动配电网优化运行[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3300-3306.
- GE Le, LU Wentao, YUAN Xiaodong, et al. Optimal operation of active distribution network based on photovoltaic and energy-storage system of multi-dimensional dynamic programming [J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3300-3306.
- [10] 翟世涛, 刘泽槐, 杨家豪, 等. 考虑多时段并网点电压控制的光储容量匹配及优化运行[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1855-1863.
- ZHAI Shitao, LIU Zehuai, YANG Jiahao, et al. Capacity matching and optimal operation of photovoltaic-storage systems based on multiperiod PCC voltage control [J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1855-1863.
- [11] WANG Y, TAN K T, PENG X Y, et al. Coordinated control of distributed energy-storage systems for voltage regulation in distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1132-1141.
- [12] WORTHMANN K, KELLETT C M, BRAUN P, et al. Distributed and decentralized control of residential energy systems incorporating battery storage [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1914-1923.
- [13] WANG P F, LIANG D H, YI J L, et al. Integrating electrical energy storage into coordinated voltage control schemes for distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 1018-1032.
- [14] 王蓓蓓. 面向智能电网的用户需求响应特性和能力研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3654-3663.
- WANG Beibei. Research on consumers' response characteristics and ability under smart grid: a literatures survey [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3654-3663.
- [15] 赵洪山, 赵航宇, 侯杰群, 等. 需求响应对配电网供电可靠性影响分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 8-14.
- ZHAO Hongshan, ZHAO Hangyu, HOU Jiequn, et al. Effect of demand response on supply reliability of distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 8-14.
- [16] KHANI H, ZADEH M R D, HAJIMIRAGHA A H. Transmission congestion relief using privately owned large-scale energy storage systems in a competitive electricity market [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1449-1458.
- [17] CALDERARO V, GALDI V, LAMBERTI F, et al. A smart strategy for voltage control ancillary service in distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 494-502.
- [18] 葛乐, 袁晓冬, 陆宣统, 等. 柔性并网光储系统的设计与实现[J]. 太阳能学报, 2017, 38(10): 2871-2878.
- GE Le, YUAN Xiaodong, LU Xuantong, et al. Design and implementation of flexible grid connected PV and energy storage system [J]. Acta Energetica Sinica, 2017, 38(10): 2871-2878.
- [19] 王成山, 洪博文, 郭力. 不同场景下的光蓄微电网调度策略[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1775-1782.
- WANG Chengshan, HONG Bowen, GUO Li. Dispatch strategies of PV-battery microgrid in different scenarios [J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1775-1782.
- [20] 鲍冠南, 陆超, 袁志昌, 等. 基于动态规划的电池储能系统削峰填谷实时优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(12): 11-16.
- BAO Guannan, LU Chao, YUAN Zhichang, et al. Load shift real-time optimization strategy of battery energy storage system based on dynamic programming [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(12): 11-16.
- [21] LEVRON Y, GUERRERO J M, BECK Y. Optimal power flow in microgrids with energy storage [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3226-3234.
- [22] MACEDO L H, FRANCO J F, RIDER M J, et al. Optimal operation of distribution networks considering energy storage devices [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 2825-2836.
- [23] 吴雄, 王秀丽, 李骏, 等. 风电储能混合系统的联合调度模型及求解[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 10-17.
- WU Xiong, WANG Xiuli, LI Jun, et al. A joint operation model and solution for hybrid wind energy storage systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 10-17.
- [24] 戚永志, 刘玉田. 风光储联合系统输出功率滚动优化与实时控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 265-273.
- QI Yongzhi, LIU Yutian. Output power rolling optimization and real-time control in wind-photovoltaic-storage hybrid system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 265-273.

作者简介:



袁晓冬

袁晓冬(1979—),男,江苏无锡人,研究员级高级工程师,硕士,主要研究方向为新能源与智能电网;

杨晓梅(1973—),女,江苏泰州人,研究员级高级工程师,硕士,主要研究方向为电网规划运行、科技和智能电网建设管理;

葛乐(1982—),男,江苏泰州人,副教授,博士,通信作者,研究方向为新能源与主动配电网(E-mail: supertiger_bear@126.com)。

(下转第189页 continued on page 189)

Harmonic interaction influence of PV generation system accessing to traction power supply system and its adaptability analysis

DENG Wenli, DAI Chaohua, GUO Ai, SHI Fangli, HAN Chunbaixue, WU Mingliang, XUE Congcong

(College of Electric Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to analyze the harmonic interaction influence and its adaptability of PV (PhotoVoltaic) generation system accessing to traction power supply system, the system harmonic current analysis model is established based on harmonic transmission theory. The united simulation model for the coupled system of PV, all-parallel AT (Auto-Transformer) traction network and electric multiple units is set up in MATLAB/Simulink and its accuracy is verified. Based on this, the dynamic working conditions of traction side and PV side are simulated respectively, and the resonance and harmonic amplification characteristics of the system, the steady-state voltage distribution of traction network, the harmonic voltage/current distortion of different bus sides and the resistant ability of PV inverters are analyzed and compared before and after the integration of PV generation system. The accommodation ability of traction power supply system to PV generation is studied based on measured data, and results show that when the installed capacity of PV generation system is smaller, the harmonic interaction influence between traction power supply system and PV generation system is smaller, and both of them show good adaptability.

Key words: photovoltaic power generation; traction power supply system; back-to-back inverter; harmonic interaction influence; adaptability analysis

(上接第180页 continued from page 180)

Optimal operation strategy of PV-energy storage system considering revenue of voltage regulation ancillary service

YUAN Xiaodong¹, YANG Xiaomei², YU Yongzhou³, LU Wentao³, GE Le³

(1. Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China;

3. School of Electrical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: The voltage over-limit problem of distribution network with high penetration rate of renewable energy is increasingly serious. PESS (Photovoltaic-Energy Storage System) can provide voltage regulation ancillary service for the power grid due to its four-quadrant PQ adjustment capability. An optimal operation strategy is proposed for PESS considering the revenue of voltage regulation ancillary service. The topology structure and flexible grid-connected operation modes of PESS are given. Considering the on-grid energy income, the ancillary service revenue, the electricity purchasing cost, the loss cost and the operating constraints, the optimal operation model with the maximum economic benefit of PESS as its objective is established. Aiming at the global continuous multi-stage active/reactive power dual decision-making problem, the multi-dimensional dynamic programming algorithm is adopted to solve the problem. The results of case study show that PESS can respond to the price incentive of voltage regulation ancillary service to obtain higher revenue, and solve the voltage over-limit problem of distribution network effectively.

Key words: photovoltaic-energy storage system; flexible grid-connection; voltage regulation ancillary service; multi-dimensional dynamic programming

附录 A

表 A1 电缆线路参数

Table A1 Parameters of cable line

电压等级/kV	每相电容/($\mu\text{F}\cdot\text{km}^{-1}$)	电感/($\text{mH}\cdot\text{km}^{-1}$)	金属屏蔽层的 短路电流 /A	导体交流电阻 /($\Omega\cdot\text{km}^{-1}$)	90℃导体最大允许 短路电流(1s)/kA	铠装电缆最大允许短路电流/A	
						空气中	土壤中
8.7/15	0.4213	0.2714	3011	0.05825	57.4	700	645

表 A2 系统参数

Table A2 System parameters

线路首端节点	线路末端节点	长度/km	电阻	电抗	电纳
1	2	2.136749	0.14	0.40	0.00848
2	3	4.722014	0.26	0.90	0.01874
3	4	4.432242	0.26	0.84	0.01759
1	5	2.844799	0.22	0.52	0.01129
2	6	1.894853	0.16	0.34	0.00752
2	7	2.844799	0.22	0.52	0.01129
6	8	2.285414	0.30	0.34	0.00907
6	9	4.570828	0.22	0.88	0.01814
7	10	2.844799	0.22	0.52	0.01129

附录 B

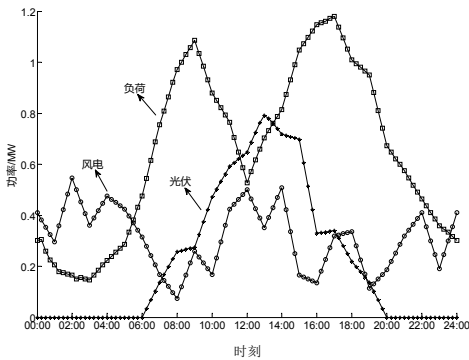


图 B1 负荷与 DG 预测出力曲线

Fig.B1 Forecasting curves of load and DG output power

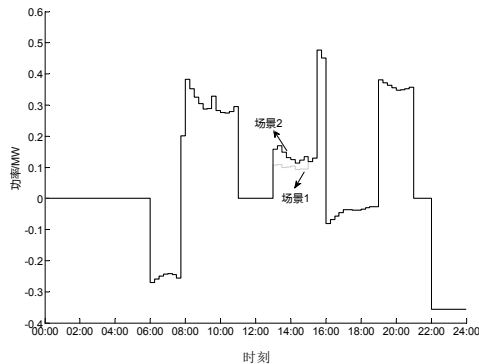


图 B2 场景 1 和 2 下 PESS 的有功功率曲线

Fig.B2 Active power curves of PESS under Scenario 1 and 2

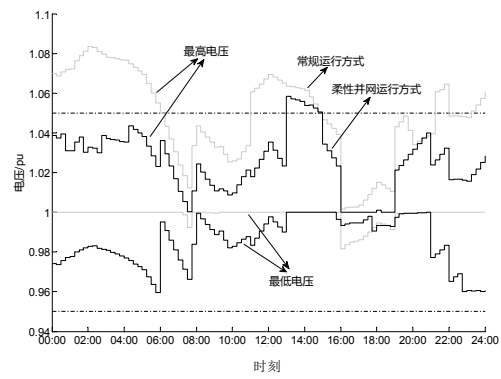


图 B3 场景 2 的系统电压
Fig.B3 System voltage under Scenario 2

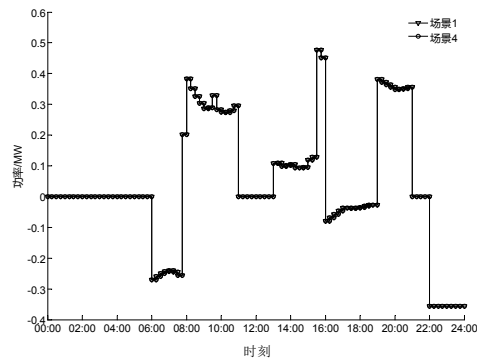


图 B4 场景 1 和 4 下 PESS 的有功功率曲线
Fig.B4 Active power curves of PESS under Scenario 1 and 4

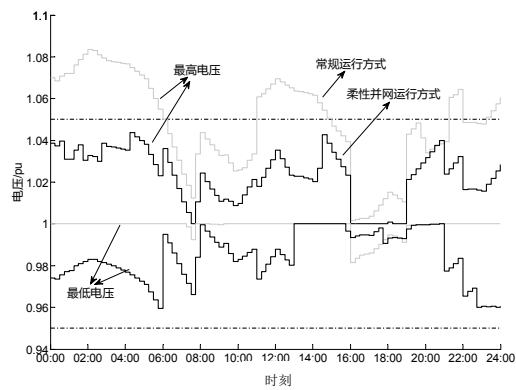


图 B5 场景 4 的系统电压
Fig.B5 System voltage under Scenario 4