

DOI: 10.7667/PSPC190278

含光储系统的增量配电网时段解耦动态拓展无功优化

吴国沛¹, 王武², 张勇军², 羿应棋², 曾顺奇¹

(1. 广州供电局有限公司, 广东 广州 510000; 2. 华南理工大学, 广东 广州 510640)

摘要: 从增量配电网安全运行及经济效益出发, 针对高渗透率分布式光伏接入配网引起的相关问题, 构建以系统有功损耗、电容器及变压器调节代价、储能调节代价综合最小为目标的时段解耦动态拓展无功优化模型。在传统无功优化的基础上增加储能有功调节能力和光伏无功调控能力, 将动态无功优化解耦为多时段静态无功优化, 采用灾变遗传算法求得含高渗透率光伏及储能的增量配网无功优化方案。仿真结果表明, 提出的时段解耦动态拓展无功优化模型能够提高增量配电网的无功优化效果, 在减少电网损耗、降低设备调节成本的同时, 兼顾电网电压运行的安全性。

关键词: 增量配电网; 无功优化; 储能; 光伏; 调节代价

Time decoupled dynamic extended reactive power optimization in incremental distribution network with photovoltaic-energy storage hybrid system

WU Guopei¹, WANG Wu², ZHANG Yongjun², YI Yingqi², ZENG Shunqi¹

(1. Guangzhou Power Supply Bureau Co. Ltd., Guangzhou 510000, China;

2. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Starting from the safe operation and economic benefit of the incremental distribution network and facing problems caused by high-permeability distributed photovoltaic access distribution networks, this paper puts forward a time decoupled dynamic extended reactive power optimization model, which aims to minimize the cost of power grid loss, capacitor and transformer regulation cost, and energy storage adjustment cost. Based on the traditional reactive power optimization model, the new model increases the power adjustment ability of energy storage and the reactive power adjustment ability of photovoltaic, decoupling dynamic reactive power optimization into multi-period static reactive power optimization. It uses the disaster genetic algorithm to obtain the reactive power optimization in incremental distribution network with photovoltaic-energy storage hybrid system and compare with other optimization method. Results show that proposed time decoupled dynamic extended reactive power optimization method can improve the effect of reactive optimization of incremental distribution network, reduce power grid loss and lower equipment adjusting cost, and consider the safety of power grid voltage operation.

This work is supported by Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 2017A030313304) and National Natural Science Foundation of China (No. 51777077).

Key words: incremental distribution network; reactive power optimization; energy storage system; photovoltaic; readjusting cost

0 引言

国家发改委、国家能源局发布《售电公司准入与退出管理办法》和《有序放开配电网业务管理办法》的通知, 进一步明确售电公司以及增量配网

管理办法, 通过吸引社会资本, 引入竞争和创新, 促进电力行业的进一步发展。增量配网包括新建增量配电网、混合所有制方式投资配电网增容扩建和电网企业存量资产外的存量配电网。根据《关于推进售电侧改革的实施意见》, 允许售电公司投资增量配网业务, 这些售电公司相比独立售电公司具有更多优势。而增量配网的无功优化调度对于售电公司来说将显得尤为重要。

基金项目: 广东省自然科学基金(2017A030313304); 国家自然科学基金(51777077)

近年来,传统能源的短缺以及电力市场逐步开放使包括可再生能源在内的分布式电源(Distributed Generator, DG)得到大量应用^[1-3]。然而,部分 DG 无法在配电网就地消纳,易发生潮流和电压越限等问题,如今已成为电力规划领域的挑战^[4-5]。储能系统(Energy Storage System, ESS)也成为分布式新能源发电接入和利用的有力支撑^[6-8]。若储能系统与光伏联合接入配电网,则储能可以对有功功率进行双向调节,有效缓解分布式光伏接入后的节点电压越限、设备过载等问题^[9]。特别是在各工业园区增量配电网陆续建成、增量配网市场稳步发展的背景下,在增量配网中加装光储联合发电系统,售电公司能灵活、自主地对光伏、储能进行调控,以达到最优经济效益。但高渗透率 DG 和 ESS 与传统无功设备的协调控制仍是亟待解决的问题。

考虑连续时间断面的动态无功优化是一个多约束、多变量、动态的混合整数二次规划问题。由于控制设备的动作约束以及相邻时刻设备动作的相互影响,造成动态无功优化的时间耦合问题。文献[10]根据确定的控制设备值及全时段控制约束,对控制设备各时段解耦,从而达到解耦优化的目的。文献[11]将控制设备的动作次数转变为调节代价计入目标函数中,在一定程度上解决了动态无功优化的时间耦合问题,并验证了从经济性上考虑的调节代价可以避免调节设备频繁操作,进而达到满足设备动作次数限制的效果。

针对无功优化中各控制设备的协调问题,文献[12]提出了一种基于状态的动态控制方法,用于协调配电网中现有的 DG 和电压调节设备。文献[13]在现有动态无功优化的基础上,提出一种改进的预动作表制定方法,对 DG 和电容进行协调调度。文献[14]以减小网损和电容器动作次数为目标,提出了 DG 与电容器协调的日前无功调度方法,针对无功功率源的不同输出特性,以动态微调的方法优化 DG 与补偿器的输出,达到无功优化的目的。文献[15]根据光照概率求取光伏输出功率的均值,将光伏系统的无功调节能力参与到配电网无功优化中。文献[16]引入极限理论计算新能源电机的无功可调容量,并用粒子群算法求解无功优化模型。文献[17]综合考虑了网损、电压水平、静态电压稳定性以及供电能力,提出一种多目标无功优化模型。上述文献在无功优化中均未考虑 ESS 接入配电网后与现有无功优化手段的协调控制问题。当 ESS 接入配电网后,动态无功优化的多设备协调能力、控制方式、约束条件都将发生变化,形成了新的挑战^[18-19]。

文献[20]综合考虑了 DG、电动汽车充放电和

ESS 运行的协调配合,构建多目标优化模型解决无功优化问题。文献[21]引入 ESS 的功率输出,采用遗传算法求取帕累托前沿,获得无功优化的最优折衷解。上述文献虽然引入 ESS 以解决无功优化的问题,但是没有考虑储能及各调节设备的调节代价对无功优化整体经济性带来的影响,同时,仅采用单断面的静态无功优化方法并不能有效反映 ESS 以及各无功调节设备在一天中动作的变化情况,从而无法考虑如何使 ESS 在优化周期中实现在始、末时刻的剩余容量保持平衡,以保证 ESS 的长期稳定运行。

针对以上问题,本文提出一种时段解耦的动态拓展无功优化模型,同时考虑 DG 和 ESS 接入增量配网对动态无功优化的影响,根据文献[22]中储能充放电的成本计算模型计算 ESS 调节代价,引入储能充放电平衡指标,以网损成本、电容器和变压器调节代价以及 ESS 调节代价综合最小为目标,通过确定控制设备的协调控制策略得到增量配网的动态无功优化调度方案。

1 动态无功优化的时段解耦模型

1.1 优化目标

本文所提出的模型采用时段解耦的方法,将以 24 时段总网损和总调节代价综合最小为目标转变为以各时段网损及调节代价最小为目标,把动态无功优化转化为多时段静态无功优化。

(1) 系统有功网损最小

有功损耗是考虑电网运行经济性的一项重要指标,适当调整系统中变压器和无功设备的状态及光储联合系统的有功、无功出力,可以改善系统的潮流分布,从而有效降低电网的有功损耗。其数学表达式为

$$P'_{\text{Loss}} = \sum_{i=1}^n V_i \sum_{j \in I} V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (1)$$

(2) 电容器及变压器调节代价最小

本文将电容器及变压器的动作约束转变为调节代价加入目标函数,较大的调节代价会增大目标函数数值,避免无功优化为了很小的降损效果做出较多设备调整的情况,相应地在优化过程中将朝着动作次数较小的方向优化,从经济性角度实现对电容器、分接头的动作次数频繁程度的约束。通常情况下,无功优化调度系统按每 15 min 启动计算和控制,考虑合理选择设备调节代价之后,电容器投切和变压器调挡的次数都将下降到日允许次数约束内,加上无功调整的间隔为 15 min,就可以避免设备频繁调节影响设备寿命和电网安全性的问题。因此,数学

模型中考虑调节代价后将可以采用静态无功优化的形式达到动态无功优化控制的效果, 显著降低了计算复杂度, 提升了控制实时性与有效性^[11]。

变压器调节代价为

$$C_T^t = C_{\text{TRAN}} \sum_{i=1}^{n_T} (\text{Tran}_i^t - \text{Tran}_i^{t-1}) \quad (2)$$

电容器调节代价为

$$C_C^t = C_{\text{CAP}} \sum_{j=1}^{n_Q} (\text{Cap}_j^t - \text{Cap}_j^{t-1}) \quad (3)$$

式中: C_{TRAN} 和 C_{CAP} 分别为变压器、电容器的单位调节代价; Tran_i^t 和 Cap_j^t 分别为 t 时刻第 i 台变压器抽头档位和第 j 台电容器投放组数; Cap_j^{t-1} 、 Tran_i^{t-1} 分别为 $t-1$ 时刻第 i 台变压器抽头档位和第 j 台电容器投放组数; n_T 、 n_Q 分别为变压器个数及电容器个数。

(3) 储能装置调节代价最小

储能采取与上述无功控制设备相同的处理方法, 考虑了储能运行时的调节代价, 在考虑储能调节成本的同时, 其在目标函数中产生的作用, 将可避免储能频繁充放电的情况。其公式如式(4)所示。

$$C_{\text{ESS}}^t = \sum_{i=1}^{n_E} C_{\text{MT}} (P_{C,i}^t + P_{D,i}^t) + C_{\text{CS},i} U_{S,i}^t (1 - U_{S,i}^{t-1}) \quad (4)$$

式中: C_{ESS}^t 为 t 时刻第 i 个储能装置的运行成本; C_{MT} 为储能装置维护成本系数; $P_{C,i}^t$ 、 $P_{D,i}^t$ 、 $U_{S,i}^t$ 分别为第 i 个储能装置在 t 时刻充、放电功率以及放电状态; n_E 为储能装置个数; C_{CS} 为储能装置折旧成本。

$$C_{\text{CS},i}^t = \frac{\eta_{\text{CS}}}{T_{\text{ESS}}} (C_P P_N + C_E E_N) \quad (5)$$

式中: η_{CS} 为折旧成本系数; P_N 、 E_N 为储能装置的功率上限和额定容量; C_P 和 C_E 为对应的安装成本系数; T_{ESS} 为蓄电池循环次数。令

$$C_{\text{ESS}}^t = \frac{C_{\text{ESS}}^t}{k \Delta t} \quad (6)$$

为以功率形式表示的储能装置调节代价, 使各目标函数值单位统一。其中, k 为电能单价; Δt 为优化单位时间。

综合令电网有功损耗最小、变压器及电容器调节代价最小、储能装置调节成本最小, 目标函数为

$$\min F^t = P_{\text{LOSS}}^t + C_C^t + C_T^t + C_{\text{ESS}}^t \quad (7)$$

该模型能使各时段的无功优化相互独立, 能够对各时段单独优化, 降低了计算的复杂性。

控制变量包括: 电容器的无功出力 Q_C , 变压器抽头档位 T_k , 储能装置有功出力 P_E 以及光伏发电单元的功率因素 λ_{PV} 。

1.2 约束条件

$$Q_{C_i, \min} < Q_{C_i} < Q_{C_i, \max} \quad i \in \Omega_C \quad (8)$$

$$T_{K_i, \min} < T_{K_i} < T_{K_i, \max} \quad i \in \Omega_T \quad (9)$$

$$\lambda_{\text{PV}_i, \min} \leq \lambda_{\text{PV}_i} \leq \lambda_{\text{PV}_i, \max} \quad i \in \Omega_{\text{PV}} \quad (10)$$

$$[V_{D_i}^t + \underline{P}_i^t] < V_{G_i}^t < [V_{D_i}^t + \bar{P}_i^t] \quad i \in \Omega_{\text{PV}} \quad (11)$$

式中: Ω_C 为电容器安装节点集合; Ω_T 为变压器节点集合; Ω_{PV} 为光伏系统节点集合; $Q_{C_i, \max}$ 、 $Q_{C_i, \min}$ 分别为第 i 台电容器装置补偿容量 Q_{C_i} 的上下限值; $T_{K_i, \max}$ 、 $T_{K_i, \min}$ 分别为第 i 台有载调压变压器抽头档位 T_{K_i} 的上下限值; $\lambda_{\text{PV}_i, \max}$ 、 $\lambda_{\text{PV}_i, \min}$ 为第 i 台光伏逆变器功率因素 λ_{PV_i} 上下限值; $V_{G_i}^t$ 为第 i 个光储联合系统在 t 时刻的总出力; $V_{D_i}^t$ 为第 i 台光伏设备在 t 时刻的有功出力; \bar{P}_i^t 、 \underline{P}_i^t 分别是储能在 t 时刻出力的上下限值, 其表达式如式(12)所示。

$$\begin{cases} \bar{P}_i^t = \min\left(\frac{E_{\max}}{\eta_{C,i} \Delta t}, \frac{\bar{E}_i - E_i^t}{\eta_{C,i} \Delta t}\right) \\ \underline{P}_i^t = \max\left(E_{\min} \frac{\eta_{D,i}}{\Delta t}, (E_i - E_i^t) \frac{\eta_{D,i}}{\Delta t}\right) \end{cases} \quad (12)$$

式中: \bar{E}_i 、 \underline{E}_i 分别是储能容量的上下限; E_{\max} 、 E_{\min} 分别表示储能装置自身充、放电的能量限制; $\eta_{C,i}$ 、 $\eta_{D,i}$ 表示充放电效率; E_i^t 表示储能装置剩余容量, 其计算方法为

$$E_i^t = E_i^{t-1} + (P_{C,i}^t \eta_{C,i} - \frac{P_{D,i}^t}{\eta_{D,i}}) \Delta t - E_{\text{loss}} (1 - U_{C,i}^t) (1 - U_{D,i}^t) \quad (13)$$

式中: $P_{C,i}^t \eta_{C,i}$ 、 $P_{D,i}^t / \eta_{D,i}$ 分别表示储能装置的充、放电至电网的功率; $U_{C,i}^t$ 、 $U_{D,i}^t$ 分别表示储能装置在 t 时刻的充、放电状态; E_{loss} 表示静置能量损耗。式(12)对储能各时刻充放电上下限约束的计算可以避免出现过充电、过放电的情况导致储能运行不可行的问题。

2 求解方法

本文使用灾变遗传算法求解含光储系统配电网的动态拓展无功优化, 以 Matlab 中的 Matpower 工具箱进行潮流计算, 通过多次寻优计算找到接近最优的结果。

考虑到增量配网中电压运行的安全性, 设置了电压越限风险指标作为惩罚项

$$V_{\text{LIM}} = \sum_{i=1}^n \frac{|V_i - \text{Sat}(V_i)|}{V_{i, \max} - V_{i, \min}} \quad (14)$$

式中: V_{LIM} 为电压越限风险指标; V_i 为节点 i 的电压幅值; $\text{Sat}(V_i)$ 为饱和函数。

$$Sat(V_i) = \begin{cases} V_{i,\min} > V_i < V_{i,\min} \\ V_i, V_{i,\min} \leq V_i \leq V_{i,\max} \\ V_{i,\max} > V_{i,\max} < V_i \end{cases} \quad (15)$$

同时，为了使储能装置在始末时刻剩余能量基本平衡，设置了储能充放电平衡指标作为惩罚项

$$E_{cd}^t = \sum_{i=1}^{n_E} E_{cd,i}^t \quad (16)$$

式中： $E_{cd,i}^t$ 为 t 时段第 i 个储能装置的充放电平衡指标； n_E 为配电网中储能装置的总个数； $E_{cd,i}^t$ 的计算公式为

$$E_{cd,i}^t = \begin{cases} E_i^t - E_i^1, & (E_i^t - E_i^1) > \varepsilon \\ 0, & (E_i^t - E_i^1) \leq \varepsilon \end{cases} \quad (17)$$

将电压越限风险指标以及储能充放电平衡指标作为惩罚项加入目标函数后得到构成扩展目标函数如式(18)所示。

$$\min F'' = P_{LOSS}^t + C_C^t + C_T^t + C_{ESS}^t + \lambda_V V_{LIM}^t + \lambda_E E_{cd}^t \quad (18)$$

式中： λ_V 、 λ_E 为惩罚因子； λ_V 为数值较大的正常数； λ_E 的数值随时间变化，具体表达式如式(19)。

$$\lambda_E = \begin{cases} 0, & t \leq t_1 \\ k_1 \cdot t^2, & t_1 < t \leq t_2 \\ k_2 \cdot t, & t_2 < t \leq T \end{cases} \quad (19)$$

且 $k_1 < k_2/t_2$ ，从而保证 λ_E 在整个仿真周期内连续且数值不断增大，即惩罚力度越来越强。

3 实例分析

本算例以某地区增量配电网为例，其接线图如图 1 所示，某日负荷率预测如图 2 所示。

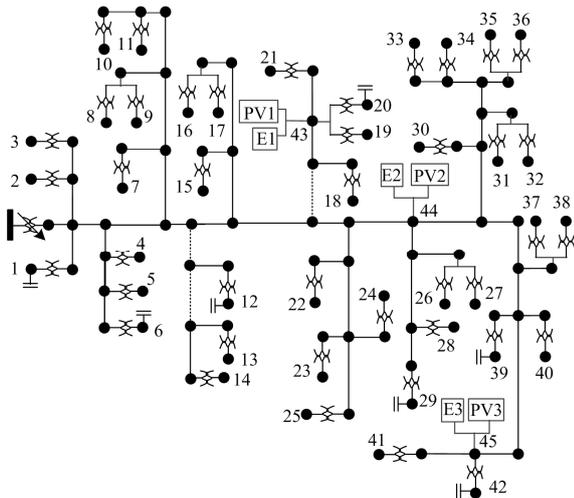


图 1 某地区增量配电网接线图

Fig. 1 Connection diagram of an incremental distribution network

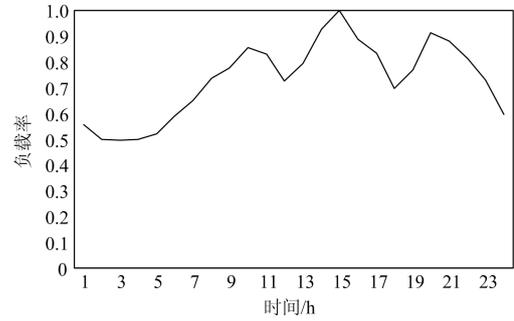


图 2 某日负荷预测

Fig. 2 Curves of load forecast

在节点 43、44 和 45 分别接入光储联合发电系统，设备配置及经济指标如表 1 所示。系统中有 1 台有载调压变压器 Tk，包含 17 个分接头 ($U_N \pm 8 \times 1.25\%$)，节点 1、6、12、20、29、39、42 处分别安装有可投切并联电容器组 C1~C7，单组容量分别为 135 kvar、72 kvar、160 kvar、90 kvar、90 kvar、72 kvar、36 kvar，组数均为 2 组；光伏 PV1、PV2、PV3 的最大有功出力分别为 3.2 MW、3 MW、2.8 MW，根据《光伏发电站接入电力系统技术规定》的标准要求^[23]，光伏并网逆变器功率因素的变化范围取值为滞后 0.95 到超前 0.95，本算例中光伏的出力预测曲线如图 3 所示。在实际应用中，对电容器、变压器操作时间间隔一般要求不小于 15 min，为了简化计算，本文所用方法的优化间隔为 1 h，满足无功优化对设备调整的最小时间要求。

表 1 设备配置及经济参数

Table 1 Devices configuration and economic parameters

参数	数值	参数	数值
E_N	3 MWh	C_p	667 元/kW
P_N	800 kW	C_E	1 200 元/kWh
η_c	85%	C_{MT}	0.01 元/kWh
η_d	85%	η_{CS}	0.1%
E_{loss}	2 kWh	k	0.8 元/kWh
\bar{E}_i	0.6 MWh	C_{TRAN}	3 kW/次
\bar{E}_i	3 MWh	C_{CAP}	2 kW/次

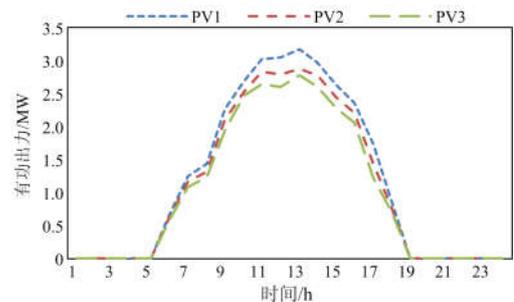


图 3 光伏出力预测曲线

Fig. 3 Curves of PV active power forecast

设置 3 组对照优化方法, 其中方法 1 的控制变量为 Q_C 和 T_k ; 方法 2 的控制变量为 Q_C 、 T_k 和 λ_{PV} ; 方法 3 的控制变量为 Q_C 、 T_k 、 λ_{PV} 和 P_{ES} , 即为本文动态拓展无功优化模型。通过灾变遗传算法, 得出不同方法各时段目标函数值及网损如图 4 及图 5 所示。

由图 4 及图 5 可知, 采用本文方法对电网进行优化在凌晨及午时时段能够显著提高优化效果。对 24 个时段的计算结果求和, 将各方法优化后的总目标函数值及总网损进行比较, 结果如表 2 所示。

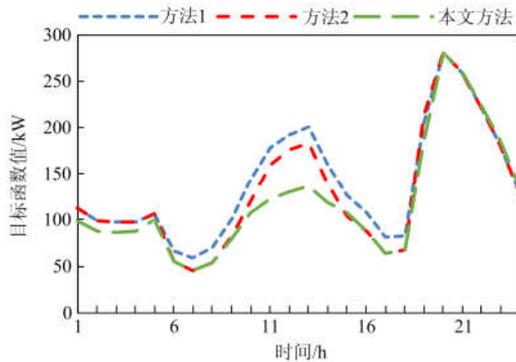


图 4 目标函数值

Fig. 4 Objective function value

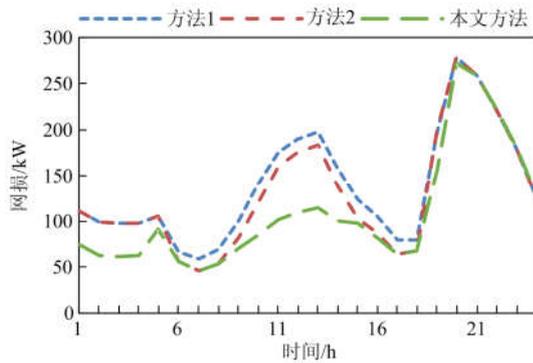


图 5 电网损耗

Fig. 5 Power grid losses

表 2 无功优化结果对比

Table 2 Comparison of reactive optimization result

方法	总目标函数值/MW	改善比率	总网损/MW	改善比率
1	3.361 4	—	3.318 4	—
2	3.163 4	5.89%	3.126 4	5.79%
3	2.896 3	13.84%	2.669 3	23.4%

由表 2 可知, 本文方法与其他方法的优化结果相比, 在总优化目标以及电网损耗方面优化效果均有较大的提高。由此可见, 考虑光储联合系统的拓展无功优化, 将储能装置的有功出力及光伏发电单元的功率因数作为拓展控制变量, 在配电网的经济

运行中能够取得更好的效果。

为了验证动态优化方案的合理性, 这里与静态优化进行比较。此处静态优化指寻优空间中未受各设备调节代价的约束, 且除了储能容量之外, 各时刻之间的优化状态不存在相互影响, 同时该静态优化方法不考虑储能充放电平衡约束。通过优化后, 其与本文方法优化后的储能剩余容量分别如图 6 及图 7 所示, 由仿真结果可知, 储能的剩余容量始终处于合理范围内, 并无过充电、过放电的情况发生。

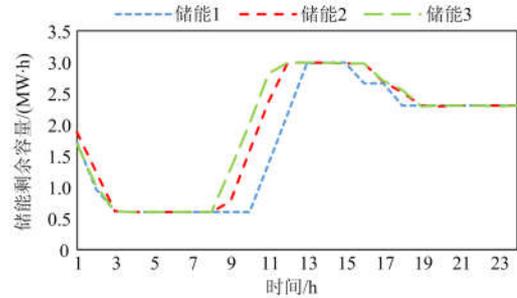


图 6 本文方法储能剩余容量

Fig. 6 Residual ESS capacity of the proposed method

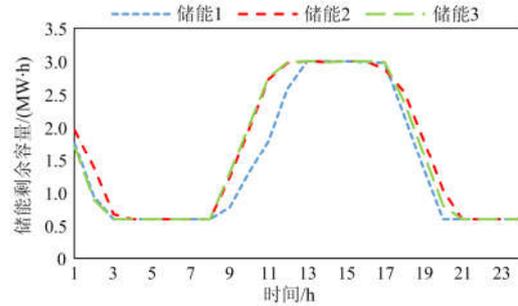


图 7 静态优化储能剩余容量

Fig. 7 Residual ESS capacity of static optimization method

表 3 显示了本文方法与静态优化方法的计算结果的变压器抽头和电容器组在一个优化周期内累计动作次数比较, 由该表可知, 相对于静态优化, 动态优化的变压器抽头、电容器组动作次数均有显著减小, 日调节次数最多的设备 C4 的投切次数仅为 4 次, 处在允许次数范围内。

表 3 控制设备累计动作次数

Table 3 Comparison of operation times of control devices

设备	本文方法	静态优化方法
Tk	3	8
C1	2	4
C2	0	7
C3	2	6
C4	4	5
C5	3	10
C6	1	5
C7	0	8

如果对静态优化结果加上各设备调节代价，则全天的目标函数值总和将达到 2 774.5 kW，如表 4 所示，其中方法 A 为本文方法，方法 B 为静态优化方法。

表 4 优化结果比较

Table 4 Comparison of optimization results

方法	网损/kW	抽头及无功总动作次数	抽头及无功总调节代价	储能总调节代价	目标函数总和
A	2 669.3	15	3	194.1	2 896.3
B	2 400.9	53	114	259.6	2 774.5

综合来看，通过静态无功优化得到的网损及目标函数总和小于动态优化的结果，但各调节设备操作频繁，不利于设备长期使用。同时，由于没有考虑储能充放电平衡约束，采用静态优化时，末时刻储能装置剩余能量已达最大放电深度，与初始容量相差很大，其对储能的使用缺少可持续性，不利于长期规划。

4 结论

(1) PV 并网逆变器具有良好的无功调节能力，其无功输出可以有效减少功率损耗，且有效利用了光伏逆变器的剩余容量，在增量配网中加装 PV 可以提高经济效益。

(2) ESS 可以提高配电网的调节能力。在安装了光储联合系统的增量配电网中，ESS 可以提供有功输出弥补光伏发电的不足，并能吸收过多的光伏有功出力。虽然这可能增加设备的运行费用，但它在总体经济性能上是优越的。

(3) 光储联合发电系统的安装拓展了增量配电网中的可控变量，提高了配网无功、有功的调控能力，其与传统无功调节设备的协调控制将提高增量配电网的节能降损能力。

参考文献

[1] 尤毅, 刘东, 于文鹏, 等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 10-16.
YOU Yi, LIU Dong, YU Wenpeng, et al. Technology and its trends of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10-16.

[2] ALIREZA S, MORTEZA A, MEHDI E. A probabilistic modeling of photo voltaic modules and wind power generation impact on distribution networks[J]. IEEE Systems Journal, 2012, 6(2): 254-259.

[3] 王满商, 李正明, 汪洋. 考虑电动汽车不确定性因素的配电网分布式电源优化布置[J]. 电力系统保护与控

制, 2019, 47(1): 67-72.

WANG Manshang, LI Zhengming, WANG Yang. Distribution network distributed power supply configuration considering the uncertainties of electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 67-72.

[4] 裴哲义, 丁杰, 李晨, 等. 分布式光伏并网问题分析与建议[J]. 中国电力, 2018, 51(10): 80-87.
PEI Zheyi, DING Jie, LI Chen, et al. Analysis and suggestion for distributed photovoltaic generation[J]. Electric Power, 2018, 51(10): 80-87.

[5] 金炜, 李宗, 葛斐, 等. 可再生能源高渗透率区域“网-源-储-荷”协调规划案例分析[J]. 中国电力, 2017, 50(10): 153-158.
JIN Wei, LI Zong, GE Fei, et al. Research on “grid-generation-storage-load” coordinative planning in high renewable energy penetration region-case analysis of Anhui Jinzhai[J]. Electric Power, 2017, 50(10): 153-158.

[6] 李建林, 田立亭, 来小康. 能源互联网背景下的电力储能技术展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 15-25.
LI Jianlin, TIAN Liting, LAI Xiaokang. Outlook of electrical energy technologies under energy internet background[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 15-25.

[7] ZHOU L, ZHANG Y, LIN X, et al. Optimal sizing of PV and BESS for a smart household considering different price mechanisms[J]. IEEE Access, 2018, 6(1): 41050-41059.

[8] 周檬, 贾亚雷. 基于改进粒子群优化算法的先进绝热压缩空气储能系统参数优化[J]. 热力发电, 2018, 47(1): 94-99.
ZHOU Meng, JIA Yalei. Parameter optimization for compressed air energy storage system based on particle swarm optimization[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(1): 94-99.

[9] 黄碧斌, 李琼慧. 储能支撑大规模分布式光伏接入的价值评估[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 88-93.
HUANG Bibin, LI Qionghui. Value assessment for energy storage in supporting large-scale integration of distributed PVs[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 88-93.

[10] 蔡昌春, 丁晓群, 王宽, 等. 动态无功优化的简化方法及实现[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(5): 43-46.
CAI Changchun, DING Xiaoqun, WANG Kuan, et al. Simplified method of dynamic reactive power optimization and its implementation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(5): 43-46.

[11] ZHANG Y, REN Z. Optimal reactive power dispatch considering costs of adjusting the control devices[J].

- IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1349-1356.
- [12] ZHANG L, TARLOCHAN S. New dynamic voltage and reactive power control method for distribution networks with dg integration[C] // 2014 IEEE Electrical Power and Energy Conference, November 12-14, 2014, Calgary, Canada: 190-195.
- [13] 刘公博, 颜文涛, 张文斌, 等. 含分布式电源的配电网动态无功优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 49-54.
LIU Gongbo, YAN Wentao, ZHANG Wenbin, et al. Optimization and dispatching method of dynamic reactive power in distribution network with distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 49-54.
- [14] ZHANG L, TANG W, LIANG J, et al. Coordinated day-ahead reactive power dispatch in distribution network based on real power forecast errors[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 2472-2480.
- [15] 王骏, 丁晓群, 孙士云, 等. 考虑光照概率性的含光伏发电系统的配电网无功优化[J]. 广东电力, 2017, 30(1): 103-107, 137.
WANG Jun, DING Xiaoqun, SUN Shiyun, et al. Reactive power optimization for power distribution network with photovoltaic generation system considering illumination probability[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(1): 103-107, 137.
- [16] 代琴, 李军, 邱森, 等. 基于极限理论的配电网概率场景无功优化[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(5): 137-141.
DAI Qin, LI Jun, QIU Sen, et al. Probability scene reactive power optimization on distribution network based on limit theory[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(5): 137-141.
- [17] 蔡博, 黄少锋. 基于多目标粒子群算法的高维多目标无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 77-84.
CAI Bo, HUANG Shaofeng. Multi-objective reactive power optimization based on the multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 77-84.
- [18] 韩笑, 周明, 李庚银. 计及储能和空调负荷的主动配电网多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 14-23.
HAN Xiao, ZHOU Ming, LI Gengyin. Multi-objective optimal dispatching of active distribution networks considering energy storage systems and air-conditioning loads[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 14-23.
- [19] SINGH M. Protection coordination in distribution systems with and without distributed energy resources-a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 294-310. DOI: 10.1186/s41601-017-0061-1.
- [20] 陈嘉威, 吴杰康, 郭清元, 等. 考虑 DG、DS 和 EV 协同运行的配电网无功优化方法[J]. 电气工程学报, 2017, 12(8): 42-49.
CHEN Jiawei, WU Jiekang, GUO Qingyuan, et al. Reactive power optimization method for distribution network considering DG, DS and EV cooperative operation[J]. Journal of Electrical Engineering, 2017, 12(8): 42-49.
- [21] 杨雨瑶, 张勇军, 林国营, 等. 含光储联合发电系统的配电网双目标拓展无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 39-46.
YANG Yuyao, ZHANG Yongjun, LIN Guoying, et al. Double-objective extended reactive power optimization in distribution network with photovoltaic-energy storage hybrid systems[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 39-46.
- [22] 赵波, 薛美东, 陈荣柱, 等. 高可再生能源渗透率下考虑预测误差的微电网经济调度模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(7): 1-8.
ZHAO Bo, XUE Meidong, CHEN Rongzhu, et al. An economic dispatch model for microgrid with high renewable energy resource penetration considering forecast errors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(7): 1-8.
- [23] 中国电力企业联合会. 光伏电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
China Electricity Council. Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system: GB/T 19964—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.

收稿日期: 2018-03-31; 修回日期: 2018-08-25

作者简介:

吴国沛(1975—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力系统运行与管理; Email: wuguopei@guangzhou.csg.cn

王武(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为可再生能源发电与电力系统优化运行; E-mail: 277126159@qq.com

张勇军(1973—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统无功优化与电压控制、互联网+智慧能源等。E-mail: zhangjun@scut.edu.cn

(编辑 张爱琴)