

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181196

# 含高渗透分布式光伏的增量配电网日前优化调度方法

刘畅<sup>1</sup>, 郭力<sup>1</sup>, 柴园园<sup>1</sup>, 高爽<sup>1</sup>, 盛万兴<sup>2</sup>, 徐斌<sup>3</sup>

(1. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192;  
3. 国网安徽省电力公司, 安徽 合肥 230061)

**摘要:** 针对装有高渗透率分布式光伏和用户侧储能的增量配电网日前调度问题, 综合考虑配电站有载调压变压器抽头动作、静止无功补偿装置投切、用户侧光伏变流器无功补偿和储能装置充放电等调控手段, 基于支路潮流模型建立了以增量配电网运营商日前运行总费用最小为目标的优化调度模型。由于潮流约束中存在电压平方项和电流平方项, 目标函数的网损部分存在电流平方项, 所以原模型是二次约束二次规划模型(Quadratically Constrained Quadratic Programming, QCQP)。通过线性化和二阶锥松弛, 将原始 NP 难问题转化为混合整数二阶锥规划模型(Mixed Integer Second Order Cone Programming, MISOCP)。为了保证二阶锥松弛精度, 提出计算配电网最优潮流的多时段割平面约束, 将其加入到每次迭代优化中求解, 直至松弛误差减小到预定范围。最后用实际算例验证了调度方法的有效性。

**关键词:** 分布式光伏; 用户侧储能; 增量配电网; 混合整数二阶锥规划; 多时段割平面约束

## Day-ahead optimal scheduling method for incremental distribution network with high penetration of distributed photovoltaic

LU Chang<sup>1</sup>, GUO Li<sup>1</sup>, CHAI Yuanyuan<sup>1</sup>, GAO Shuang<sup>1</sup>, SHENG Wanxing<sup>2</sup>, XU Bin<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory for Smart Grid of the Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin 300072, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. State Grid Anhui Electric Power Company, Hefei 230061, China)

**Abstract:** Aimed at the day-ahead scheduling problem for incremental distribution network with high penetration of distributed photovoltaic and energy storage system at user side, an optimal scheduling model is established based on branch flow model. The model minimizes the total operating cost of the incremental distribution network operator and takes into account the adjustment of on load tap changer, static var compensator, reactive power control of the PV converter and charge and discharge of the energy storage system. The original model is a Quadratically Constrained Quadratic Programming (QCQP) due to voltage square and current square in the power flow constraints and current square in the loss part of the objective function. By linearization and second order cone relaxation, the original NP hard problem is transformed into a Mixed Integer Second Order Cone Programming (MISOCP). In order to ensure the precision of cone relaxation, a multi-period cutting plane constraint is proposed to calculate the optimal power flow in the distribution network, and it is added to each iterative optimization until cone relaxation error is reduced to a predetermined range. Finally, the effectiveness of the proposed scheduling method is verified by a simulation example in a practical project.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900400) "Key Technologies and Demonstration for Grid-connected Consumption of distributed Renewable Energy Generation Cluster".

**Key words:** distributed photovoltaic; energy storage system of user side; incremental distribution network; mixed integer second order cone programming; multi-period cutting plane constraint

## 0 引言

随着《中共中央国务院关于进一步深化电力体

制改革的若干意见》和《有序放开配电网业务管理办法》等的颁布, 国家逐步向符合条件的市场主体放开增量配电投资业务<sup>[1]</sup>。增量配电网统一规划管理, 既可以由上级配电网集中供电, 也可以由内部分布式电源和储能装置互补供电, 从而提高自用电比例, 调节与大电网接口的电量实现运行费用最小。

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900400)  
“分布式可再生能源发电集群并网消纳关键技术及示范”

为了降低购电成本, 增量配电网运营商装设的光伏容量较大, 但是在光伏出力较大而负荷较小时光伏呈现高渗透率接入的场景, 此时配电网容易发生沿馈线功率倒送, 甚至出现电压超出规定上限的问题<sup>[2]</sup>。文献[3]提出分布式光伏就地自适应电压控制策略, 文献[4]考虑光伏变流器功率因数随有功输出变化和无功输出随并网点电压变化等调压措施, 文献[5]提出一种基于PQ-QV-PV节点转换的光储输出功率主动控制方法。上述文献只调节本地光伏控制量, 调压效果有限, 所以需要建立包含光伏单元、有载调压变压器、无功补偿装置、储能装置等的综合优化调度模型。由于抽头档位、电容器组数等整数变量以及电压和功率注入的二次关系, 这一模型实际上是求解配电网最优潮流的混合整数非凸非线性优化问题(Mixed Integer Nonconvex Nonlinear Optimization Model, MINNLP)<sup>[6]</sup>。此类问题可以用人工智能算法求解, 如人工蜂群算法<sup>[7]</sup>、遗传算法<sup>[8]</sup>、粒子群算法<sup>[9-11]</sup>等, 但是求解速度较慢, 得到的大多是非最优解, 无法实现有效精确调控。

在用确定性方法进行求解方面, 文献[12]依据母线注入模型(Bus Injection Model, BIM)的直角坐标形式, 通过半定松弛将原始问题转化为半定规划(Semidefinite Programming, SDP), 用原始对偶内点法(Primal Dual Interior Point Method, PDIPM)求解。文献[13]提出网络最优化分析的支路潮流模型(Branch Flow Model, BFM), 通过两步松弛将原问题转化为二阶锥规划(Second-order Cone Programming, SOCP)进行求解, 并证明负荷无上限约束时辐射状配电网可以得到全局最优解, 相比SDP中的半正定矩阵更直观。文献[14]证明了针对放射状网络BIM和BFM两种数学模型是等效的, 且BFM有更好的数值稳定性。文献[15]采用无功补偿装置和光伏变流器的无功控制及网络重构, 得到了配电网无功优化和网络重构的凸模型。文献[16]通过日前多时段优化, 得到了分布式电源、无功补偿装置和储能装置等的动作时刻和投运容量。文献[17]增加了配电网重构、需求响应、综合负荷等模型, 得到了主动配电网动态最优潮流, 为主动配电网日前调度和实时运行等提供了依据。

然而, 二阶锥松弛(Second-order Cone Relaxation, SOCR)带来了松弛精确度的问题。文献[15-17]之所以能够得到精确解, 是因为目标函数多为网损最小, 即使加入其他目标后光伏功率渗透率也较低, 能够满足锥松弛的准确性条件<sup>[18]</sup>: 不严格满足线路两端有功和无功功率注入约束, 不严格满足电压上限约束, 线路两端的电压相角差充分小。这些条件表现

在目标函数上则可表述为目标函数是支路电流的严格增函数时 SOCR 是精确的。这一论断限制了用 SOCP 求解优化问题的适用性。面对实际问题中各种各样的优化目标, 需要改进 SOCR 来获得有效解。文献[19]提出增加割平面的方法保证 SOCR 的准确性, 文献[20]在此基础上增加了叶支路割平面。但上述文献只考虑了单时刻控制时网损和有功削减的相互影响, 缺乏对变压器抽头档位等整数变量和多时段优化下割平面形式的研究。

本文针对新型供电交易模式下增量配电网接入高渗透率分布式光伏和用户侧储能引起的内部调度问题, 综合考虑了光伏变流器无功补偿、配电站无功补偿装置投切、有载调压变压器抽头动作和用户侧储能装置充放电等调控手段。首先, 基于 BFM 建立了以日前运行总费用最小为优化目标的增量配电网多时段 MINNLP 优化调度模型。然后, 通过对目标函数和约束条件进行线性化和锥松弛, 将 NP 难的 QCQP 转化为 MISOCP。为了保证松弛精确性, 提出计算配电网最优潮流的多时段割平面约束, 迭代更新后将其加入到下一轮优化中求解, 直至松弛误差减小到预定范围。最后以实际案例验证了上述方法的有效性。

## 1 优化调度模型

高渗透率分布式光伏和用户侧储能装置接入后, 增量配电网仍以辐射状方式运行, 如图 1 所示。

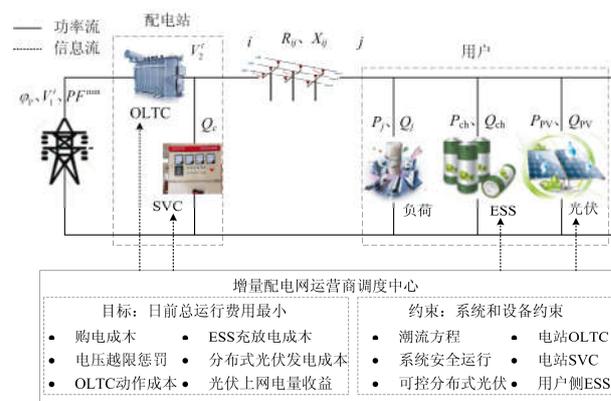


图 1 增量配电网模型

Fig. 1 Model of incremental distribution network

### 1.1 目标函数

分布式光伏和用户侧储能等全部由增量配电网运营商投资, 所以增量配电网调度问题的目标函数是最小化运营商总运行费用。总运行费用为成本减去收益, 运行成本包括购电成本  $f_b$ 、电压越限惩罚成本  $f_p$ 、配电站抽头动作成本  $f_c$ 、用户侧储能装

置充放电成本  $f_x$ ，而收益为运营商向配电商售电的光伏上网电量收益  $f_s$ 。

$$\min f = f_b + f_p + f_c + f_x - f_s \quad (1a)$$

$$f_b = \sum_{t=1}^{24} c_b^t P_{\text{buy}}^t \quad (1b)$$

式中： $t$  表示调控时刻； $c_b^t$  表示时刻  $t$  大电网的分时电价； $P_{\text{buy}}^t$  表示时刻  $t$  从配电商购买的电量。

$$f_s = c_s \sum_{t=1}^{24} P_{\text{sell}}^t \quad (1c)$$

式中： $c_s$  表示光伏上网电价； $P_{\text{sell}}^t$  表示时刻  $t$  分布式光伏的上网电量，即向配电商卖出的电量。

考虑到可能在部分场景下所有调控手段都采用后仍存在馈线电压越限，所以电压上下限不以约束条件表示，而采用浴盆曲线函数表示电压越限后的惩罚函数。

$$f_p = \sum_{t=1}^{24} \left( \frac{1}{|1 - U_{\text{th}}|} |1 - U_j^t| \right)^\alpha, \alpha > 1 \quad (1d)$$

式中： $U_{\text{th}}$  为电压控制阈值； $U_j^t$  表示时刻  $t$  节点  $j$  的电压； $\alpha$  为惩罚指数， $\alpha$  越大，电压越限时惩罚成本增大越剧烈。

调节抽头档位可以改变配电变压器二次侧电压从而改变配电网整体电压水平，但是抽头在整个使用寿命内动作总次数有限，频繁动作会降低使用寿命，所以在调度周期内要最小化抽头动作次数以降低成本。

$$f_c = c_{\text{tap}} \sum_{t=1}^{24} |N_u^t - N_u^{t-1}| \quad (1e)$$

式中： $c_{\text{tap}}$  表示每次调节抽头的成本； $N_u^t$  表示时刻  $t$  配电站变压器抽头档位。

用户侧储能充放电策略，一方面利用电价差降低成本，另一方面在光伏功率渗透率较高时保证馈线电压在安全范围内不越限，充放电成本用储能的投资成本和充放电次数折算表示。

$$f_x = c_{\text{ch}} \sum_{t=1}^{24} \sum_{j \in N} P_{\text{chj}}^t \quad (1f)$$

式中： $N$  表示增量配电网中的节点总数； $c_{\text{ch}}$  表示储能装置的度电成本； $P_{\text{chj}}^t$  表示时刻  $t$  节点  $j$  的储能装置充电功率。

增量配电网运营商的运行成本除了上述目标函数中包含的成本以外，还包括分布式光伏发电成本。由于本文的调度架构不涉及光伏出力的削减等控制，所以这部分成本根据预测值设定为常量，不体

现在目标函数中。

$$f_{\text{PV}} = (c_c - c_{\text{sub}}) \sum_{t=1}^{24} \sum_{j \in N} P_{\text{Gj}}^t \quad (2)$$

式中： $c_c$  表示光伏发电的度电成本； $c_{\text{sub}}$  表示光伏补贴电价； $P_{\text{Gj}}^t$  表示时刻  $t$  节点  $j$  光伏的有功功率。

## 1.2 约束条件

约束条件既包含对增量配电网潮流分析的通用约束条件，也包含新型供电交易模式下高渗透率分布式光伏接入后各种调控手段的运行约束条件。调控约束既包含静态约束，也包含因时序特性而相互耦合的动态约束。

### 1) 潮流方程约束

基于文献[13]的 BFM 模型，建立配电网潮流方程约束(3)。

$$\sum_{i:i \rightarrow j} [P_{ij}^t - R_{ij} (I_{ij}^t)^2] - P_j^t = \sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk}^t \quad (3a)$$

$$\sum_{i:i \rightarrow j} [Q_{ij}^t - X_{ij} (I_{ij}^t)^2] - Q_j^t = \sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk}^t \quad (3b)$$

$$(U_j^t)^2 = (U_i^t)^2 - 2(R_{ij} P_{ij}^t + X_{ij} Q_{ij}^t) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) (I_{ij}^t)^2 \quad (3c)$$

$$(I_{ij}^t)^2 = \frac{(P_{ij}^t)^2 + (Q_{ij}^t)^2}{(U_i^t)^2} \quad (3d)$$

$$P_j^t = P_{\text{Lj}}^t - P_{\text{Gj}}^t + P_{\text{chj}}^t - P_{\text{disj}}^t \quad (3e)$$

$$Q_j^t = \begin{cases} Q_{\text{Lj}}^t - Q_{\text{Gj}}^t, & j \neq 2 \\ -Q_{\text{SVC}}, & j = 2 \end{cases} \quad (3f)$$

式中： $R_{ij}$  和  $X_{ij}$  表示支路  $ij$  的电阻值和电抗值； $P_{ij}^t$  和  $Q_{ij}^t$  表示时刻  $t$  从节点  $i$  到节点  $j$  传输的有功和无功功率； $P_j^t$  和  $Q_j^t$  表示时刻  $t$  节点  $j$  净负荷的有功和无功功率； $I_{ij}^t$  表示时刻  $t$  支路  $ij$  的电流； $U_i^t$  表示时刻  $t$  节点  $i$  的电压； $Q_{\text{Gj}}^t$  表示时刻  $t$  节点  $j$  光伏的无功功率； $P_{\text{Lj}}^t$  和  $Q_{\text{Lj}}^t$  表示时刻  $t$  节点  $j$  负荷的有功和无功功率； $P_{\text{disj}}^t$  表示时刻  $t$  节点  $j$  的储能放电功率； $Q_{\text{SVC}}^t$  表示时刻  $t$  的无功装置补偿容量。

### 2) 系统运行约束

$$Q_{12}^t \leq |P_{12}^t| \tan \alpha \quad (4a)$$

$$P_{12}^{\min} \leq P_{12}^t \leq P_{12}^{\max} \quad (4b)$$

$$Q_{12}^{\min} \leq Q_{12}^t \leq Q_{12}^{\max} \quad (4c)$$

$$P_{\text{buy}}^t = \begin{cases} P_{12}^t, & P_{12}^t \geq 0 \\ 0, & P_{12}^t < 0 \end{cases} \quad (4d)$$

$$P_{\text{sell}}^t = \begin{cases} 0, & P_{12}^t \geq 0 \\ -P_{12}^t, & P_{12}^t < 0 \end{cases} \quad (4e)$$

式中:  $P_{12}^t$  表示时刻  $t$  增量配电网变电站与大电网接口的传输功率, 购电时取值为正, 售电时取值为负;  $\alpha = \arccos PF_1^{\min}$  表示变电站变压器一次侧的最小功率因数  $PF_1^{\min}$  限制;  $P_{12}^{\max}$  和  $P_{12}^{\min}$  表示有功功率传输量的上下限值;  $Q_{12}^{\max}$  和  $Q_{12}^{\min}$  表示无功功率传输量的上下限值。

3) 分布式光伏运行约束

$$Q_{Gj}^t = (P_{Gj}^t - P_{ctj}^t) \tan \theta \quad (5)$$

式中,  $\theta = \arccos PF_{pv}^{\min}$  表示光伏输出功率的最小功率因数  $PF_{pv}^{\min}$  限制。

4) 有载调压变压器约束

$$U_2^t = \frac{1.05}{1 + N_u^t U^{\text{step}}} \quad (6a)$$

$$\underline{N}_u \leq N_u^t \leq \overline{N}_u \quad (6b)$$

$$\sum_{t=1}^{24} |N_u^t - N_u^{t-1}| < N_u^{\text{total}} \quad (6c)$$

式中:  $\underline{N}_u$  和  $\overline{N}_u$  分别表示变压器抽头档位的下限和上限;  $U^{\text{step}}$  表示电压最小调节量;  $U_2^t$  表示时刻  $t$  变压器二次侧出口电压标幺值;  $N_u^{\text{total}}$  表示一天内抽头动作次数限制。

5) 静止无功补偿装置约束

$$Q_{\text{SVC}}^{\min} \leq Q_{\text{SVC}}^t \leq Q_{\text{SVC}}^{\max} \quad (7)$$

式中,  $Q_{\text{SVC}}^{\min}$  和  $Q_{\text{SVC}}^{\max}$  表示静止无功补偿装置的最小和最大补偿容量。

6) 分布式储能装置约束

$$0 \leq P_{\text{chj}}^t \leq \max(P_{Gj}^t, P_{\text{chj}}^{\max}) \eta_{\text{ch}} \mu_{\text{chj}}^t \quad (8a)$$

$$0 \leq P_{\text{disj}}^t \leq P_{\text{disj}}^{\max} \eta_{\text{dis}} \mu_{\text{disj}}^t \quad (8b)$$

$$\mu_{\text{chj}}^t + \mu_{\text{disj}}^t \leq 1 \quad (8c)$$

$$E_j^t = E_j^{t-1} + P_{\text{chj}}^t - P_{\text{disj}}^t \quad (8d)$$

$$E_j^{\min} SOC_{\text{bat}}^{\min} \leq E_j^t \leq E_j^{\max} SOC_{\text{bat}}^{\max} \quad (8e)$$

$$\sum_{t=1}^{24} (P_{\text{chj}}^t - P_{\text{disj}}^t) = 0 \quad (8f)$$

式中:  $P_{\text{chj}}^{\max}$  和  $P_{\text{disj}}^{\max}$  分别表示节点  $j$  的储能充电和放电功率最大值;  $\eta_{\text{ch}}$  和  $\eta_{\text{dis}}$  分别表示储能充电和放电效率; 逻辑变量  $\mu_{\text{chj}}^t$  和  $\mu_{\text{disj}}^t$  分别表示节点  $j$  的储能充电和放电标志;  $E_j^t$  表示时刻  $t$  节点  $j$  的储能电量;  $E_j^{\max}$  和  $E_j^{\min}$  分别表示节点  $j$  的储能电量最大值和最

小值;  $SOC_{\text{bat}}^{\max}$  和  $SOC_{\text{bat}}^{\min}$  分别表示节点  $j$  的储能电量限制的最大和最小百分比。

## 2 模型转化求解算法

上述模型为 NP 难的混合整数非凸非线性 QCQP 问题, 非线性是由电压的平方项和负二次项、抽头档位的绝对值项等导致的, 非凸性是由电压电流乘积项等导致的。通过对目标函数和约束条件进行线性化和锥松弛, 能将其转化为 MISOCP, 进而可以用优化算法包在多项式时间内完成求解。

电压惩罚成本函数(1d)可线性化为

$$f_p = M \cdot U_{\text{dvt}} \quad (9a)$$

$$U_{\text{dvt}} \geq u_i^t - U_{\text{thmax}}^2 \quad (9b)$$

$$U_{\text{dvt}} \geq U_{\text{thmin}}^2 - u_i^t \quad (9c)$$

$$U_{\text{dvt}} \geq 0 \quad (9d)$$

式中:  $U_{\text{dvt}}$  表示电压越限惩罚项;  $u_i^t$  表示时刻  $t$  节点  $i$  电压的平方;  $M$  为一个很大的常数惩罚因子, 电压越限程度越大, 电压惩罚成本函数也越大。

通过变量替换将电压电流的平方项 ( $U_i^t$ )<sup>2</sup> 和 ( $I_{ij}^t$ )<sup>2</sup> 转化为线性项  $u_i^t$  和  $l_{ij}^t$ , 则含平方项的式(3a)一式(3c)可转化为

$$\sum_{i:i \rightarrow j} [P_{ij}^t - R_{ij} l_{ij}^t] - P_j^t = \sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk}^t \quad (10a)$$

$$\sum_{i:i \rightarrow j} [Q_{ij}^t - X_{ij} l_{ij}^t] - Q_j^t = \sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk}^t \quad (10b)$$

$$u_j^t = u_i^t - 2(R_{ij} P_{ij}^t + X_{ij} Q_{ij}^t) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) l_{ij}^t \quad (10c)$$

将二次等式约束(3d)进行 SOCR 转化, 松弛为不等式约束(11a), 可以写成电压电流功率间关系的旋转二阶锥约束形式, 如式(11b)所示。

$$(P_{ij}^t)^2 + (Q_{ij}^t)^2 \leq l_{ij}^t \cdot u_i^t \quad (11a)$$

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{ij}^t \\ 2Q_{ij}^t \\ u_i^t - l_{ij}^t \end{array} \right\| \leq u_i^t + l_{ij}^t \quad (11b)$$

锥松弛精度由电流平方向量误差的无穷范数表示

$$gap = \max_t \left\| l_{ij}^t - \frac{(P_{ij}^t)^2 + (Q_{ij}^t)^2}{u_i^t} \right\|_{\infty} \quad (12)$$

含绝对值项的调控成本(1a)可以改写为

$$f = f_b + M \cdot U_{\text{dvt}} + c_{\text{tap}} \cdot \sum_{t=1}^{24} (N_{u+}^t + N_{u-}^t) + f_x - f_s \quad (13)$$

相应地, 含绝对值项的约束(6c)可以改写为

$$\sum_{t=1}^{24} (N_{u+}^t + N_{u-}^t) < N_u^{\text{total}} \quad (14a)$$

式中,  $N_{u+}^t$  和  $N_{u-}^t$  分别表示时刻  $t$  抽头上调和下调的档位, 并满足以下约束条件

$$N_{u+}^t - N_{u-}^{t-1} = N_{u+}^t + N_{u-}^t \quad (14b)$$

$$N_{u+}^t \geq 0 \quad (14c)$$

$$N_{u-}^t \geq 0 \quad (14d)$$

含绝对值项的约束条件式(4a)可改写为

$$Q_{l2}^t - P_{l2}^t \tan \alpha \leq x^t M \quad (15a)$$

$$Q_{l2}^t + P_{l2}^t \tan \alpha \leq (1 - x^t) M \quad (15b)$$

式中,  $x^t$  为逻辑型变量, 取 0 时表示时刻  $t$  增量配电网对上级电网无有功倒送, 取 1 时表示时刻  $t$  增量配电网对上级电网存在有功倒送。

二次约束式(6a)可改写为

$$u_2^t = \mathbf{K}^T \mathbf{d}^t \quad (16a)$$

$$K(i) = \frac{1.05^2}{(1 + (\overline{N}_u - i)U^{\text{step}})^2} \quad (16b)$$

$$N_u^t = \overline{N}_u - \sum_{i=0}^{2\overline{N}_u} d(i) \cdot i \quad (16c)$$

$$\sum_{i=0}^{2\overline{N}_u} d^t(i) = 1 \quad (16d)$$

式中:  $i \in \{0, 1, 2, \dots, 2\overline{N}_u\}$ ;  $\mathbf{K}$  为变压器二次侧电压与一次侧电压比例平方常数向量, 对应  $2\overline{N}_u + 1$  个档位;  $\mathbf{d}^t$  为逻辑型变量向量, 取 1 的元素对应时刻  $t$  变压器抽头的档位。

### 3 割平面约束

调度模型的目标函数为除去光伏发电成本的运行成本, 在分布式光伏高渗透率接入的场景下用锥松弛思想求解最优潮流时已不满足文献[18]提出的条件, 即 SOCR 不再精确。将 SOCR 与整数规划松弛进行类比, 在上述优化模型的第  $n$  次求解之后, 如果表示 SOCR 误差的  $gap_n$  足够小, 那么可以认为满足求解精度, 否则在第  $n+1$  次求解时加入割平面约束。下面推导多时段最优潮流的割平面约束形式。

增量配电网购电量为负荷加网损, 售电量为光伏出力减去负荷、储能电量和网损, 所以目标函数(1a)的购电成本和光伏上网收益中包含了网损成本, 因而目标函数可以写为如下形式。

$$\min f = f_1 + f_r \quad (17)$$

式中:  $f_1$  表示网损成本;  $f_r$  表示其余成本。

首先, 考察第  $n$  次求解后网损成本的大小。设

$x$  表示优化变量,  $S$  表示原问题解集,  $\dot{x}$  表示最优解,  $x_n$  表示第  $n$  次求解后的非精确解,  $S_n$  表示第  $n$  次求解后的解集。文献[21]用几何法证明了辐射状配电网功率注射区间的帕累托最优解与其凸包相同。假设  $f_1(\dot{x}) \geq f_1(x_n)$ , 则  $x_n = \arg \min f_1(x) \in S_n$ , 而原问题与其凸包的功率注入区间有相同的帕累托前沿, 所以  $x_n \in S$ , 但是  $x_n$  是非精确解, 应被割去, 即  $x_n \notin S$ , 二者矛盾, 所以

$$f_1(\dot{x}) < f_1(x_n) \quad (18)$$

因为  $x_n$  是最小化问题第  $n$  次求解后的解, 所以有  $f_1(\dot{x}) + f_r(\dot{x}) > f_1(x_n) + f_r(x_n)$ , 即  $f_r(\dot{x}) - f_r(x_n) > f_1(x_n) - f_1(\dot{x})$ , 结合式(18)得

$$f_r(\dot{x}) > f_r(x_n) \quad (19)$$

由定义可知, 若令

$$f_1(x) = \sum_{t \in T_{\text{buy}}} c_b^t \cdot \left( \sum_{i:i \rightarrow j} R_{ij} l_{ij}^t \right) + c_s \sum_{t \in T_{\text{sell}}} \sum_{i:i \rightarrow j} R_{ij} l_{ij}^t \quad (20)$$

$$f_g(x) = \sum_{t \in T_{\text{buy}}} c_b^t \cdot \left( \sum_{i:i \rightarrow j} R_{ij} \left( l_{ij}^t - \frac{(P_{ij}^t)^2 + (Q_{ij}^t)^2}{u_i^t} \right) \right) + c_s \sum_{t \in T_{\text{sell}}} \sum_{i:i \rightarrow j} R_{ij} \left( l_{ij}^t - \frac{(P_{ij}^t)^2 + (Q_{ij}^t)^2}{u_i^t} \right) \quad (21)$$

式中,  $T_{\text{buy}}$  和  $T_{\text{sell}}$  分别表示购电时段和售电时段, 则  $f_1(x) = f_L(x) + f_g(x)$ , 所以  $\dot{x}$  和  $x_n$  是向量值函数

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} f_L \\ f_g \\ f_r \end{bmatrix} \quad (22)$$

的帕累托最优解。由目标函数最优解的性质可得

$$f_g(\dot{x}) < f_g(x_n) \quad (23)$$

由帕累托最优解的非支配性可知  $\dot{x}$  和  $x_n$  无法进行帕累托改进, 所以结合式(19)、式(23)可得

$$f_1(\dot{x}) = f_L(\dot{x}) < f_L(x_n) \quad (24)$$

即多时段最优潮流的割平面约束为

$$\begin{aligned} & \sum_{t \in T_{\text{buy}}} c_b^t \cdot \left( \sum_{i:i \rightarrow j} R_{ij} l_{ij}^t \right) + c_s \sum_{t \in T_{\text{sell}}} \sum_{i:i \rightarrow j} R_{ij} l_{ij}^t \leq \\ & \sum_{t \in T_{\text{buy}}} c_b^t \cdot \left( \sum_{i:i \rightarrow j} R_{ij} \frac{(P_{ij,n}^t)^2 + (Q_{ij,n}^t)^2}{u_{i,n}^t} \right) + \\ & c_s \sum_{t \in T_{\text{sell}}} \sum_{i:i \rightarrow j} R_{ij} \frac{(P_{ij,n}^t)^2 + (Q_{ij,n}^t)^2}{u_{i,n}^t} \end{aligned} \quad (25)$$

式中:  $P'_{ij,n}$  和  $Q'_{ij,n}$  分别表示第  $n$  次计算得到的时刻  $t$  支路  $ij$  之间传输的有功和无功功率;  $u'_{i,n}$  表示第  $n$  次计算得到的时刻  $t$  节点  $i$  的电压平方。在每次迭代计算后加入式(25)继续优化, 直至

$$gap_n < \varepsilon \quad (26)$$

式中,  $\varepsilon$  为预先设定的误差范围。

求解本文所提模型的详细流程如图 2 所示。

步骤一: 读入增量配电网各项参数以及日前负荷需求和光伏出力的预测数据;

步骤二: 根据搭建的优化调度模型计算各项调控手段的调控量以及各项运行成本;

步骤三: 判断 SOCR 误差是否小于误差限, 若是则输出优化调度结果, 否则更新割平面约束, 将其加入到调度模型中继续下一次优化。

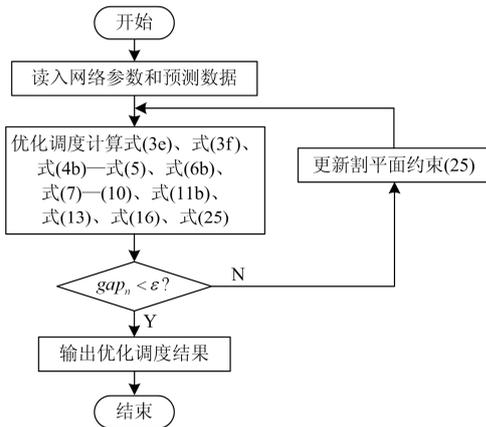


图 2 优化调度计算流程

Fig. 2 Optimal scheduling calculation process

## 4 案例分析

### 4.1 约束条件

为验证上述优化调度方法的有效性, 选择某增量配电网进行案例分析, 如图 3 所示。黑框表示负荷, 红框表示光伏, 蓝框表示储能。配电站抽头档位为-3~+3, 每档调节量为 0.025 p.u.; 无功补偿容量为 -200~200 kvar; 馈线电压的安全范围为 0.93~1.07 p.u。增量配电网的运行参数如表 1 和图 4 所示。

### 4.2 调度结果对比

选取光伏功率渗透率较高的某典型日进行仿真计算和分析。在中午时段, 光伏出力较大而负荷相对较小, 配电站抽头的档位为+1, 没有无功补偿投运。优化调度后, 调控结果如图 5—图 8 所示。其中, 图 5 表示用户侧储能的充放电总功率, 充电时取值为正, 放电时取值为负; 图 6 表示配电站补偿容量, 提供容性补偿时取值为正, 提供感性补偿时

取值为负; 图 7 表示配电站抽头的动作情况; 图 8 表示调控前后馈线电压情况。

表 1 运行成本参数

Table 1 Operating cost parameters

项目	金额/元
抽头动作一次成本	10
储能度电成本	0.7
光伏度电成本	0.7
光伏上网电价	0.35
光伏国家补贴	0.42
峰时段电价	1.35
平时段电价	0.9
谷时段电价	0.47

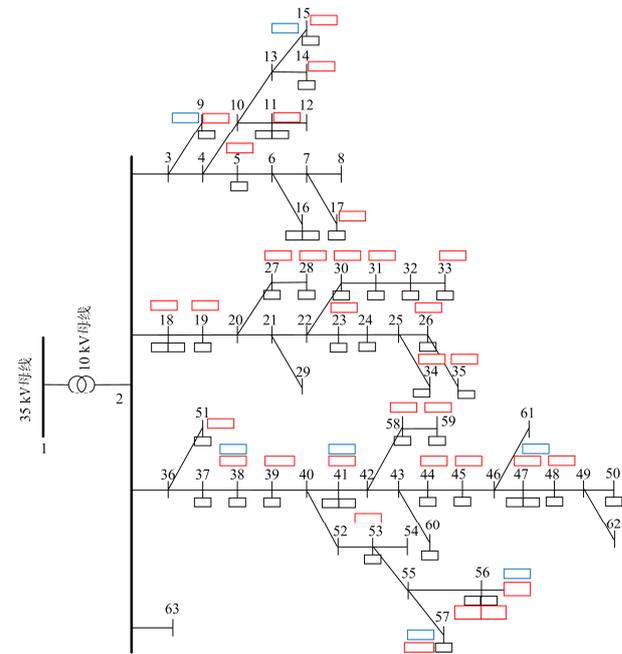


图 3 算例配电网拓扑

Fig. 3 Distribution network topology of the case

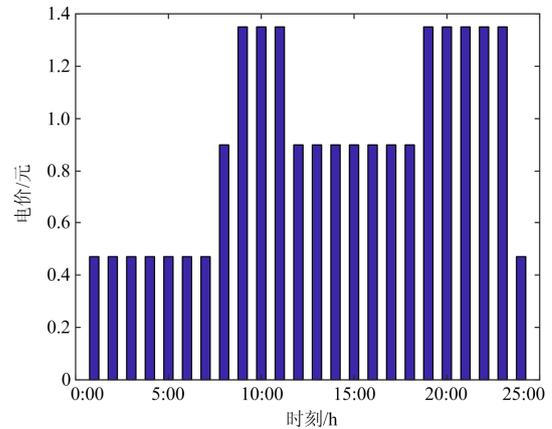


图 4 配电网日前分时电价

Fig. 4 Day ahead TOU price of distribution network

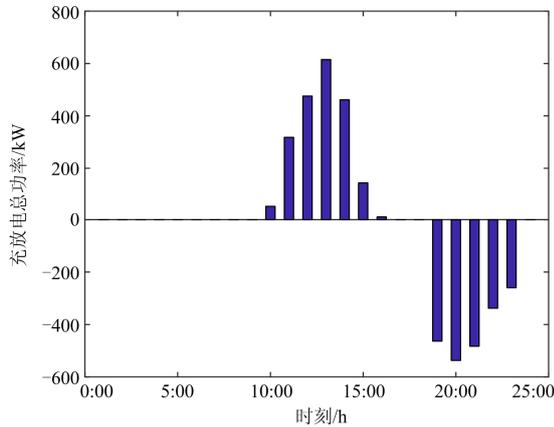


图 5 用户侧储能装置充放电总功率

Fig. 5 Total charge and discharge power of ESS at user side

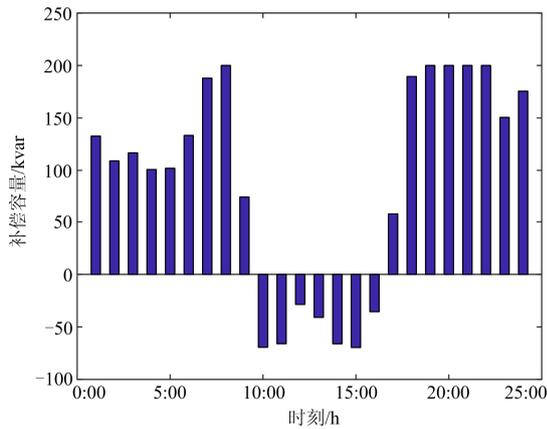


图 6 静止无功补偿装置的补偿容量

Fig. 6 Compensation capacity of SVC in the power distribution station

由图 5 可知，在分时电价机制下，储能能在 10~16 h 进行充电，在 19~24 h 进行放电。中午时段，用分布式光伏进行供电的度电成本为  $0.7-0.42=0.28$  元，低于峰时段电价 1.35 元和平时段电价 0.9 元，多余上网电量的净收益为  $0.42+0.35-0.7=0.07$  元，但潮流倒送容易引起馈线电压越上限现象；晚间时段，用储能进行供电的度电成本为 0.7 元，不仅低于峰时段电价 1.35 元，也低于两时段电价差  $1.35-0.28=1.07$  元。因此，用户侧储能白天将较便宜的分布式光伏发出的部分电能储存起来，在晚间峰电价时段放出，降低了在峰电价时段需要购买的电能，同时有利于改善中午电压越限。

由图 6 可知，无功补偿装置在 1~9 h 和 17~24 h 提供容性补偿，这是为了降低网损从而减小购电量；在 10~16 h 提供感性补偿，这是为了减小逆向潮流

从而降低电压越限程度。

由图 7 可知，从 10 h 开始抽头档位从+1 档提高至+2 档，这是为了保证中午时段出现潮流倒送时电压不会越限；从 17 h 开始抽头档位又从+2 档调回至+1 档，这是为了提高系统整体电压水平，降低网损从而减小购电量。

由图 8 结合图 7 可知，如果没有调度，增量配电网部分馈线电压在中午时刻超出电压上限 1.07，主要由于抽头的调控作用，在 10~16 h 时段馈线电压明显降低，降至安全范围以内。

综合上述结果，增量配电网在新型供电模式与传统供电模式下的总运行费用对比如表 2 所示。

从表 2 中数据对比可以看出，新型供电方式下购电成本大大降低，在本算例中降低程度达到 66.8%，分布式光伏发电上网后有一定收益，而且调控成本增加，但是总运行成本大大降低，在本算例中降低程度达 42.8%。

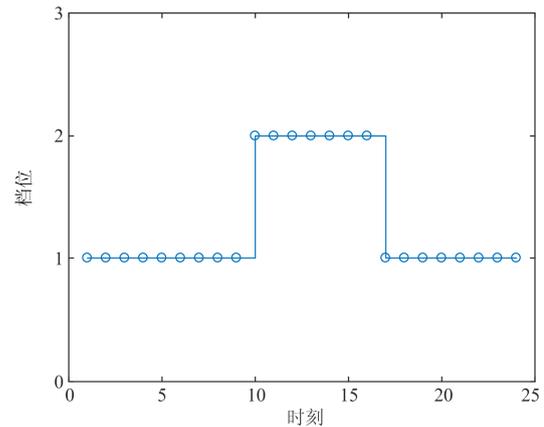


图 7 配电站有载调压变压器抽头动作情况

Fig. 7 Tap operation of OLTC in power distribution station

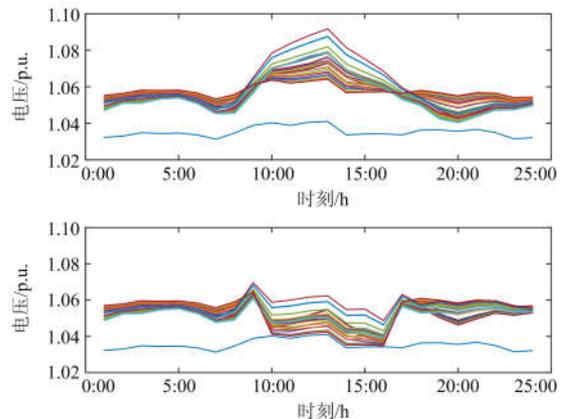


图 8 调控前后馈线电压对比

Fig. 8 Comparison of feeder lines voltage before and after dispatch

表 2 总运行费用对比  
Table 2 Comparison of total operating cost

项目	传统供电成本/元	新型供电成本/元
购电成本	14 916.94	4 955.23
光伏发电成本	0	4 297.27
光伏收益	0	2 193.98
储能充放电成本	0	1 456.00
抽头动作成本	0	20
总运行成本	14 916.94	8 534.52

### 4.3 割平面下锥松弛的有效性

在例如本算例的光伏功率渗透率较高等场景下, 无割平面计算时的锥松弛误差很大, 与加入割平面约束前后 SOCR 误差的对比如表 3 所示。SOCR 的误差范围  $\varepsilon$  设为  $1e-5$ , 加入多时段割平面后经过迭代锥松弛误差小于限值。

表 3 多时段割平面对锥松弛精度的影响  
Table 3 Effect of MPCP on the SOCR error

时刻	锥松弛误差	
	无割平面	加入割平面
9	0.649 2	3.22e-11
10	0.648 0	5.65e-12
11	0.653 8	5.60e-12
12	0.652 6	5.64e-12
13	0.655 9	5.91e-12
14	0.668 9	5.66e-12
15	0.648 2	5.60e-12
16	0.646 7	5.60e-12
17	0.634 5	2.31e-11

从表 3 中可以看出, 无割平面时以标么值表示的如式(12)所示的锥松弛误差很大, 这表明计算结果并没有实际意义。加入多时段割平面后锥松弛误差随着迭代次数的增加而逐渐降低, 经过有限次迭代后, 锥松弛误差小于限值, 满足工程精度要求。

## 5 结论

本文考虑多种调控手段, 建立了含高渗透率分布式光伏和用户侧储能的增量配电网日前多时段优化调度 MISOCP 模型。为了保证求解精度, 提出多时段配电网最优潮流的割平面约束形式, 在每次迭代计算中加入一起优化。仿真算例结果表明:

(1) 模型考虑了增量配电网中分布式光伏和用户侧储能互补供电的优越性, 通过求解 MISOCP 模型, 得到了日前运行费用最小的调度方案;

(2) SOCP 模型的目标函数复杂化后, 在光伏高渗透率接入等场景下没有割平面时 SOCR 不再准

确, 加入多时段割平面约束后经过有限次迭代得到了满足精度要求的计算结果。

## 参考文献

- [1] 侯佳, 吴志力, 崔凯. 放开增量配电投资业务关键问题研究综述[J]. 电力建设, 2017, 38(9): 127-131.  
HOU Jia, WU Zhili, CUI Kai. Review on key issues of releasing incremental distribution network investment business[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(9): 127-131.
- [2] 许晓艳, 黄越辉, 刘纯, 等. 分布式光伏发电对配电网电压的影响及电压越限的解决方案[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 140-146.  
XU Xiaoyan, HUANG Yuehui, LIU Chun, et al. Influence of distributed photovoltaic generation on voltage in distribution network and solution of voltage beyond limits[J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 140-146.
- [3] 方景辉, 温镇. 分布式光伏就地自适应电压控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 49-55.  
FANG Jinghui, WEN Zhen. Research on local adaptive voltage control strategy based on distributed PV[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 49-55.
- [4] 李振坤, 鲍新雨, 邵宇鹰, 等. 考虑多种调压措施的分布式光伏消纳能力研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 10-16.  
LI Zhenkun, BAO Xinyu, SHAO Yuying, et al. Studying accommodation ability of distributed photovoltaic considering various voltage regulation measures[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 10-16.
- [5] 翟建伟, 张勇军, 刘斯亮, 等. 基于 PQ-QV-PV 节点的光储输出功率主动控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 1-9.  
ZHAI Jianwei, ZHANG Yongjun, LIU Siliang, et al. Active control strategy on photovoltaic-storage systems based on extended PQ-QV-PV node[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 1-9.
- [6] CHEN Qixin, ZHAO Xiangyu, GAN Dahua. Active-reactive scheduling of active distribution system considering interactive load and battery storage[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 320-330. DOI: 10.1186/s41601-017-0060-2.
- [7] 吴丽珍, 蒋力波, 郝晓弘. 基于最优场景生成算法的主动配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 152-159.  
WU Lizhen, JIANG Libo, HAO Xiaohong. Reactive power optimization of active distribution network based on optimal scenario generation algorithm[J]. Power System Protection

- and Control, 2017, 45(15): 152-159.
- [8] CHEN Linwei, LI Haiyu. Optimized reactive power supports using transformer tap stagger in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4): 1987-1996.
- [9] YANG H T, LIAO J T. MF-APSO-based multi-objective optimization for PV system reactive power regulation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1346-1355.
- [10] SRIVASTAVA L, SINGH H. Hybrid multi-swarm particle swarm optimisation based multi-objective reactive power dispatch[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(8): 727-739.
- [11] YOSHIDA H, KAWATA K, FUKUYAMA Y, et al. A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 15(4): 1232-1239.
- [12] BAI Xiaoqing, WEI Hua, FUJISAWA K, et al. Semidefinite programming for optimal power flow problems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2008, 67: 383-392.
- [13] FARIVAR M, LOW S H. Branch flow model: relaxations and convexification-part I[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2554-2564.
- [14] LOW S H. Convex relaxation of optimal power flow-part I: formulations and equivalence[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2014, 1(1): 15-27.
- [15] TIAN Zhuang, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Mixed-integer second-order cone programming model for VAR optimization and network reconfiguration in active distribution networks[J]. IET Generation, Transmission, and Distribution, 2016, 10(8): 1938-1946.
- [16] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2575-2583.
- LIU Yibing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A mixed integer second-order cone programming based active and reactive power coordinated multi-period optimization for active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2575-2583.
- [17] 高红均, 刘俊勇, 沈晓东, 等. 主动配电网最优潮流研究及其应用实例[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1634-1644.
- GAO Hongjun, LIU Junyong, SHEN Xiaodong, et al. Optimal power flow research in active distribution network and its application examples[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1634-1644.
- [18] LOW S H. Convex relaxation of optimal power flow-part II: exactness[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2014, 1(2): 177-189.
- [19] ABDELOUADOUD S Y, GIRARD R, NEIRAC F P, et al. Optimal power flow of a distribution system based on increasingly tight cutting planes added to a second order cone relaxation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 69: 9-17.
- [20] GAO Hongjun, LIU Junyong, WANG Lingfeng, et al. Cutting planes based relaxed optimal power flow in active distribution systems[J]. International Journal of Electrical Power Systems Research, 2017, 143: 272-280.
- [21] LAVAEI J, TSE D, ZHANG Baosen. Geometry of power flows and optimization in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 572-583.

收稿日期: 2018-09-20; 修回日期: 2018-12-05

作者简介:

路 畅(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为含光伏配电网运行控制; E-mail: tjuluchang@163.com

郭 力(1981—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为分布式发电接入配电网规划和运行控制, 交直流微电网规划和运行控制。E-mail: liguo@tju.edu.cn

(编辑 葛艳娜)