

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200699

# 考虑无功辅助服务分段报价的多目标无功优化方法

项中明<sup>1</sup>, 石博隆<sup>1</sup>, 吴昌<sup>2</sup>, 谢永胜<sup>2</sup>, 李震<sup>2</sup>, 李绥荣<sup>3</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310000; 2. 国网浙江省电力有限公司衢州供电公司, 浙江 衢州 324000; 3. 杭州沃瑞电力科技有限公司, 浙江 杭州 310000)

**摘要:** 电力市场改革对电力系统无功辅助服务机制和无功优化提出了更高的要求。如何在确保电力系统电压质量和安全可靠运行的前提下, 实现无功辅助服务市场化、优化无功资源调控是无功电压自动控制面临的重要课题。基于电力市场环境提出了一种无功辅助服务分段报价规则, 构建机组进相、滞相时的购电成本模型。在此基础上, 提出了一种考虑无功辅助服务规则的多目标无功优化控制方法。对某省级电网实际运行方式进行了仿真计算和分析、讨论。仿真结果验证了该算法无功调控效果的有效性、经济性与均衡性, 满足电力市场环境下实际应用需求。

**关键词:** 无功辅助服务; 三段报价规则; 无功优化; 购电成本

## Research on AVC considering quotation rules of reactive power ancillary services in the electricity market

XIANG Zhongming<sup>1</sup>, SHI Bolong<sup>1</sup>, WU Chang<sup>2</sup>, XIE Yongsheng<sup>2</sup>, LI Zhen<sup>2</sup>, LI Suirong<sup>3</sup>

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;  
2. Quzhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Quzhou 324000, China;  
3. Hangzhou Worui Power Technology Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** Power market reform puts forward higher requirements for the reactive power auxiliary service mechanism and reactive power optimization of the power system. How to realize the marketization of reactive power auxiliary services and optimize the regulation of reactive power resources while ensuring power system voltage quality and safe and reliable operation is an important topic for reactive power voltage automatic control. Based on the power market environment, a segmented quotation rule for reactive power auxiliary services is proposed, and a power purchase cost model is constructed when the unit is in phase and when the phase is delayed. A multi-objective reactive power optimization control method considering reactive power auxiliary service rules is proposed, and the actual operation mode of a provincial power grid is simulated, analyzed and discussed. The simulation results verify the effectiveness, economy and balance of reactive power regulation effect of the algorithm, and meet the practical application requirements in the power market environment.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5211QZ180070) "Research on AVC System Considering Reactive Power Auxiliary Service Rules in Power Market Environment".

**Key words:** reactive power auxiliary service; three stage quotation rules; automatic control of reactive power and voltage; power purchase cost

## 0 引言

无功优化控制在国内外已经得到了广泛的应用,

其对电网电压质量、优化控制和提高运行效率起着非常重要的作用。而无功辅助服务的获取通过强制性手段或市场手段两种方式实现<sup>[1-3]</sup>, 但目前实际应用中的无功优化控制在建立优化调控模型时并未考虑市场因素。随着我国电力市场的深化发展, 强制无功辅助服务会逐渐被市场化无功辅助服务取

基金项目: 国家电网公司科技项目(5211QZ180070)“电力市场环境下考虑无功辅助服务规则的AVC系统研究”

代<sup>[4-5]</sup>, 在电力市场环境下无功辅助服务要求更加复杂和多层次的<sup>[6-10]</sup>, 且应遵循谁受益谁承担的市场规则, 根据成本考虑补偿费用<sup>[11-15]</sup>, 这给无功电压自动控制带来了新的挑战。

在无功辅助服务规则研究领域, 近年来国内外学者进行了一系列的研究。文献[16]研究了电力市场规则下的无功采购, 提出了一种发电机报价模型, 并给出了四种不同目标的无功采购模型, 并以 IEEE14 节点标准模型进行了仿真计算。文献[17]研究了基于最优潮流的实时无功辅助服务定价方法, 得出无功电价与无功负荷大小并不呈正比关系的结论, 而是受无功源距离远近的影响。文献[18]将短期实时电价理论应用到两部制无功定价法, 对输电网络中的无功定价模型和算法进行了一定的研究。文献[19]提出了基于修正导纳法的负荷侧无功定价的方法, 把负荷侧无功成本分摊为二个部分: 无功发电成本和无功输送成本。文献[20]在分析无功辅助服务供应商的基础上, 构建了基于输电线损最小化的无功辅助服务边际收益模型和基于社会福利最大化的无功辅助服务最优购买模型。文献[21]基于无功电压控制的区域无功辅助服务市场设计, 引入电气距离建立基于区域电压控制的无功辅助服务市场, 使各区域有各自的无功价格, 激励无功投资又有良好的经济效益。

目前, 国内外省调无功优化控制主要有 3 种模式: 三级电压控制模式、两级电压控制模式和“软”三级电压控制模式。其中, 三级电压控制模式多应用于国外电网, 国内则主要采用基于软分区的三级电压控制模式。文献[22]通过考虑变电站具体调节特性, 建立省调—地调联合无功优化计算模型, 进行迭代优化。文献[23]提出了含电压源换流器并考虑双馈感应风机无功支撑的动态无功优化模型用于解决含柔性直流的交直流混联电网的无功优化控制问题。文献[24]提出了基于无功辅助服务补偿的发电机 AVC 系统机组无功出力分配策略, 建立了优化模型, 以电厂收益最大为优化目标。文献[25]研究了同步调相机对受端电网运行的影响以及协调控制策略。

以上国内外的相关研究涉及电力市场的无功辅助服务成本和市场报价规则及省级 AVC 策略<sup>[26]</sup>, 有的提出基于无功辅助服务补偿的无功出力分配策略, 但其仅以电厂建模, 且以电厂收益最大为优化目标, 未从电网整体来优化建模, 其策略无法满足电力市场下电网无功辅助服务的要求。因此, 本文基于无功辅助服务成本 and 市场化原则提出了分段报价规则, 深入分析发电方进相、滞相运行方式下的

购电成本模型及计算方法, 提出了电力市场环境下考虑无功辅助服务费用的多目标无功优化模型。对浙江省网典型实时断面进行计算分析, 结果表明了新无功优化模型及算法的有效性、经济性和均衡性, 能满足电力市场环境下对无功辅助服务的应用需求, 为后续无功辅助服务市场化推广应用提供理论和实践支撑。

## 1 市场环境下无功辅助服务

### 1.1 无功特点和原则

电力系统中无功功率除了要满足系统的无功负荷需求外, 还承担着保持系统电压水平和维持系统电压稳定等作用。因此电力市场中的无功辅助服务包括满足用户和系统运行的无功功率需求、控制系统电压水平、提供足够的无功功率备用、降低有功功率网络损耗等。无功辅助服务具有供应的地域性、控制的分散性、手段的多样性、分析的复杂性等特点。

在电力市场环境下, 根据无功需求的受益对象将当前的无功需求分为非发电受益部分和发电受益部分, 根据谁受益谁承担的原则, 对非发电受益部分的无功需求根据成本设计合理的补偿和付费市场规则, 对发电受益部分则不考虑或者少量补偿。

### 1.2 发电方无功成本计算

发电方无功辅助服务的成本主要包括固定成本和机会成本, 固定成本主要由容量成本决定, 即发电机总投资成本分摊到无功容量的部分。

其中发电机机会成本计算方法为

$$C_{qgi}(Q_{Gi}) = k \left[ C_{pgi}(S_{Gmax}) - C_{pgi} \left( \sqrt{S_{Gmax}^2 - Q_{Gi}^2} \right) \right] \quad (1)$$

式中:  $C_{qgi}(Q_{Gi})$  表示发电机  $i$  提供无功服务  $Q_{Gi}$  时所产生的机会成本;  $S_{Gmax}$  为发电机额定视在功率;  $C_{pgi}$  为发电机提供单位有功服务的成本;  $k$  为系数, 代表发电厂的利润率(5%~10%)。

根据发电方的成本计算方法及成本承担原则, 将无功辅助服务报价按机组无功出力的用途分为三个区域: 区域 1 发电受益区、区域 2 不考虑机会成本的电网受益区, 区域 3 考虑机会成本的电网受益区。对应区域的无功辅助服务成本如图 1 所示。图中:  $Q_{bs}$  表示区域 1 的无功分界值,  $Q_a$  表示区域 2 的无功分界值,  $Q_b$  表示区域 3 的无功分界值。

### 1.3 无功辅助分段报价规则

从图 1 可以看出, 机组的无功辅助服务成本呈阶梯式增长, 根据谁受益谁付费的市场化原则: 在区域 1 为维护自身发电而提供的无功出力, 属于电

厂自身受益, 因此除了考虑一定的容量费补偿外, 不考虑额外付费; 区域 2 中发电厂在不影响有功发电的情况下提供无功辅助服务, 其主要成本为固定成本; 而区域 3 中由于系统无功需求大需要机组牺牲部分发电能力才能提供相应的无功辅助服务, 此时产生了机会成本, 无功辅助服务成本显著增加。据此根据无功辅助服务成本可将报价规则定义为三段分开报价。

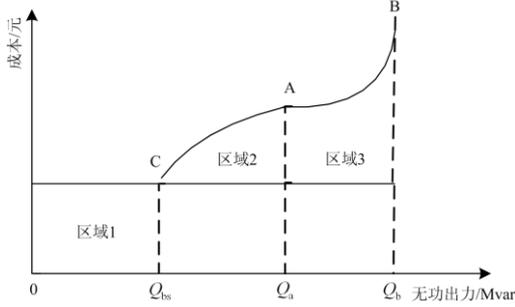


图 1 发电机无功成本曲线

Fig. 1 Generator reactive power cost curve

实际上机组可进相和滞相运行: 当系统无功需求大时机组滞相运行, 机组提供更多的无功出力, 机组可提供的无功辅助服务上网无功部分按三段实时报价, 每段价格要求单调递增; 当系统无功过裕时要求机组进相运行, 由机组吸收过多的无功, 对机组吸收的无功部分同样按三段进行报价。

## 2 考虑无功辅助服务报价的无功优化

### 2.1 电力市场环境下无功优化调控方式

在无功辅助服务市场规则下, 由各参与无功辅助服务的电厂上报实时可调无功容量及实时三段报价, 调度 AVC 系统将无功辅助服务规则纳入优化目标, 根据电网运行的实际状态及各电厂的无功辅助服务实时报价进行优化计算, 优化结果下发各电厂, 各电厂按优化结果输出无功出力, 调度方和电厂按各电厂实时上报的无功调节容量、三段式报价及实际无功出力进行费用结算。

### 2.2 考虑分段报价的购电成本建模

电力市场环境下, 参与无功辅助服务报价的主体为电厂, 其对超出自身需求的无功辅助服务采用三段单向递增的报价方式, 在实际运行方式中, 机组存在进相运行和滞相运行两种运行方式, 分别进行定义和处理。

#### 2.2.1 进相运行

当机组进相运行时, 对于超出基本服务的部分分为三段进行处理, 定义如式(2)。

$$\begin{cases} Q_{Gi} = Q_{Gi}^0 - Q_{Gi}^1 - Q_{Gi}^2 - Q_{Gi}^3 \\ 0 \leq Q_{Gi}^1 \leq \bar{Q}_{Gi}^1 \\ 0 \leq Q_{Gi}^2 \leq \bar{Q}_{Gi}^2 \\ 0 \leq Q_{Gi}^3 \leq \bar{Q}_{Gi}^3 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $Q_{Gi}$  表示机组  $i$  总的无功进相部分;  $Q_{Gi}^0$  表示机组  $i$  无功出力的滞相部分;  $Q_{Gi}^1$ 、 $Q_{Gi}^2$  和  $Q_{Gi}^3$  分别表示机组  $i$  无功出力对应于三段报价的无功进相量,  $\bar{Q}_{Gi}^1$ 、 $\bar{Q}_{Gi}^2$ 、 $\bar{Q}_{Gi}^3$  分别表示三段的最大无功补偿。

机组进相运行时,  $Q_{Gi}^0$  为零, 则机组  $i$  无功购电成本为

$$C_{Gi}^1 Q_{Gi}^1 + C_{Gi}^2 Q_{Gi}^2 + C_{Gi}^3 Q_{Gi}^3 \quad (3)$$

式中,  $C_{Gi}^1$ 、 $C_{Gi}^2$  和  $C_{Gi}^3$  分别表示机组  $i$  无功出力对应于三段报价的无功进相量。报价规则要求:

$$C_{Gi}^1 < C_{Gi}^2 < C_{Gi}^3 \quad (4)$$

即进相深度越深无功电价越高。

在最小化无功购电成本的目标驱动下, 当机组在基本服务区间运行时,  $Q_{Gi}^1 = Q_{Gi}^2 = Q_{Gi}^3 = 0$ ,  $Q_{Gi} = Q_{Gi}^0$ ; 当机组进相运行时,  $Q_{Gi}^0 = 0$ ,  $Q_{Gi} = -Q_{Gi}^1 - Q_{Gi}^2 - Q_{Gi}^3$ 。

#### 2.2.2 滞相运行时购电成本

同理电厂馈入电网的无功出力可描述为

$$Q_{\text{plant}}^k = \sum_{ij \in B_{\text{plant}}^k} Q_{ij}(e, f) \quad (5)$$

式中: 上标  $k$  表示电厂编号;  $Q_{\text{plant}}^k$  表示电厂  $k$  馈入电网的无功潮流;  $B_{\text{plant}}^k$  表示电厂  $k$  的出线集合;  $Q_{ij}(e, f)$  表示出线  $ij$  的无功出力。

电厂仍采用三段无功报价, 定义

$$\begin{cases} Q_{\text{plant}}^k = Q_{\text{plant}}^{k,0} + Q_{\text{plant}}^{k,1} + Q_{\text{plant}}^{k,2} + Q_{\text{plant}}^{k,3} \\ Q_{\text{plant}}^{k,0} \leq \bar{Q}_{\text{plant}}^{k,0} \\ 0 \leq Q_{\text{plant}}^{k,1} \leq \bar{Q}_{\text{plant}}^{k,1} \\ 0 \leq Q_{\text{plant}}^{k,2} \leq \bar{Q}_{\text{plant}}^{k,2} \\ 0 \leq Q_{\text{plant}}^{k,3} \leq \bar{Q}_{\text{plant}}^{k,3} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $Q_{\text{plant}}^k$  表示电厂  $k$  总馈入电网无功潮流;  $Q_{\text{plant}}^{k,0}$  表示电厂  $k$  馈入电网无功潮流对应于基本无功辅助服务的部分;  $\bar{Q}_{\text{plant}}^{k,0}$  表示电厂  $k$  基本无功辅助服务要求馈入电网无功潮流的最大值;  $Q_{\text{plant}}^{k,1}$ 、 $Q_{\text{plant}}^{k,2}$  和  $Q_{\text{plant}}^{k,3}$  分别表示电厂  $k$  无功潮流对应于三段无功报价出力部分。

则电厂  $k$  无功购电成本为

$$C_{\text{plant}}^{k,1} Q_{\text{plant}}^{k,1} + C_{\text{plant}}^{k,2} Q_{\text{plant}}^{k,2} + C_{\text{plant}}^{k,3} Q_{\text{plant}}^{k,3} \quad (7)$$

式中,  $C_{\text{plant}}^{k,1}$ 、 $C_{\text{plant}}^{k,2}$  和  $C_{\text{plant}}^{k,3}$  分别表示电厂  $k$  三段无功实时报价, 报价规则要求:

$$C_{\text{plant}}^{k,1} < C_{\text{plant}}^{k,2} < C_{\text{plant}}^{k,3} \quad (8)$$

即无功出力输出越大, 无功电价越高。

在最小化无功购电成本的目标驱动下, 当电厂只提供基本无功辅助服务时,  $Q_{\text{plant}}^k = Q_{\text{plant}}^{k,0}$ ,

$Q_{\text{plant}}^{k,1} = Q_{\text{plant}}^{k,2} = Q_{\text{plant}}^{k,3} = 0$ ; 当电厂馈入电网无功潮流超出基本无功辅助服务时,  $Q_{\text{plant}}^k = \bar{Q}_{\text{plant}}^{k,0}$ 。

## 2.3 无功优化目标

### 2.3.1 传统优化目标

无功优化模型的优化目标函数主要包括以下两方面: (1) 有功网损最小; (2) 容抗器及有载调压主变分接头调节次数最少。

$$\min \sum_{i \in S_{\text{slack}}} P_{Gi} + \sum_{j \in S_C} W_{Cj} (C_j - C_j^0) + \sum_{k \in S_T} W_{Tk} (t_k - t_k^0) \quad (9)$$

式中:  $\sum_{i \in S_{\text{slack}}} P_{Gi}$  表示平衡机的集合, 平衡机的出力之和事实上对应于网络损耗;  $C_j^0$  和  $C_j$  分别表示补偿器  $j$  优化前后的运行状态, 0 表示退出, 1 表示运行;  $W_{Cj}$  表示补偿器  $j$  的调节权重, 由于补偿器优化前状态为已知值, 故优化问题可以确定  $W_{Cj}$  的符号;  $t_k^0$  和  $t_k$  分别表示有载调压抽头  $k$  优化前后的抽头位置;  $W_{Tk}$  表示分接头调整的权重, 在 AVC 策略计算前需要根据电网当前的无功电压运行状态预先选择抽头的期望调整方向, 并进而确定  $W_{Tk}$  的符号;  $S_C$  是补偿器的集合;  $S_T$  表示可调档位的集合。

### 2.3.2 考虑购电费用的无功优化目标

在传统的无功优化模型中增加电力市场环境考虑无功辅助服务报价规则无功购电成本目标, 则新的目标应包括三部分: (1) 有功网损最小; (2) 无功购电费用尽可能小; (3) 容抗器及有载调压主变分接头调整量最少。对应的目标函数表达式为

$$\begin{aligned} \min \sum_{i \in S_{\text{slack}}} P_{Gi} + \sum_{i \in S_G} (C_{Gi}^1 Q_{Gi}^1 + C_{Gi}^2 Q_{Gi}^2 + C_{Gi}^3 Q_{Gi}^3) + \\ \sum_{i \in S_{\text{plant}}} (C_{\text{plant}}^{k,1} Q_{\text{plant}}^{k,1} + C_{\text{plant}}^{k,2} Q_{\text{plant}}^{k,2} + C_{\text{plant}}^{k,3} Q_{\text{plant}}^{k,3}) + \\ \sum_{j \in S_C} W_{Cj} (C_j - C_j^0) + \sum_{k \in S_T} W_{Tk} (t_k - t_k^0) \end{aligned} \quad (10)$$

第一项与最后二项与式(9)中含义一样;  $S_G$  表示所有进相运行可调机组的集合, 其所在电厂从电网消纳无功;  $S_{\text{plant}}$  表示参与 AVC 控制的馈入电网无

功的所有电厂集合, 因此第二项和第三项分别表示机组进相和电厂无功出力的购电费用, 其具体含义及推导过程见 2.2 节。

### 2.3.3 无功优化约束条件

电压无功优化以电网运行的安全性作为约束条件, 以提高电网运行的经济性作为优化目标, 实现全网无功的综合优化, 全网无功优化约束条件如下。

#### (1) 交流节点潮流平衡约束

$$\begin{aligned} \Delta P_i^{\text{inj}} = P_{Gi} - P_{Li} - e_i \sum_{j \in N_a^i} (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - \\ f_i \sum_{j \in N_a^i} (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_i^{\text{inj}} = Q_{Gi} - Q_{Li} - f_i \sum_{j \in N_a^i} (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + \\ e_i \sum_{j \in N_a^i} (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

式中: 下标  $i$  和  $j$  表示节点编号;  $\Delta P_i^{\text{inj}}$  和  $\Delta Q_i^{\text{inj}}$  分别表示节点  $i$  的总有功及总无功注入;  $P_{Gi}$  和  $Q_{Gi}$  分别表示节点  $i$  电源的有功及无功出力;  $P_{Li}$  和  $Q_{Li}$  分别表示节点  $i$  的有功及无功负荷;  $e_i$  和  $f_i$  分别表示节点  $i$  电压的实部及虚部;  $N_a^i$  表示节点  $i$  及其相邻节点的集合。

#### (2) 交流电压相位参考值约束

对于每个交流子系统, 可以选择一个节点作为相位参考点, 在直角坐标系对应于参考点的电压虚部为 0, 即

$$f_i = 0 \quad (13)$$

#### (3) 主变关口无功约束

电网运行中, 调度部门一般希望无功分层平衡, 即控制主变关口无功在某一范围内, 即

$$\begin{cases} \underline{Q}_{\text{gate}}^k = \sum_{ij \in B_{\text{gate}}^k} Q_{ij}(e, f) \\ \underline{Q}_{\text{gate}}^k \leq \underline{Q}_{\text{gate}}^k \leq \bar{Q}_{\text{gate}}^k \end{cases} \quad (14)$$

式中: 上标  $k$  表示关口编号;  $Q_{\text{gate}}^k$  表示关口  $k$  的无功潮流;  $\underline{Q}_{\text{gate}}^k$  和  $\bar{Q}_{\text{gate}}^k$  分别表示关口  $k$  无功潮流的下限及上限;  $B_{\text{gate}}^k$  表示关口  $k$  的支路集合。

#### (4) 有载调压变压器抽头模型

对于变压器支路, 可以看作是一条普通支路串接一个理想变比(如图 2 所示)。



图 2 变压器等值电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of transformer

图 2 中引入节点的电压相量  $e_{ik} + jf_{ik}$ , 则

$$e_{ck} T_k = e_{jk} \quad (15)$$

$$f_{ck} T_k = f_{jk} \quad (16)$$

$$T_k = T_k^0 + t_k M_k \quad (17)$$

式中:  $e_{ik}$ 、 $f_{ik}$ 、 $e_{ck}$  及  $f_{ck}$  分别代表对应节点的电压相量实部和虚部;  $t_k$  和  $M_k$  分别为有载调压抽头  $p_f = 0.9$  的档位和档距。由此可以将变压器支路两端的有功及无功潮流描述为  $e_{ik}$ 、 $f_{ik}$ 、 $e_{ck}$  及  $f_{ck}$  的二次函数,  $T_k$  表示当前变比。

(5) 并联补偿器模型

对于并联补偿器的补偿节点  $i$ , 补偿无功  $Q_{ci}$  为

$$Q_{ci} = (e_i^2 + f_i^2) B_i \quad (18)$$

式中:  $e_i$ 、 $f_i$  分别为节点电压的实部和虚部;  $B_i$  为导纳阵对应部分。

引入辅助变量

$$U_i = (e_i^2 + f_i^2) \quad (19)$$

式中,  $U_i$  为节点  $i$  电压幅值的平方。则有

$$Q_{ci} = U_i B_i \quad (20)$$

(6) 交流节点电压约束

电网运行中一般要求交流节点电压  $V_i$  控制在某一合理的范围, 故有

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (21)$$

式中,  $V_i^{\min}$ 、 $V_i^{\max}$  分别代表电压合理的下限和上限。

(7) 机组无功上下限约束

实际运行中, 机组无功出力  $Q_{Gi}$  有上、下限约束, 即

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \quad (22)$$

式中:  $Q_{Gi}$  代表机组实际无功出力;  $Q_{Gi}^{\max}$  代表无功出力上限;  $Q_{Gi}^{\min}$  代表无功出力下限。

### 3 仿真验证

#### 3.1 仿真案例

为了验证本文提出的考虑无功辅助服务分段报价模型和无功优化算法的可行性, 选取浙江省电网多个典型断面实际运行方式和数据进行仿真计算, 结果数据如表 1 所示。

由表 1 数据可以得出以下结论: (1) 所有断面均稳定收敛, 新算法具有良好收敛性。(2) 新优化算法的系统网损比传统算法网损会略有增加, 其增加比例在 0.01 以下, 在可以接受的范围内。网损增加是由于考虑了无功购电成本。(3) 新优化算法结果中电压越限节点数与传统方法基本保持一致, 没有明显

差异, 系统电压质量仍能得到保证。(4) 新算法调节机组数量与传统方法保持一致或者略有减少。

表 1 无功优化结果

Table 1 Overall results of AVC strategy

断面	类别	调节机组/个	网损率/%	越限点/个
3 点	A	138	0.515	78
	B	138	0.517	78
8 点	A	153	0.573	57
	B	143	0.576	57
10 点	A	165	0.649	53
	B	163	0.652	53
12 点	A	163	0.587	64
	B	161	0.590	65
22 点	A	157	0.583	68
	B	156	0.586	68

注: A 考虑有功网损最小的传统算法结果, B 考虑无功辅助服务分段报价新无功优化算法结果。

#### 3.2 调节策略效果分析

对两次优化计算的机组调节数据进一步分析对比, 以机组调节后的无功出力(单位 Mvar)为横坐标(X 轴), 以机组本次调节量(单位 Mvar)为纵坐标(Y 轴), 绘制散点图, 得图 3、图 4、图 5: 图中蓝色代表本文算法结果, 黄色代表常规算法结果(下同)。

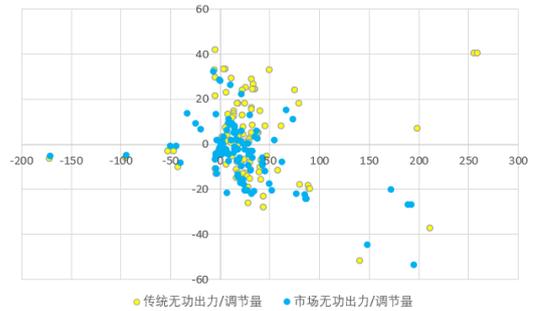


图 3 断面一优化调节策略对比

Fig. 3 Comparison of regulation strategies of section 1

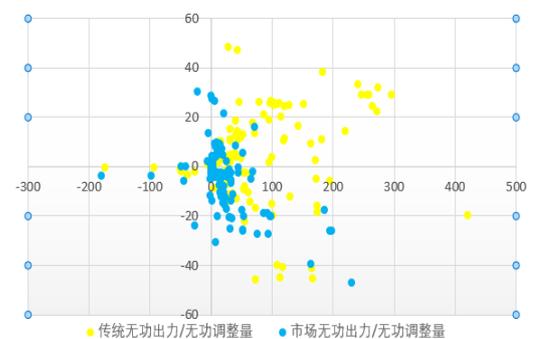


图 4 断面二优化调节策略对比

Fig. 4 Comparison of regulation strategies of section 2

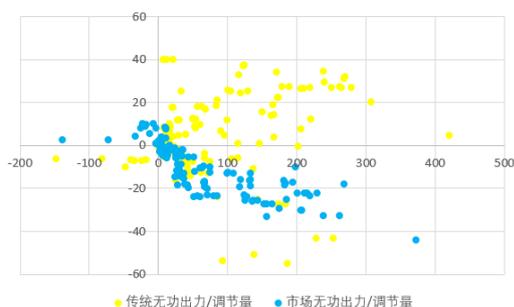


图5 断面三优化调节策略对比

Fig. 5 Comparison of regulation strategies of section 3

结合图3—图5可以看出, 市场规则下各机组无功出力点比传统方法下分布更加均匀紧凑, 更加靠近X轴原点, 这是因为考虑无功辅助服务三段单相递增费用意味着机组的无功出力随出力增加费用会显著增加, 优化策略将尽量平衡各机组的无功出力, 保持各机组在低购电成本区域。

表2给出了部分机组两种规则下的无功出力优化结果, 该结果表明: 市场规则下, 当机组基态出力和费用较高时, 系统倾向于降低其出力及费用, 转而选择增加费用较低的机组; 而传统方法则因为不考虑费用问题, 则继续增大出力。而当机组处在低成本区域时, 两种优化结果差别不大。

表2 断面部分机组无功出力数据

Table 2 Reactive power output data of some units in section

所属电厂	机组	基态无功/ Mvar	A 优化无功/ Mvar	B 优化无功/ Mvar
方家山核电厂	1号机	215.4	255	188.6
	2号机	218.8	259.2	192.2
苍南厂	1号机	248.3	211	194.8
三门核电厂	1号机	192.2	140	147.6
	2号机	191.7	198.7	171.8
北仑厂	5号机	-39.2	-6.1	-6.88
	4号机	-29.4	3.9	-0.74
	3号机	-28.3	5.0	-0.19
胜龙厂	5号机	-16.6	6.1	9.72
	6号机	-1.4	22.6	20.7

以方家山核电厂1号机组和2号机组为例, 其初始无功出力分别为215.4 Mvar和218.8 Mvar, 其无功值偏高。常规方法优化后出力分别为255 Mvar和259.2 Mvar, 出力均有所增加, 而市场模型优化后结果为188.6 Mvar和192.2 Mvar, 出力有所减少, 苍南厂初始无功出力为248.3 Mvar, A和B优化结

果分别为211 Mvar和194.8 Mvar。而无功出力本身较低或者进相运行时, 胜龙厂和北仑厂由于其初值处在低成本区域, 两种算法的优化结果差别不大。

综合上述分析, 充分证明本文提出的考虑无功辅助服务费用无功优化算法趋向保持各机组无功出力尽量处于无功低成本区域, 这与理论分析和市场预期一致, 验证了本文提出的模型和算法的可行性。

## 4 结语

本文研究了在电力市场规则下考虑无功辅助服务规则的AVC系统。提出了无功辅助服务三段报价规则, 建立了电力市场环境考虑无功辅助服务规则的无功优化模型及算法。仿真计算结果表明, 新的全网无功优化模型及算法适应阶梯式无功辅助服务报价市场规则, 在保证系统安全和电压合格率的前提下, 考虑无功调节费用, 优化无功采购成本。从仿真结果来看, 基于新规则优化算法的AVC系统较好地体现了市场规则下的调控原则, 既考虑了对各无功辅助服务提供方的补偿费用, 以激励提供方的市场参与积极性, 又通过购电成本目标对提供方进行选择, 体现了市场导向, 后续将沿这一方向继续深入研究, 最终实现无功辅助服务市场化。

## 参考文献

- [1] 邹建平. 辅助服务的市场化定价与交易模式研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.  
ZOU Jianping. Research on market-based pricing and transaction mode of ancillary services[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [2] 崔勇. 电力市场环境无功定价及无功优化模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.  
CUI Yong. Research on reactive power pricing and reactive power optimization model in electricity market[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [3] 吴国丙, 任震, 祁达才. 电力市场环境下的无功服务及其成本分析[J]. 继电器, 2002, 30(8): 14-17, 32.  
WU Guobing, REN Zhen, QI Dacai. Reactive power service and its cost analysis in the electricity market environment[J]. Relay, 2002, 30(8): 14-17, 32.
- [4] 陈金. 电力市场下的辅助服务研究[D]. 贵州: 贵州大学, 2009.  
CHEN Jin. Research on ancillary services in electricity market[D]. Guizhou: Guizhou University, 2009.
- [5] 文明, 彭建春, 蒋海波. 无功电源的价值评估方法综

- 述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(5): 12-18.  
WEN Ming, PENG Jianchun, JIANG Haibo. Review of reactive power supply value evaluation methods[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(5): 12-18.
- [6] 焦连伟, 文福拴, 祁达才, 等. 电力市场中辅助服务的获取与定价[J]. 电网技术, 2002, 26(7): 1-6.  
JIAO Lianwei, WEN Fushuan, QI Dacai, et al. Acquisition and pricing of ancillary services in the electricity market[J]. Power System Technology, 2002, 26(7): 1-6.
- [7] 王承民, 张启平, 侯志俭. 电力市场中的一般均衡与无功定价[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(24): 16-20.  
WANG Chengmin, ZHANG Qiping, HOU Zhijian. General equilibrium and reactive power pricing in the electric power market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(24): 16-20.
- [8] 龙苏岩, 冯凯, 徐骏, 等. 电力现货市场下不平衡费用构成及分摊机制研究[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2649-2657.  
LONG Suyan, FENG Kai, XU Jun, et al. Research on the composition and allocation mechanism of unbalanced charges in the spot market of electric power[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2649-2657.
- [9] 王晨晖, 侯志俭, 宋依群, 等. 美国 PJM 电力市场备用服务及其成本分析[J]. 华东电力, 2004, 32(11): 66-68.  
WANG Chenhui, HOU Zhijian, SONG Yiqun, et al. American PJM power market backup service and its cost analysis[J]. East China Electric Power, 2004, 32(11): 66-68.
- [10] 何永秀, 陈倩, 费云志, 等. 国外典型辅助服务市场产品研究及对中国的启示[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2915-2922.  
HE Yongxiu, CHEN Qian, FEI Yunzhi, et al. Research on typical foreign auxiliary service market products and its enlightenment to China[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2915-2922.
- [11] 朱继忠, 叶秋子, 邹金, 等. 英国电力辅助服务市场短期运行备用服务机制及启示[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17): 1-8, 86.  
ZHU Jizhong, YE Qiuzi, ZOU Jin, et al. The short-term operation backup service mechanism of the British power auxiliary service market and its enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 1-8, 86.
- [12] 熊虎岗, 程浩忠. 电力市场环境下无功辅助服务[J]. 现代电力, 2007, 24(2): 84-91.  
XIONG Hugang, CHENG Haozhong. Reactive auxiliary services in power market environment[J]. Modern Electric Power, 2007, 24(2): 84-91.
- [13] BAUGHMAN M L. Real-time pricing of reactive power: theory and case study results[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(1): 23-29.
- [14] KUZLE I, KLARIC M, TESNJAK S. Reactive power evaluation and market power in liberalized ancillary services market[C] // Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, May 12-15, 2004, Dubrovnik, Croatia: 1075-1078.
- [15] 王玉萍, 刘磊, 李小璐, 等. 调峰辅助服务费用分摊机制[J]. 广东电力, 2019, 32(2): 1-7.  
WANG Yuping, LIU Lei, LI Xiaolu, et al. Cost sharing mechanism of peak shaving auxiliary service[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(2): 1-7.
- [16] 徐楠, 文福拴. 电力市场环境下的无功采购[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(1): 21-27.  
XU Nan, WEN Fushuan. Reactive power procurement in power market[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20(1): 21-27.
- [17] 陈驾宇, 刘阳升, 宋尖, 等. 基于最优潮流的实时无功辅助服务定价分析[J]. 湖南电力, 2012, 32(5): 7-10.  
CHEN Jiayu, LIU Yangsheng, SONG Jian, et al. Real time reactive power ancillary service pricing analysis based on optimal power flow[D]. Hunan Electric Power, 2012, 32(5): 7-10.
- [18] 张永胜, 赵宇. 两部制无功定价法的进一步研究[J]. 电力学报, 2010, 25(1): 11-13, 32.  
ZHANG Yongsheng, ZHAO Yu. Further research on the two-part reactive power pricing method[J]. Journal of Electric Power, 2010, 25(1): 11-13, 32.
- [19] 文明, 彭建春, 蒋海波, 等. 基于修正导纳法的负荷侧无功定价[J]. 科学技术与工程, 2006, 6(6): 692-695.  
WEN Ming, PENG Jianchun, JIANG Haibo, et al. Reactive power pricing on load side based on modified admittance method[J]. Science Technology and Engineering, 2006, 6(6): 692-695.
- [20] 曾鸣, 马明娟, 李凌云, 等. 电力市场环境下无功辅助服务的最优购买模型[J]. 华东电力, 2013, 41(5): 897-901.  
ZENG Ming, MA Mingjuan, LI Lingyun, et al. Optimal

- purchasing model of reactive power auxiliary service in power market environment[J]. East China Electric Power, 2013, 41(5): 897-901.
- [21] 曾鸣, 邹建平, 马明娟, 等. 基于无功电压控制的区域无功辅助服务市场设计[J]. 水电能源科学, 2012, 30(6): 201-204.
- ZENG Ming, ZOU Jianping, MA Mingjuan, et al. Design of regional reactive power auxiliary service market based on reactive power and voltage control[J]. Hydropower Energy Science, 2012, 30(6): 201-204.
- [22] 闫何贵枝, 王克文, 刘艳红. 计及变电站 AVC 调节特性的省网无功优化分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(4): 16-20.
- YANHE Guizhi, WANG Kewen, LIU Yanhong. Reactive power optimization analysis of provincial grid considering AVC regulation characteristics of substation[J]. Power Capacitor and Reactive Power Compensation, 2019, 40(4): 16-20.
- [23] 范士雄, 韩巍, 刘幸蔚, 等. 计及 VSC 和 DFIG 的电网动态无功优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 29-35.
- FAN Shixiong, HAN Wei, LIU Xingwei, et al. Dynamic reactive power optimization model of power grid considering VSC and DFIG[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 29-35.
- [24] 林瑞星, 张蓓, 李曼, 等. 基于无功辅助服务补偿的发电厂 AVC 系统机组无功出力分配策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 144-148.
- LIN Ruixing, ZHANG Bei, LI Man, et al. Reactive power output allocation strategy of AVC system in power plant based on reactive power auxiliary service compensation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 144-148.
- [25] 赵静波, 孟侠, 朱鑫要, 等. 同步调相机对受端省级电网运行影响及控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 25-32.
- ZHAO Jingbo, MENG Xia, ZHU Xinyao, et al. Influence of synchronous condenser on receiving end provincial power grid operation and control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 25-32.
- [26] 杨威, 曾智健, 陈皓勇, 等. 广东电力市场需求侧响应交易机制研究[J]. 广东电力, 2017, 30(5): 25-34.
- YANG Wei, ZENG Zhijian, CHEN Haoyong, et al. Research on demand side response trading mechanism in Guangdong power market[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(5): 25-34.

---

收稿日期: 2020-06-19; 修回日期: 2020-11-02

作者简介:

项中明(1974—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行与管理; E-mail: xiangzhongming@zj.sgcc.com.cn

李绥荣(1973—), 男, 通信作者, 高级工程师, 研究方向为电网智能计算和无功电压优化控制。E-mail: 411011167@qq.com

(编辑 魏小丽)