# 规划与运行融合的配电网无功补偿智能协调配置

朱瞳形1,顾 洁1,金之俭1,储琳琳2,张宇俊2

(1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院 大数据工程技术研究中心,上海 200240;

2. 国网上海市电力公司市南供电公司,上海 200233)

摘要:采用空间快速负荷分段法建立动态负荷模型,去除空间负荷的时间复杂性。在此基础上,建立结合规划和运行的无功补偿智能协调配置双层模型,上层的规划模型对无功补偿设备的安装位置、类型和容量进行优化配置,下层的运行模型综合考虑不同的负荷场景,优化无功补偿设备的投切方案,使系统达到分级无功平衡。采用双层风驱动算法对模型进行求解。算例结果表明,所提无功补偿方案能够在不同负荷场景下取得良好补偿效果,验证了所提模型和算法的合理性和有效性。

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.02.006

# 0 引言

近年来,由于供电线路走廊和土地资源制约,部 分大中型城市负荷中心电网大量使用架空电缆。而 另一方面,产业结构深化调整带来以上海、北京等为 代表的大中型城市电网用电结构的变化,使得这些 城市电网负荷呈现出峰谷差加大、节假日与工作日 负荷差别加大等典型的城市化特征。

城市电网的网架结构及负荷特性变化给电力系 统无功平衡和电压稳定方面带来了新的问题。目前 我国城市电网无功补偿现状存在3个主要问题。

**a.**由于长度、电压等级相同的电缆比普通架空 线路具有更大的无功充电功率<sup>[1]</sup>,而目前 220 kV 及 以下电压等级电网补偿规划未考虑电缆充电功率, 补偿设备类型单一。

b. 城市电网大部分站点参考《城市配电网技术 导则》<sup>[2]</sup>,直接根据电压等级和主变容量确定容性 无功补偿装置容量。这种配置方式没有考虑实际电 网运行过程中各站点的相互影响,可能会造成补偿 装置配置上的冗余。

c. 目前地区电网广泛使用电压无功控制 (VQC)装置进行无功电压调节,未考虑各级电网之 间的互相影响,加剧了不同等级电网之间潮流分布 不均衡、电厂远距离输送无功的情况。

无功优化问题是一个复杂多变量多约束的非线 性整数优化问题<sup>[3]</sup>,多年来,国内外学者在该方面进 行了大量的探索研究。目前国内外有关研究可以分 为优化规划<sup>[4-7]</sup>和优化运行<sup>[8-10]</sup>两大类。

无功的优化规划侧重在已确定的网架基础上研 究静态负荷断面确定无功补偿方式、地点和容量。 常用的无功优化规划通过灵敏度分析<sup>[45]</sup>、节点网损 分摊系数<sup>[6]</sup>、奇异值分解<sup>[7]</sup>等方法确定补偿点和无 功补偿容量。无功的优化运行则指在电力系统无功

收稿日期:2018-02-13;修回日期:2018-09-21

较为充裕的前提下,研究特定场景下的最优运行方 案。根据优化时间维度是否单一可分为静态无功优 化调度和动态无功优化调度<sup>[9-10]</sup>:静态无功优化针 对单一时间断面进行优化计算,动态调度则研究适 应日负荷动态变化的无功调度优化方案。

本文在已有相关研究的基础上,完成了以下工作:

a. 提出一种无功补偿智能协调配置方法,将多 电压等级的无功优化配置问题分解为具有主从递阶 结构的双层优化模型;

**b.**采用风驱动优化 WDO(Wind Driven Optimization)算法<sup>[11]</sup>经过有限次循环迭代,从全网角度考虑各电压等级子网之间的能量交换,抑制无功倒送,进行无功协调优化;

**c.**提出了适用于无功优化的动态负荷简化模型,快速有效地降低解空间的时间复杂度;

**d.**同时考虑了容性补偿装置和感性补偿装置的安装和投切,保证多负荷水平下的电网无功平衡。

本文提出的方法弥补已有研究成果中规划、运 行割裂优化的缺陷,并且考虑不同电压层次电网之 间无功协调,抑制无功倒送,提高了无功配置方案对 高电缆化率和负荷峰谷差逐渐增大的城市化电网发 展趋势的适应性。

# 1 动态负荷简化模型

由于城市电网年负荷波动较大,为了满足电网 在多种负荷场景下的无功电压调控需求,选取地区 夏季最大负荷典型日和冬季最大负荷典型日作为典 型的重载场景,选取夏季最小负荷典型日、冬季最小 典型负荷日作为典型轻载场景,表征全年其他时段 负荷特征。

考虑到电网的实际负荷是连续变化的,电网中 主变无功及线路的无功损耗与电网负荷关系密切, 所以通常无功优化处理方法是将连续负荷曲线分时 段静态化,时段划分越密集,无功优化结果越精确。 另一方面,电力系统控制设备全天动作次数有限,时 段划分过于密集会导致优化结果中无功控制设备频 繁动作。

在实际优化中,综合考虑设备投切次数限制,采 用空间快速负荷分段法将日负荷曲线进行简化分 析。文献[12]提出的快速负荷分段法具有算法简 单、运算速度快、高效分割曲线的特点,但是该算法 只能解决负荷向量曲线分段问题。本文将该算法改 进为适用于全网负荷矩阵的分段方法。算法处理对 象为全网各个站点的负荷时间矩阵,算法的核心思 想是对标准化的负荷矩阵依次取采样点,通过比较 当前时刻负荷列向量与之前所有时刻负荷列向量的 平均向量间欧氏距离是否越限判断该时刻是否为分 段时刻,通过改变欧氏距离阈值调整分段数目,将负 荷矩阵分成若干个负荷子矩阵,将一组负荷曲线简 化为阶段数等于设备全天动作极值的阶跃曲线,以 此降低解空间的时间复杂度。具体算法流程如下。

**a.** 以每个采样时刻全网节点负荷作为列向量形成负荷矩阵 *L*, 对每个采样时刻全网负荷进行 z-score 标准化, 去除由于不同节点负荷分布不同带来的欧氏距离"大数淹没"的弊端。

**b.** 初始化距离阈值 $\lambda$ ,分段数 $S_e \in \{1,2,3,4,5,6,7,8\}$ ,依次对每个 $S_e$ 进行以下操作:设定初始第一个负荷子矩阵为第一个时刻的全网负荷列向量。

**c.** 依次计算当前采样点与该段所有采样点向量 均值的欧氏距离 $\Delta$ 。若 $\Delta \leq \lambda$ ,将采样点添加到当前 子矩阵;若 $\Delta > \lambda$ ,将采样点计为下一段起点直到遍历 全部矩阵列向量。

**d.** 若分段数 s 等于预设分段数  $S_e$ ,则算法结束, 否则使用式(1)修正距离阈值,转至步骤 **c** 直到分段 数符合要求。

$$\lambda_{\text{iter+1}} = \lambda_{\text{iter}} s / S_e \qquad (1)$$

其中, $\lambda_{iter}$ 为上一次循环距离阈值; $\lambda_{iter+1}$ 为更新后的循环距离阈值。

**e.** 输出  $S_{e}$  个负荷子矩阵,计算相对应的平均 负荷。

**f.** 循环步骤 **b**—**e**,根据式(2)计算所有  $S_e$  对应的误差评估 J,根据 Elbow 法选择最优  $S_e$  和对应的 拟合曲线。

$$J = \frac{1}{44} \sum_{i=1}^{44} \sum_{t=1}^{T_{\text{day}}} \sqrt{(p_{i,t} - \overline{p_{i,t}})^2}$$
(2)

其中, $T_{day}$ 为日采样频数; $p_{i,t}$ 为采样点负荷数据; $\bar{p}_{i,t}$ 为该段所有采样点负荷均值。

由于可以将分段数预设为设备全天动作次数允 许限值,该动态负荷模型保证了无功设备全天动作 次数满足上限约束。

## 2 无功补偿智能协调配置双层模型

## 2.1 双层协调优化模型思路

双层协调配置模型是一类具有主从递阶关系结构的系统模型<sup>[13]</sup>。本文所构建的无功补偿智能协调模型结构如图1所示。



图 1 无功补偿智能协调模型结构图



针对城市电网负荷低谷期间易发生无功从低压 网向高压网倒送而高峰期间电压偏低的情况,需要 协调规划典型场景下的运行策略,减少不同电压等 级间无功潮流流动,构建无功补偿智能协调配置模 型。上层的规划优化子模型以系统经济稳定运行为 目标,综合考虑无功设备补偿成本和经济运行成本, 对无功补偿设备的安装位置、类型和容量进行优化 配置;将决策方案传给下层,下层的运行优化子模型 在上层规划决策方案的基础上,以不同电压等级层 内无功平衡为控制目标,重点监控无功倒送情况,综 合不同负荷场景,优化无功补偿设备的投切方案等, 使系统达到无功协调优化。

#### 2.2 上层规划决策模型

作为协调优化的规划决策主模型,上层构建一个目标函数使电网运行的经济性以及稳定性达到最优,包括年平均降损收益 *E*<sub>loss</sub>、平均电压改善收益 *E*<sub>V</sub>以及无功补偿设备补偿成本投资 *E*<sub>CR</sub>。其决策变量为电容器组(CB)、电抗器组(RB)的安装位置和安装容量。各项具体计算表达式为:

$$\begin{cases} E_{\text{loss}} = \frac{1}{n} \sum_{d=1}^{n} \left( \sum_{t=1}^{S_{\text{e}}} \Delta P_{d,t} \Delta t_{d,t} \right) \alpha_{1} \\ E_{V} = \frac{1}{n} \sum_{d=1}^{n} \left( \sum_{t=1}^{S_{\text{e}}} \| U_{d,t} - U_{\text{N}} \|_{2} \Delta t_{d,t} \right) \alpha_{2} \quad (3) \\ E_{\text{CR}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{CR}}} aC_{i} + \sum_{j=1}^{N_{\text{CR}}} bR_{j} \end{cases}$$

其中, n 为典型日数目(本文中 n = 4);  $\Delta P_{d,t}, U_{d,t}, \Delta t_{d,t}$ 分别为第 d 个典型日第 t 时段的降损量、全网 电压向量以及该时段时长;  $U_N$  为额定电压组成的向 量;  $\|U_{d,t}-U_N\|_2$ 表示向量的二范数, 衡量电压偏差; a, b分别为电容器组、电抗器组单组成本;  $C_i, R_j$ 分 别为节点电容器组和电抗器组的安装数目;  $N_{CR}$ 为全 网配置无功补偿装置的节点数目;  $\alpha_1, \alpha_2$ 分别为网 损电价、电压补偿效果转换成经济效益的衡量系数。 故其适应度函数可以表示为:

$$F(\boldsymbol{X},\boldsymbol{Y}) = \min(\eta_1 E_{\text{loss}} + \eta_2 E_V + \eta_3 E_{\text{CR}}) \qquad (4)$$

其中, X 为上层决策变量, 即电容器组和电抗器组的 配置位置和容量; Y 为下层控制变量, 即电容器组、 电抗器组各时刻投入容量和变压器挡位;  $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 、 $\eta_3$ 为权重, 且  $\eta_1$ + $\eta_2$ + $\eta_3$ =1。

本文采用多目标综合评估方法即层次分析法 (AHP)<sup>[14]</sup>确定多目标函数中各子目标的最优权重。

上层规划决策模型是一个混合整数非线性规划 问题,在每一个典型日每一规划时段,决策变量都同 时受功率平衡约束和安全运行约束。

a. 等式约束,即功率平衡约束。

$$\begin{cases} P_i - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0\\ Q_i - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \end{cases}$$
(5)

其中, $P_i$ 、 $Q_i$ 分别为节点 *i*的有功注入、无功注入; *j*  $\in$  *i* 表示所有与 *i* 相连的节点; $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 分别为节点导 纳矩阵的实部、虚部; $\delta_{ij}$ 为节点 *i*、*j* 电压相角差。

b. 不等式约束,即安全运行约束。

节点电压满足:

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \tag{6}$$

其中, $U_i$ 为节点 i 电压; $U_i^{min}$ 、 $U_i^{max}$ 分别为节点 i 电压下限和上限。

由于电容器组和电抗器组投切量是一组离散变量,且一般情况下全天补偿装置动作次数有限,需满足如下约束条件:

$$\begin{cases}
0 \leq Q_{i}^{C} \leq Q_{i,\max}^{C} \\
0 \leq Q_{j}^{R} \leq Q_{j,\max}^{R} \\
N_{i}^{C} \leq N_{\max}^{C} \\
N_{j}^{R} \leq N_{\max}^{R} \\
Q_{i}^{C} = C_{i}\Delta V_{C}
\end{cases} (7)$$

$$\begin{array}{l}
\left(Q_{j}^{\mathrm{R}} = R_{j} \Delta V_{\mathrm{R}}\right) \\
\left(Q_{j}^{\mathrm{R}} = R_{j} \Delta V_{\mathrm{R}}
\end{array}$$
(8)

其中, $Q_{i,\max}^{c}$ , $Q_{j,\max}^{R}$ 分别为节点*i*、*j*上安装的电容器 组、电抗器组容量上限; $Q_{i}^{c}$ 、 $Q_{j}^{R}$ 分别为节点*i*,*j*实际 安装补偿器组容量; $N_{\max}^{c}$ 、 $N_{\max}^{R}$ 分别为电容器、电抗器 全天动作次数限值; $N_{i}^{c}$ 、 $N_{j}^{R}$ 分别为节点*i*、*j*安装电 容器组和电抗器组全天实际动作次数; $\Delta V_{c}$ 和 $\Delta V_{R}$ 分别为电容器和电抗器的单组容量。

类似地,变压器抽头变化取值也是一组有限的 离散数值,且也需满足动作次数限制条件。

$$\begin{cases} T_{\min} \leq T_k \leq T_{\max} \\ N_k^{\mathrm{T}} \leq N_{\max}^{\mathrm{T}} \end{cases}$$
(9)

其中, $T_{\text{max}}$ 、 $T_{\text{min}}$ 分别为可调变压器分接头调节范围 上、下限; $T_k$ 为第k台可调变压器分接头位置; $N_k^{\text{T}}$ 为 第 k 台可调变压器分接头全天调节次数; N<sup>T</sup><sub>max</sub>为允许 动作次数限值。

## 2.3 下层分层协调运行优化子模型

对于下层分层协调运行优化,在全局潮流的基础上提出针对单一层次的无功不平衡度指标,抑制 无功潮流逆向流动。

目前,我国省级及以上电网以 500 kV/220 kV 电压等级为主网架环网运行,城市电网以 220 kV 母 线为根节点,辐射状运行。这种电网结构自然形成 无功优化的分区,将电网分为 220 kV、110 kV、10 kV 这 3 层。

本文基于分解协调法<sup>[15]</sup>建立无功不平衡度指标。在电力系统中将同一电压等级输电线路和变电 站构成的电网作为一个目标层。此时连接高一等级 电网的变压器在目标层中可以视为目标层中的等效 无功电源和有功电源。

式(10)所示函数具有在自变量为负时函数增 长快、自变量为正时函数增长缓慢的性质,函数图像 见附录中图 A1。以每个目标层等效电源注入该层 的无功与该条母线在理想功率因数下对应无功差值 作为自变量,利用式(10)所示函数性质构建无功不 平衡度的指标,下层适应度函数如式(11)所示。

$$F(x) = \left| \ln \left( \frac{2 \arctan x}{\pi} + 1 \right) \right|$$
(10)  
(F = 5 M + 5 M + 5 M

$$\begin{bmatrix}
P - \zeta_{1}M_{1} + \zeta_{2}M_{2} + \zeta_{3}M_{3} \\
M_{1}(Y) = \frac{1}{n} \sum_{d=1}^{n} \sum_{t=1}^{s_{c}} \left( \sum_{g_{1}=1}^{n_{1}} M_{d,t}^{g_{1}} \Delta t_{d,t} \right) \\
M_{2}(Y) = \frac{1}{n} \sum_{d=1}^{n} \sum_{t=1}^{s_{c}} \left( \sum_{g_{2}=1}^{n_{2}} M_{d,t}^{g_{2}} \Delta t_{d,t} \right) \\
M_{3}(Y) = \frac{1}{n} \sum_{d=1}^{n} \sum_{t=1}^{s_{c}} \left( \sum_{g_{3}=1}^{n_{3}} M_{d,t}^{g_{3}} \Delta t_{d,t} \right) \\
M_{3}^{g_{i}} = \begin{cases} \left| \ln \left[ \frac{2 \arctan\left(Q_{d,t}^{g_{i}} - P_{d,t}^{g_{i}} \tan \theta\right)}{\pi} + 1 \right] \right| \\
Q_{d,t}^{g_{i}} < 0, Q_{d,t}^{g_{i}} \ge P_{d,t}^{g_{i}} \tan \theta \\
0 & 0 \le Q_{d,t}^{g_{i}} < P_{d,t}^{g_{i}} \tan \theta \end{cases} \\
\end{cases}$$
(11)

其中, $M_{d,t}^{g_i}$ 为第d个典型日第t时段第 $g_i$ 个等效电源 的无功不平衡度; $g_1,g_2,g_3$ 分别为 10 kV、110 kV、 220 kV 层中等效电源编号; $n_1,n_2,n_3$ 分别为上述 3 层电网的等效电源数目; $M_1,M_2,M_3$ 分别为 3 个目 标层无功不平衡度; $Q_{d,t}^{g_1}, Q_{d,t}^{g_2}, Q_{d,t}^{g_3}$ 和  $P_{d,t}^{g_1}, P_{d,t}^{g_2}, P_{d,t}^{g_3}$ 分 别为 3 个目标层第d个典型日第t时段等效电源电 网注入无功值和有功值; $\theta$ 为理想功率因数角; $\xi_1, \xi_2, \xi_3$ 为权重, 且 $\xi_1+\xi_2+\xi_3=1$ 。其权重计算同样使 用解决多目标复杂问题的 AHP。 由于下层模型是在上层的决策方案基础上进行 优化,故下层优化变量除了满足上层约束条件式 (5)—(9)外,还满足上层决策结果约束:

$$\begin{cases} Q_{d,t,i}^{c} \leq Q_{i}^{c} \\ Q_{d,t,j}^{R} \leq Q_{j}^{R} \end{cases}$$
(12)

其中, $Q_{d,t,i}^{c}$ 、 $Q_{d,t,j}^{R}$ 分别为下层第 t 时段投入电容器 组、电抗器组容量。

## 3 无功智能协调配置双层模型求解算法

上述无功补偿智能协调模型比较复杂,且模型 下层变量维数较高,具有非线性、离散型、约束多样、 计算规模大等特点,为保证快速寻优,使结果收敛, 可以采用双层 WDO 算法求解。

## 3.1 WDO 算法基本原理

美国学者 Bayraktar Z 和 Werner D H 在 2010 年 提出一种基于群体迭代的启发式全局智能搜索算法 的 WDO 算法。该算法的核心是模拟地球大气层中 极小的空气单元在空气中流动形成风的过程。

空气单元在地球地理环境中受力复杂,而 WDO 算法将其简化为易于分析的质点受力模型。WDO 算法分析空气质点的气压梯度力、摩擦力、重力和地 转偏向力,结合牛顿第二定律和理想气体状态方程, 推导出速度和位置的迭代方程,更新搜索空间。其 算法核心速度更新方程和位置更新方程如下:

$$\begin{cases} u_{\text{new}} = (1-\alpha) u_{\text{cur}} - g x_{\text{cur}} + \\ \left[ RT \left| \frac{1}{r_{\text{fit}}} - 1 \right| (x_{\text{opt}} - x_{\text{cur}}) \right] + \frac{c u_{\text{cur}}^{\text{otherdim}}}{r_{\text{fit}}} \quad (13) \\ x_{\text{new}} = x_{\text{cur}} + u_{\text{new}} \Delta \end{cases}$$

其中, $r_{fit}$ 为空气单元适应度排名; $\alpha$ 为固定摩擦系数;g为重力加速度; $x_{opt}$ 为当前单元的最优位置;  $x_{eur}$ 、 $u_{eur}$ 分别为空气单元当前位置和速度; $x_{new}$ 、 $u_{new}$ 分别为空气单元更新后的位置和速度; $u_{eur}^{otherdim}$ 为空 气单元在随机维空间的速度;R为理想气体常数;T为温度;c为系数; $\Delta$ 为单位更新时间。算法中不变的参数为 $\alpha$ 、R、T、g、c。

WDO 算法流程如下。

a. 初始化空气单元的位置和速度,设定算法参数、群体规模、最大迭代次数、速度边界和空气单元 位置边界以及适应度函数。对于约束函数,可将其 作为罚函数加入目标函数中作为最终适应度函数。

**b.** 计算当前空气单元的适应度函数,记录最优 空气单元。

c. 利用式(13)更新空气单元的位置和速度。

**d.** 若空气单元的速度越界或空气单元的位置 越界,则将其置于临界值。

e. 返回步骤 b,若当前空气单元适应度函数优 于记录最优空气单元适应度函数,更新最优空气单 元。继续循环直到达到最大迭代次数。

在 WDO 算法中,重力作用使空气单元在优化边 界内运动,自转偏向力提高了跳出局部最优的能力, 同时增强了空气单元的稳定性<sup>[11]</sup>。相比粒子群优 化(PSO)算法以及其他智能算法,WDO 算法具有更 好的寻优性能。本文建立的双层规划模型要求收敛 精度高,收敛速度快,选用 WDO 算法可以更有效地 收敛到全局最优解。

#### 3.2 无功智能协调配置双层模型求解策略

首先对空气单元进行离散变量十进制编码。上 层优化变量 X 是电容器和电抗器的配置位置和容 量,假设可选的单组电容器或电抗器容量给定,将投 运容量等效为投运台数进行编码。同时,通过灵敏 度分析初步选定 N<sub>CR</sub>个配置无功补偿装置的候选节 点,并进行对应编码,得到的上层决策变量表示为:

$$X: [+C_1, \cdots, +C_i, \cdots, +C_{N_{\text{CR}}}, -R_1, \cdots, -R_j, \cdots, -R_{N_{\text{CR}}}]$$
(14)

实际对应的解码为:在节点 i 处配置  $C_i$  台电容器,在节点 j 处配置  $R_i$  台电抗器。

下层优化变量 Y 为有载变压器分接头位置以及 无功补偿装置投入容量,可以表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_{1,1}, \cdots, \mathbf{m}_{1,S_e}, \cdots, \mathbf{m}_{4,1}, \cdots, \mathbf{m}_{4,S_e} \end{bmatrix} \\ \mathbf{m}_{d,t} = \begin{bmatrix} \underline{T}_{d,t,1}, \cdots, \underline{T}_{d,t,k}, \underbrace{+c_{d,t,1}, \cdots, +c_{d,t,N_e}}_{\#,N_e\uparrow}, \\ \underbrace{-r_{d,t,1}, \cdots, -r_{d,t,N_e}}_{\#,N_e\uparrow} \end{bmatrix} \end{cases}$$
(15)

实际对应解码为:

$$\begin{cases} t_{d,t,k} = 1 + T_{d,t,k} \Delta t \\ Q_{d,t,i}^{C} = c_{d,t,i} \Delta V_{C} \\ Q_{d,t,j}^{R} = r_{d,t,j} \Delta V_{R} \end{cases}$$
(16)

其中, $m_{d,t}$ 为第d个典型日第t时段有载变压器分接 头位置以及无功补偿装置投入容量向量; $T_{d,t,k}$ 、  $c_{d,t,i}$ 、 $r_{d,t,j}$ 分别为第d个典型日第t时段变压器分接 头档位、投入电容器组数量、投入电抗器组数量; $\Delta t$ 为变压器分接头调节步进量。共有 4 个典型日, $S_e$ 个时段。

具体的优化步骤如下。

**a**. 设定上下 2 层优化算法空气单元的群体规模  $N_{upper}$ 和  $N_{lower}$ 、最大迭代次数以及 WDO 算法参数,随 机初始化由  $N_{upper}$ 个空气单元组成的集合  $P_{upper,0}$ 和上 层初始速度。

**b**. 在上层集合 *P*<sub>upper,0</sub>中的配置方案 *X<sub>i</sub>* 的范围 内随机初始化下层单元集合 *P*<sub>lower,0</sub>,初始化下层空 气单元速度。将下层适应度函数式(11)作为 WDO 算法的目标函数,在满足下层约束条件式(5)— (9)、(12)的情况下,调用 WDO 算法对下层协调模 型进行优化求解,得出最优解  $Y_{opti}$ ,记录  $Y_{opti}$ 对应的下层适应度函数  $f_{onti}$ 。

**c**. 返回步骤 **b** 直到计算出上层初始集合  $P_{upper,0}$  中所有配置方案  $X_i$  对应的最优下层运行方案  $Y_{opti}$  和最优下层目标函数  $f_{opti}$ 。

**d.** 根据下层优化结果 *Y*<sub>opti</sub>修正 *X*<sub>i</sub>,修正公式如式(17)所示。调整上层配置台数以保证上层无功补偿装置配置容量无冗余,实现最大补偿装置利用率,并计算上层目标函数 *F*<sub>opti</sub>。

$$\begin{cases} C_i^* = \min(C_i, c_i) \\ R_i^* = \min(R_i, r_i) \end{cases}$$
(17)

其中,*c<sub>i</sub>*、*r<sub>j</sub>*分别为下层优化运行过程中电容器和电 抗器最大投切数目;*C<sup>\*</sup><sub>i</sub>*、*R<sup>\*</sup><sub>j</sub>*分别为更新后上层节点 配置电容器和电抗器数目。

e. 分别将上层适应度式(4)及上层约束条件式
(5)—(9)作为上层算法调用的目标函数和约束条件。调用 WDO 算法更新上层空气单元 P<sub>upper,0</sub>,返回步骤 c 直到达到设定的最大循环次数。

**f**. 记录最终得到的 $F_{opt}$ 、 $f_{opt}$ 、 $X_{opt}$ 、 $Y_{opt}$ 。 算法流程图见附录中图 A2。

## 4 算例与分析

#### 4.1 算例概述

以某地区 220 kV/110 kV/10 kV 电网为例,采 用本文所建立的优化模型进行无功的分解协调配 置。网架图如附录中图 A3 所示。

设节点电压允许变化区间为[0.95,1.05]p.u., 每个节点最多配置 10 组电容器组和 10 组电抗器 组,单组容量为 1 Mvar。可调变压器分接头档位步 长为 2.5%,分接头可调位置区间为[0.9,1.1]。根据 文献[1],理想功率因数设为 0.95。

无功智能协调配置双层模型求解策略中,网损 电价  $\alpha_1 = 0.45 \ \pi/(kW \cdot h), \alpha_2 = 30 \ \pi/Mvar.$  由于 电网安全稳定运行的前提是母线电压合格,在此基 础上追求网损最小,故上层目标函数中  $\alpha_1 E_{loss}, \alpha_2 E_V, E_{CR}$ 用 AHP 计算得到  $\eta_1, \eta_2, \eta_3$  分别为 0.258、 0.637 和 0.105。下层函数 $\xi_1, \xi_2, \xi_3$  均为 0.333。

典型日负荷数据经空间快速负荷分段法进行简 化,根据 Elbow 法得到最优分段数 S<sub>e</sub>=5,将负荷数 据简化成一组矩阵。节点 3、14、21 冬季最小典型负 荷日负荷及对应的拟合负荷如图 2 所示。

使用灵敏度分析法<sup>[16]</sup>得到无功补偿装置配置 候选节点为[42,37,36,32,30,3,2,8,9,14]。

双层 WDO 算法参数设置如下:上层迭代次数 50次,空气单元20个,上层常数参数α=0.8,*RT*=2, g=0.6,*c*=0.4;下层最大迭代次数100次,空气单元 50个,下层常数参数α=0.4,*RT*=3,g=0.2,*c*=0.2。

配置结果如表1所示。



#### 图 2 空间快速负荷分段结果

Fig.2 Results of space fast load partition

#### 表 1 无功智能优化协调配置方案

 
 Table 1 Intelligent optimization and coordination configuration scheme of reactive power

节点 -		配置数量			
		СВ	RB		
220.137	8	3	3		
220 KV	32	1	1		
	37	4	5		
110 kV	3	3	7		
	2	6	1		
	42	1	5		
10 kV	36	1	8		
	30	8	0		
	9	5	6		
	14	6	3		

## 4.2 算例分析

4.2.1 固定容量优化配置方案

实际中,通过参考电网相关规范,根据电压等级 和主变容量选择该地区电网无功补偿装置容量,这 是一种固定容量的无功装置规划方案,配置结果见 附录中表 A1。

在此配置方案的基础上进行运行优化,运行优化目标函数为式(4),决策变量为系统各无功补偿 设备投入容量,约束条件为式(5)—(9)、(12),优化 算法为单层 WDO 算法。

4.2.2 单层智能优化配置方案

为了进一步证明协调配置方案的优越性,参考 文献[17]中使用的无功优化数学模型,将不考虑运 行的单层优化配置模型作为对比算例。单层优化配 置模型以年综合运行收益作为运行优化目标函数, 以系统投入各无功补偿装置容量为决策变量。配置 结果见附录中表 A2。

4.2.3 算例结果对比分析

本文中优化前网络是指变压器分接头变比为1 且所有节点均未安装电容器组和电抗器组的电网。 表2给出采用固定容量的分层无功配置、单层无功 优化配置及协调优化的系统在各典型日的各指标情 况,表中电压改善量为标幺值。

Table 2         Comparison of optimization objects among							
	different opt	imization s	schemes				
优化指标	负荷 典型日	协调 优化	固定容量 的分层无 功配置	单层无 功优化 配置			
	夏季最大	953.67	968.43	930.87			
降损量/	冬季最大	801.15	423.24	534.45			
( kW•h)	夏季最小	468.88	239.89	327.53			
	冬季最小	673.72	328.23	492.34			
安装数量/台	_	77	141	69			
无功补偿装置 利用率/%	—	100	59.7	100			
	夏季最大	14.809 0	13.731 9	14.823 1			
由正事業具	冬季最大	12.511 6	11.691 3	10.053 2			
电压以音重	夏季最小	16.843 9	12.864 5	13.482 9			
	冬季最小	18.226 4	13.278 5	15.450 2			
	夏季最大	28.873 0	32.753 6	30.563 3			
壬也不灭衡审	冬季最大	20.956 8	47.423 0	39.392 2			
元功小丁寅及	夏季最小	23.574 3	42.720 2	36.352 3			
	冬季最小	26.789 5	67.144 9	50.330 4			
··· · ·······························	上四七山口云山	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	다 코노 커티 신신 카는 명	9*6 E L			

表 2 不同优化方案下优化目标对比

注:无功补偿装置利用率指运行投入无功补偿装置数量占 配置无功补偿装置数量的百分比。

对比可知,从降损量和电压改善量指标来看,固 定容量的分层无功配置和单层无功优化配置方案在 夏季最大负荷典型日的表现与协调优化相当,但是 协调优化在小负荷时的表现明显优于其他2种配置 模式。从安装成本和无功补偿装置利用率来看:固 定容量的分层无功配置安装成本最高,利用率最低; 单层无功优化配置结果安装成本最低,无功补偿装 置利用率达到100%。从无功不平衡度指标来看:由 于固定容量的分层无功配置10 kV 层并未配置电抗 器组,故其无功潮流层级流动情况最为严重;单层无 功优化配置方案未将无功不平衡度作为优化目标, 故仅相对减少了层级间无功潮流流动;协调优化运 行结果的无功不平衡度明显优于其他2种优化 方案。

综合来看,协调优化方案可以在较低成本下实 现降损、稳压、减少无功潮流层级流动的作用。

图 3 为优化前模型及采用 3 种优化方案的模型 在 4 个典型日 12:00 的系统电压分布,图中节点电 压均为标幺值。可以看出:通过协调优化配置,4 个 典型日全网电压水平有明显改善,均在国家规定的 电压波动范围内;固定容量的分层无功配置方案和 协调优化方案在夏季最大负荷典型日和冬季最大负 荷典型日补偿效果均尚可;在冬季最小负荷典型日 时,固定容量的分层无功配置方案的效果劣于单层 无功优化配置,协调优化配置结果最为理想。

固定容量的分层无功配置和协调优化冬季最小 典型日12:00的潮流断面图见附录中图A4,从图中 可看出,协调优化明显抑制了无功倒送的情况,而固 定容量的分层无功配置和单层无功优化配置方案仍



#### 图 3 不同优化方案 12:00 节点电压分布对比图

Fig.3 Comparison of node voltage distribution at 12:00 among different optimization shemes

出现了无功潮流倒送的情况。

为了进一步验证补偿效果,测试协调优化无功 策略无功补偿结果的鲁棒性,以冬季最小典型负荷 日在 24:00 的负荷为基准,假定全网负荷按恒功率 因数在[0.6,2]p.u. 范围内变化。考虑到无功倒送 问题出现在轻负荷场景下的概率更大,因此本文选 择电网中负荷较轻的点进行展示,得到系统某节点 电压和负荷增长水平的关系,测试结果如图 4 所示 (图中电压为标幺值)。

结合图 4 可知:固定容量的分层无功配置在一 定程度上可以增强电网的鲁棒性,在重载时表现良 好,但是忽略网架和负荷实际特征会造成大量的浪 费;单层无功优化配置方案配置成本较低,但是对电 网的稳定性改善有限;本文提出的协调优化方案可 以适应负荷变化范围更大的电网,不仅可以在低负 荷状态下显著改善电网电压水平,而且可以在高负



Fig.4 Voltage curve under different load levels with same power factor

荷状态下以较经济的方式实现与固定容量的分层无 功配置几乎相近的无功优化效果,同时增大了网架 可承受最大负荷值。

## 5 结论

本文针对电缆化率高、负荷波动大的城市电网, 使用空间快速负荷分段法进行负荷简化,建立了无 功智能协调配置双层模型,同时考虑配置决策和优 化运行,选择双层 WDO 算法进行求解,对电容器组 和电抗器组进行综合优化配置,算例结果验证了模 型的有效性和合理性。

a. 通过建立动态负荷简化模型,简化空间负荷 曲线并自动满足无功设备的动作要求,较好地解决 了高维非线性且时空耦合的复杂优化问题。

b. 根据电网实际网架结构对模型进行合理分层,下层目标函数有效减少了不同电压等级间的无 功潮流流动,抑制无功倒送。协调配置方案能获得 最大无功补偿装置利用率,并实现较好的补偿结果。

c. 双层协调配置优化方案可兼顾配置决策和优 化运行,可在不同负荷水平下有效降低网损,改善电 压质量,同时兼顾规划的经济效益,优于静态固定容 量的分层无功配置、单层无功优化配置方案,提高了 电网电压的平稳性和鲁棒性,扩大了电网安全运行 范围。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

- [1] 江秀臣,蔡军,董小兵,等. 110 kV 及以上电压等级交联电缆在 线监测技术[J]. 电力自动化设备,2005,25(8):13-17.
   JIANG Xiuchen, CAI Jun, DONG Xiaobing, et al. On-line monitoring techniques for 110 kV and above XLPE cable[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(8):13-17.
- [2] 国家电网公司. 城市配电网技术导则:Q/GDW 370—2009[S]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [3] 李滨,韦化,李佩杰. 电力系统无功优化的内点非线性互补约束 算法[J]. 电力自动化设备,2010,30(2):53-58. LI Bin,WEI Hua,LI Peijie. Interior-point nonlinear algorithm with

complementarity constraints for reactive-power optimization [ J ]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2); 53-58.

- [4]高慧敏,章坚民,江力. 基于二阶网损无功灵敏度矩阵的配电网 无功补偿选点[J]. 电网技术,2014,38(7):1979-1983.
   GAO Huimin,ZHANG Jianmin,JIANG Li. Optimal location of reactive power compensation for distribution network based on second order loss-reactive power sensitivity matrix[J]. Power System Technology,2014,38(7):1979-1983.
- [5] 李国庆,姜涛,徐秋蒙,等. 基于局部电压稳定指标的裕度灵敏度分析及应用[J]. 电力自动化设备,2012,32(4):1-5.
   LI Guoqing,JIANG Tao,XU Qiumeng,et al. Sensitivity analysis based on local voltage stability margin and its application [J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(4):1-5.
- [6]张志强,苗友忠,李笑蓉.电力系统无功补偿点的确定及其容量 优化[J].电力系统及其自动化学报,2015,27(3):92-97.
   ZHANG Zhiqiang,MIAO Youzhong,LI Xiaorong. Location selection of reactive power compensation and compensation capacity optimization[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2015,27(3):92-97.
- [7]杨克难,吴浩,郑宁浪.一种基于潮流追踪的电力系统无功补偿 方法[J].电力系统自动化,2012,36(8):45-51.
   YANG Kenan, WU Hao,ZHENG Ninglang. A method for power system reactive power compensation based on power flow tracing[J].
   Automation of Electric Power Systems,2012,36(8):45-51.
- [8] 刘丽军,李捷,蔡金锭. 基于强引导粒子群与混沌优化的电力系 统无功优化[J]. 电力自动化设备,2010,30(4):71-75.
   LIU Lijun,LI Jie, CAI Jinding. Reactive power optimization based on induction-enhancedparticle swarm optimization and chaos search [J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(4):71-75.
- [9] 周鑫,诸弘安,马爱军. 基于多种群蚁群算法的多目标动态无功 优化[J]. 电网技术,2012,36(7):231-236.
   ZHOU Xin,ZHU Hong'an, MA Aijun. Multi-objective dynamic reactive power optimization based on multi-population ant colony algorithm[J]. Power System Technology,2012,36(7):231-236.
- [10] 黄小庆,阮驰骋,邹佳芯,等.考虑电网特性的动态无功优化配置方法[J].电力自动化设备,2016,36(9):127-133.
   HUANG Xiaoqing,RUAN Chicheng,ZOU Jiaxin, et al. Optimal dynamic var configuration considering grid characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(9):127-133.
- [11] BAYRAKTAR Z, KOMURCU M, BOSSARD J A, et al. The wind driven optimization technique and its application in electromagnetics
   [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(5): 2745-2757.
- [12] GENG Guangfei, LIANG Jiaqi, HARLEY R G, et al. Load profile partitioning and dynamic reactive power optimization [C] // 2010 International Conference on Power System Technology. Zhejiang, China: [s.n.], 2010:1-8.
- [13] BARD J F. Practical bilevel optimization : algorithms and applications[M]. [S.I.]:Springer, 1998:144-146.
- [14] 曹一家,姚欢,黄小庆,等. 基于 D-S 证据理论的变电站通信系统信息安全评估[J]. 电力自动化设备,2011,31(6):1-5.
  CAO Yijia,YAO Huan,HUANG Xiaoqing, et al. Security evaluation of substation communication system based on D-S theory [J].
  Electric Power Automation Equipment,2011,31(6):1-5.
- [15] 阳育德,龚利武,韦化. 大规模电网分层分区无功优化[J]. 电网技术,2015,39(6):1617-1622.
  YANG Yude,GONG Liwu,WEI Hua. Reactive power optimization of large power grid under voltage-grading and district-dividing[J]. Power System Technology,2015,39(6):1617-1622.
- [16] 刘君华,方鸽飞,吕岩岩. 基于灵敏度法确定无功补偿地点[J].

电力系统及其自动化学报,2006,18(4):58-61.

LIU Junhua, FANG Gefei, LÜ Yanyan. Allocation of reactive compensation usingsensitivity analysis approach [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18(4):58-61.

[17] 任新伟,徐建政.改进细菌群体趋药性算法在无功优化中的应 用[J].电力系统及其自动化学报,2015,27(5):81-85.

REN Xinwei, XU Jianzheng. Application of improved bacterial colony chemotaxis algorithmin reactive power optimization [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(5):81-85.

#### 作者简介:

朱 瞳形(1995—), 女, 安徽芜湖人, 硕士研究生, 主要研究 方向为电力系统优化规划(**E-mail**:xiaowo1822@sjtu.edu.cn);



顾 洁(1971—),女,上海人,副教授, 博士,主要研究方向为电力市场及电力系 统优化规划(**E-mail**;gujie@sjtu.edu.cn);

金之俭(1965—),男,上海人,教授,博 士研究生导师,博士,研究方向为智能电网 技术、电力设备在线监测技术、超导应用技 术(E-mail:zjjin@sjtu.edu.cn);

储琳琳(1978—), 女, 浙江海盐人, 工程师, 研究方向为 负荷预测及电网规划(E-mail: chull@sina.com):

张宇俊(1975—), 女, 上海人, 高级工程师, 研究方向为 电网规划(**E-mail**: zhangjy@sina.com)。

# Intelligent harmonious collocation for reactive power compensation of distribution network combining planning and operation

ZHU Tongtong<sup>1</sup>, GU Jie<sup>1</sup>, JIN Zhijian<sup>1</sup>, CHU Linlin<sup>2</sup>, ZHANG Junyu<sup>2</sup>

(1. Research Center for Big Data Engineering and Technologies, School of Electronic Information and Electrical Engineering,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shinan Power Supply Company of SMPEC, Shanghai 200233, China) Abstract: The spatial fast load segmentation method is adopted to establish the dynamic load model to remove the time complexity of spatial load, on this basis, a bi-level intelligent harmonious collocation model for reactive power compensation is built with the combination of planning and operation. The upper-level planning model optimizes the collocation of installation location, type and capacity of reactive power compensation equipments, while the lowerlevel operation model comprehensively considers different load scenarios to optimize the switching schemes of the equipments, which makes power system achieve hierarchical reactive power balance. The bi-level wind-driven algorithm is adopted to solve the model. The case results show that the proposed reactive power compensation scheme can obtain good compensation effect under different load scenarios, verifying the rationality and validity of the proposed model and algorithm.

Key words: reactive power harmonious collocation; bi-level optimization; hierarchical balance; dynamic load

(上接第7页 continued from page 7)

## Robust parameter identification of distribution line based on micro PMU

XUE Ancheng<sup>1</sup>, XU Feiyang<sup>1</sup>, YOU Hongyu<sup>1,2</sup>, XU Jingsong<sup>1</sup>, Kenneth E. Martin<sup>3</sup>, BI Tianshu<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Grid Shanghai Electric Power Company,

Shanghai 200122, China; 3. Electric Power Group, Pasadena, CA 91101, USA)

Abstract: Micro PMU (Phasor Measurement Unit) provides the foundation for improving the observability and controllability of intelligent distribution network. A robust identification method for the distribution line parameters based on micro PMU is studied. Aiming at the asymmetric operation of three-phase distribution network, the three-phase  $\pi$ type equivalent model of distribution lines based on phase component description is established, and then the line parameter identification method based on the LS (Least Squares) algorithm is proposed considering multiple sets of voltage and current phasor data at both ends of lines provided by micro PMUs, which is based on the phase component model and is suitable for asymmetrical operation of distribution network. And two robust estimation methods are introduced, one is HRLS(Huber estimation based Robust Least Squares) algorithm and the other is MRLS(Median estimation based Robust Least Squares) algorithm. In the system whose neutral point is grounded by arc suppression coil or low resistance, the proposed method only requires the voltage and current phasor at both ends of lines to identify the phase parameters and obtain the positive and zero sequence parameters of lines. In the neutral ungrounded system, the proposed methods can identify the positive sequence parameters of lines when the system is in normal operation since there is no zero sequence current component. The effectiveness of the proposed method is verified and the advantages and disadvantages of two robust methods in identification precision and computing time are compared by example simulation. Simulative results show that MRLS algorithm has better robust performance and less computing time.

Key words: distribution lines; micro PMU; robust parameter identification; phase components method; least squares algorithm; Huber estimation; median estimation; neutral grounding modes



图 A2 双层风驱动算法流程图

Fig.A2 Flowchart of bilayer WDO algorithm

附录



图 A3 算例网架图



Fig.A4 Sectional drawing of power flow

## 表 A1 固定容量无功优化配置方案

Table A1 Configuration scheme of reactive power compensation with fixed capacity

节点(220kV)	8	32	-	-	-	-	-	-	-	-
CB(组)	10	10	-	-	-	-	-	-	-	-
RB(组)	6	6	-	-	-	-	-	-	-	-
节点(110kV)	39	37	36	33	12	28	9	5	3	2
CB(组)	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
RB(组)	0	0	0	6	6	0	6	0	6	0
节点(10kV)	44	42	26	21	19	14	18	23	12	17
CB(组)	3	3	3	3	2	2	3	2	2	2
RB(组)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

## 表 A2 单层无功优化配置方案

Table A2 Configuration scheme of monolayer reactive power compensation

节点(220kV)	8	32	-	-	-
CB(组)	2	1	-	-	-
RB(组)	1	3	-	-	-
节点(110kV)	37	3	2		-
CB(组)	2	4	4		-
RB(组)	6	3	5		-
节点(10kV)	42	36	30	9	14
CB(组)	0	7	4	5	3
<b>RB(</b> 组)	6	5	2	5	2