

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.222

引用格式:王新玲,颜伟,蒋望. 电源“空心化”电网的协调二级电压控制优化方法[J]. 重庆大学学报, 2026, 49(3): 38-48.



# 电源“空心化”电网的协调二级电压控制优化方法

王新玲<sup>1</sup>, 颜伟<sup>1</sup>, 蒋望<sup>2</sup>

(1. 重庆大学输变电装备技术全国重点实验室, 重庆 400044;

2. 国网重庆市电力公司电力调度控制中心, 重庆 400014)

**摘要:**针对大型枢纽城市电网负荷中心缺少灵活、连续调节无功电源的多电压等级网络现状, 文中提出了电源“空心化”电网的协调二级电压控制优化方法。该方法将区域内所有可控发电厂的高压母线节点泛化为区域主导节点, 以高压母线节点电压与其理想电压的偏差平方和最小为目标, 实现区域电压无功控制; 同时区分了同级和上下级分区之间的协调关系, 新增上下级区域之间关口无功和关口电压协调变量及其理想偏差控制目标, 以提升下级电压层电压无功支撑能力不足区域的控制效果。最后, 以标准算例组合系统和实际数据, 仿真验证了论文所提方法在负荷中心电源“空心化”网络中区域电压无功控制的有效性。

**关键词:**二级电压控制; 自动电压控制; 协调控制; 交直流系统

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2026)03-038-11

## A decentralized coordinated optimization method for secondary voltage control in large urban power grids

WANG Xinling<sup>1</sup>, YAN Wei<sup>1</sup>, JIANG Wang<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Electric Power Dispatching and Control Center of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400014, P. R. China)

**Abstract:** In large hub city power grids, load centers often lack flexible and continuously adjustable reactive power sources across multiple voltage levels, leading to a “hollowing-out” of power supply. This paper proposes a coordinated two-level voltage control optimization method tailored for such “hollowed-out” power grids. In this method, the high-voltage busbar of all controllable power plants within a region are generalized as voltage-dominant nodes, and regional voltage regulation is achieved by minimizing the sum of squared deviations between the busbar voltages and their reference values. Meanwhile, the coordination relationships among upper-level and lower-level regions are explicitly distinguished, and threshold-based control objectives between hierarchical

收稿日期: 2024-01-15 网络出版日期: 2024-07-23

基金项目: 国网重庆市电力公司科学技术项目 (SGCQ0000DKJS2310217)。

Supported by State Grid Chongqing Electric Power Company Science and Technology Project (SGCQ0000DKJS2310217).

作者简介: 王新玲 (1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统无功优化与控制, (E-mail)951613840@qq.com。

通信作者: 颜伟, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统调度、交易与规划研究, (E-mail)cquyanwei@cqu.edu.cn。

regions are introduced to improve the reactive power support capability of lower-level areas. The effectiveness of the proposed method for regional reactive voltage control in hollowed-out power networks is verified through simulations using a standard test system combined with actual grid data from China.

**Keywords:** secondary voltage control; automatic voltage control; coordinated control; AC-DC system

自动电压控制(automatic voltage control, AVC)是省级及以上电网的调度自动化系统。作为现代电网自动控制系统的核心功能,通常采用分级控制策略<sup>[1]</sup>实现连续调节设备的空间协调优化<sup>[2]</sup>。二级电压控制是分级控制中承上启下的关键环节,基于无功控制分区<sup>[3]</sup>的局部电网为优化对象,以满足节点电压安全、实现无功分布均衡为目标,对于提高电网电压质量、降低网损、增加稳定储备具有重要作用。

为实现“双碳”目标,构建新型电力系统<sup>[4]</sup>,可再生能源得到了大力发展。随着可再生能源的占比日益增大,大量集中式<sup>[5-6]</sup>或分布式<sup>[7]</sup>可再生能源直接馈入负荷中心,大幅度减少火电机组的装机容量及其运行时间。导致大型城市电网(省级电网)负荷中心呈现能源保障充足而灵活性不足的电源“空心化”现象,由此给系统带来了突出的暂稳态电压支撑和控制问题。现有研究主要关注电源“空心化”带来的暂态电压支撑问题<sup>[8-11]</sup>。在稳态电压控制方面,考虑了高占比新能源出力随机性<sup>[12]</sup>和特高压直流输电系统<sup>[13-14]</sup>接入的影响,尚未关注其对电压无功分层分区控制的影响。

实际AVC系统中,电压无功的分层分区控制由二级电压控制来实现。电源“空心化”给枢纽城市电网的二级电压控制带来了很大困难,具体如下:

1)常规二级电压控制中,一个分区通常选择1个或少数几个枢纽母线作为电压主导节点。这些节点需要具有可控性和可观性<sup>[15]</sup>,即要求主导节点为主要发电厂或者枢纽变电站母线,同时通过主导节点的电压控制能保证区域内大部分节点的电压质量。但是,在电源“空心化”的大型城市电网中,特高压交流变电站、直流换流站和其他500 kV厂站之间常常通过多个环网彼此互联,成为强耦合的超大型区域电网。由于高电压层厂站之间耦合密切、潮流方向多变,超大型分区电网中具有电源代表性的枢纽母线不一定具有可观性。由此,给高电压层区域电网主导节点的选择与区域节点电压控制带来很大困难。

2)对于同一AVC所辖的多电压等级电源“空心化”电网,包含500 kV的超大型分区和常规分区电网,可能还包含下级多个220 kV的分区电网。分布式可再生能源大规模接入下级电网,使部分220 kV分区也缺少灵活的连续可调资源。对于这些220 kV分区电网,其负荷母线的电压水平主要由上级电网决定。因此,对电源“空心化”的大型城市电网二级电压控制,不仅要考虑同一电压等级分区电网之间的无功协调问题,还需要考虑上下级分区电网之间的电压协调问题。如何考虑上下级分区电网之间的电压协调要求是二级电压控制亟待解决的新问题。

现有二级电压控制方法强调分区的独立控制,以区域内主导节点电压偏差目标和发电机的无功备用均衡目标等<sup>[16]</sup>。相关研究一般假设各区域之间弱耦合,通过无功分区和主导节点的选择,避免区域之间电压无功调节的相互影响。但是,随着区域之间联系的日益紧密,不考虑相邻分区无功影响的二级电压控制常常出现主导节点电压振荡问题。为此,一些学者研究了考虑分区耦合影响的二级电压控制方法,可分为3类:第一类假设通过区内无功的控制,实现区域之间联络线无功<sup>[17]</sup>或者边界节点电压<sup>[18]</sup>的波动量最小。第二类是认为外区的无功波动影响不能忽略,刘小波等<sup>[19]</sup>用ward等值的注入无功增量来简化表示,建立基于ward等值的单一区域二级电压控制模型来近似实现区域之间的无功协调。第三类认为区域之间无功调节的相互影响不能忽略,使用机组调节无功对区内区外节点电压的全局灵敏度表示。由此建立基于全局灵敏度的多区域协调二级电压控制模型<sup>[20-22]</sup>。上述3类方法中,第三类属于全局优化问题,需要共享多区域的全局模型状态信息,虽然其协调性能更好,但计算和实现都较困难。第一和第二类属于分区的解耦控制策略,对区域之间的通信要求低,工程实现比较容易。

但是上述多区域协调方法,主要强调区域二级电压控制之间的相互影响,忽略了三级电压控制全局优化的协调作用。理论上,全局的三级电压控制优化不仅能确定最优的主导节点电压理想值,还能确定区域之间联络线无功和边界节点电压的理想协调目标。通过二级电压控制的多区域协调优化,实现以上理想偏差最小,可显著提升其协调优化性能。苏辛一等<sup>[23]</sup>设计了区域电压控制偏差的协调变量,考虑了联络线无功和边界节点电压的影响,但是如何将其应用于二级电压控制仍需进一步研究。

## 1 电源“空心化”电网的分区无功控制问题特征

以中国某地的实际电网为例,其省调AVC所辖范围包括500 kV和220 kV的2个电压等级电网,含500 kV发电厂78个、直流换流站2个、特高压交流变电站2个,属于典型的受端电网。从无功的控制分区角度,该电网共分为4个500 kV和17个220 kV区域电网。其中,有3个500 kV区域电网的源-荷规模适中,通过常规的二级电压控制,可以满足分区无功平衡和电压质量的控制要求。但有1个500 kV的中心城市电网,其规模最大,具有典型的电源“空心化”区域电网特征,下文简称“空心化”电网,其电网示意图如图1所示。

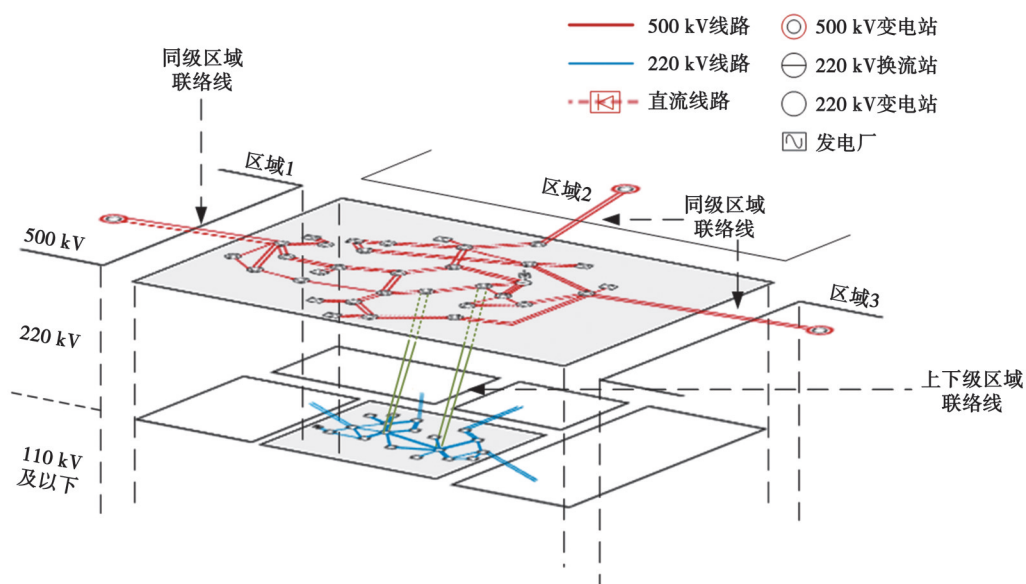


图1 “空心化”电网示意图

Fig. 1 “Hollowed-out” grid

“空心化”电网内含有29个负荷变电站、11个发电厂和1个直流换流站。区内的11个发电厂都离负荷中心较远,其500 kV出线数平均为2回,最多只有4回,且只有1个发电厂出线数为4回。500 kV的负荷变电站互联密切,进出线大于等于4回的枢纽变电站共有26个。若依据节点电源性和电压代表性,这些枢纽变电站的500 kV母线都可以作为区域主导节点。由此区域主导节点的个数远多于发电厂个数,将导致这些主导节点电压不可控。反之,若严格按照灵敏度的数值大小选择少数几个主导节点,虽然能解决主导节点电压的可控性问题,但又会导致负荷母线电压不可控。

“空心化”电网与同级的3个500 kV区域电网相连,同时还与下级的8个220 kV区域电网相连。其中,含有充足电源(这里指220 kV发电厂)的220 kV区域电网有5个,含有少量电源的有3个。500 kV与220 kV之间都通过2个或者3个500 kV变电站形成电磁环网。为了满足同级或者上下级无功的分区平衡要求,需要控制联络线或者联络变压器的无功功率。另外,由于电源不足或者缺少电源,220 kV的区域电网需要“空心化”电网提供稳态电压支撑。

## 2 电源“空心化”电网的协调二级电压控制

文中充分考虑三级电压优化<sup>[24]</sup>对二级电压分区控制的理想目标参考作用、上级区域对下级区域关口节点电压的支撑作用和去中心化的主导节点泛化要求,构建了电源“空心化”电网的协调二级电压控制优化模型:针对电源“空心化”区域电网电压主导节点选择困难的问题,新模型将区域内所有发电厂高压母线都泛化为主导节点,以满足主导节点选择的可控性与可观性要求。针对电源“空心化”分区电网与同级/下级分区电网之间的电压无功协调要求,新模型不仅考虑了分区之间联络线/联络变无功的理想偏差目标,而且还考虑了下级关口节点电压的理想偏差目标。同时,为了充分体现三级电压优化对二级电压控制决策的引导作用,新模型将三级电压全局优化的最优值作为二级电压控制的理想目标参考值,以此来建立中枢点、关口节点、联络线/联络变无功的理想偏差目标和发电机无功的出力均衡目标。

### 2.1 目标函数

基于上述思路构建的协调二级电压控制优化模型具体如下:

$$\min_{\Delta U_g} \left\{ W_h \left\| (U_h^0 - U_h^{\text{ref}}) + C_h \Delta U_g \right\|^2 + W_c \left\| (U_c^0 - U_c^{\text{ref}}) + C_c \Delta U_g \right\|^2 + W_l \left\| (Q_l^0 - Q_l^{\text{ref}}) + C_l \Delta U_g \right\|^2 + W_g \left\| \mu_g \right\|^2 \right\}, \quad (1)$$

$$\mu_{gi} = \frac{Q_{gi}^0 + C_{gi} \Delta U_g - Q_{gi}^{\text{ref}}}{Q_{gi}^{\text{max}} - Q_{gi}^{\text{min}}}, i = 1, 2, 3, \dots, n_g. \quad (2)$$

式中: $W_h$ 、 $W_c$ 、 $W_l$ 、 $W_g$ 为4个目标的权重,具体数值一般由专家经验给出,且 $W_h$ 、 $W_c > W_l$ 、 $W_g$ ;  $U_h^0$ 和 $U_h^{\text{ref}}$ 分别为发电厂高压母线电压向量的初值和理想值,维数均为 $n_h \times 1$ ;  $U_c^0$ 和 $U_c^{\text{ref}}$ 分别为上下级区域关口电压向量的初值和理想值,维数均为 $n_c \times 1$ ;  $\Delta U_g$ 为发电机机端电压调节量,维数为 $n_g \times 1$ ;  $Q_l^0$ 和 $Q_l^{\text{ref}}$ 分别为区域联络线传输无功向量的初值和理想值,维数均为 $n_l \times 1$ ;  $\mu_g$ 为区域发电机无功出力均衡因子向量,维数为 $n_g \times 1$ ;  $Q_g^0$ 、 $Q_g^{\text{max}}$ 、 $Q_g^{\text{min}}$ 和 $Q_g^{\text{ref}}$ 分别为区域发电机无功出力初值、最大值、最小值和理想值,维数均为 $n_g \times 1$ ,  $i$ 为区域中发电机编号;  $C_h$ 、 $C_c$ 分别为区域发电厂高压母线电压和上下级区域关口电压对发电机机端电压的灵敏度矩阵,维数分别为 $n_h \times n_g$ 、 $n_c \times n_g$ ;  $C_l$ 、 $C_g$ 分别为区域间联络线交换无功和区域内可控发电机无功出力对发电机机端电压的灵敏度矩阵,维数分别为 $n_g \times n_g$ 、 $n_l \times n_g$ ;  $n_g$ 、 $n_h$ 、 $n_c$ 、 $n_l$ 分别为区域受控发电厂节点、发电厂高压母线节点、上下级区域关口节点个数和区域联络线条数(包括同级和上下级区域联络线)。

式(1)和式(2)中的 $U_c^{\text{ref}}$ 、 $U_h^{\text{ref}}$ 、 $Q_l^{\text{ref}}$ 和 $Q_g^{\text{ref}}$ 都是三级电压优化的最优值。文献[17-18]也有类似的偏差目标,但其偏差是无功或者电压相对初值的偏差,为二级电压优化前后的波动偏差。考虑波动偏差目标是为了尽量减小区内无功控制对外区的影响。而文中设计的理想偏差目标,是为了使区内的无功控制尽量实现全局优化的效果。

### 2.2 约束条件

文中模型约束条件主要为各区域发电厂调节能力约束和区域节点电压安全运行约束,具体如下:

1) 发电厂高压母线电压单步调节约束

$$\Delta U_h = C_h \Delta U_g, \quad (3)$$

$$|\Delta U_h| \leq \Delta U_{h, \text{max}}, \quad (4)$$

式中: $\Delta U_h$ 和 $\Delta U_{h, \text{max}}$ 为发电厂高压母线电压的单次调节量及其单次最大调节量,维数为 $n_h \times 1$ 。

2) 发电厂高压母线电压安全运行约束

$$U_{h, \text{min}} \leq U_{h, 0} + \Delta U_h \leq U_{h, \text{max}}, \quad (5)$$

式中: $U_{h, 0}$ 、 $U_{h, \text{min}}$ 和 $U_{h, \text{max}}$ 分别为发电厂高压母线电压的初值、最小值和最大值,维数均为 $n_h \times 1$ 。

3) 上下级区域关口电压安全运行约束

$$U_{c, \text{min}} \leq U_{c, 0} + C_c \Delta U_g \leq U_{c, \text{max}}, \quad (6)$$

式中: $U_{c, 0}$ 、 $U_{c, \text{min}}$ 和 $U_{c, \text{max}}$ 分别为上下级区域关口电压的初值、最小值和最大值,维数均为 $n_c \times 1$ 。

4) 发电机无功出力的安全运行约束

$$Q_{g, \text{min}} \leq Q_{g, 0} + C_g \Delta U_g \leq Q_{g, \text{max}}, \quad (7)$$

式中: $Q_{g, 0}$ 、 $Q_{g, \text{min}}$ 和 $Q_{g, \text{max}}$ 分别为发电机无功出力的初值、最小值和最大值,维数均为 $n_g \times 1$ 。

## 5) 发电机机端电压的安全运行约束

$$U_{g,\min} \leq U_{g,0} + \Delta U_g \leq U_{g,\max}, \quad (8)$$

式中： $U_{g,0}$ 、 $U_{g,\min}$ 和 $U_{g,\max}$ 分别为发电机机端电压的初值、最小值和最大值，维数均为 $n_g \times 1$ 。

文中所建的二级电压控制优化模型由式(1)~(8)构成，其中的灵敏度采用潮流模型牛拉法的雅可比矩阵获得，具体见文献[16]。上述模型为二次规划模型，文中采用Cplex求解。

## 3 算例仿真

## 3.1 基于标准算例数据的仿真分析

## 3.1.1 仿真算例基础数据

IEEE39标准节点系统发电机多接入线路末端，负荷中心没有直接支撑的电源。基于2个IEEE39标准节点系统和1个IEEE11节点系统构造仿真算例，如图2所示。其中一个IEEE39节点系统为研究对象，在节点36、39旁增加发电机高压母线节点40、41，模拟发电厂迁出负荷中心；增加各负荷节点之间的连接支路，采用双回线(线路参数与原始数据保持一致)使得区域间负荷节点联系紧密。将另一个IEEE39节点系统作为同级其他区域，增加平级区域之间的联络线，系统各新增支路具体参数如表1所示。同时，将节点23、24作为上下级区域关口，接入IEEE11节点系统作为下级的一个区域。

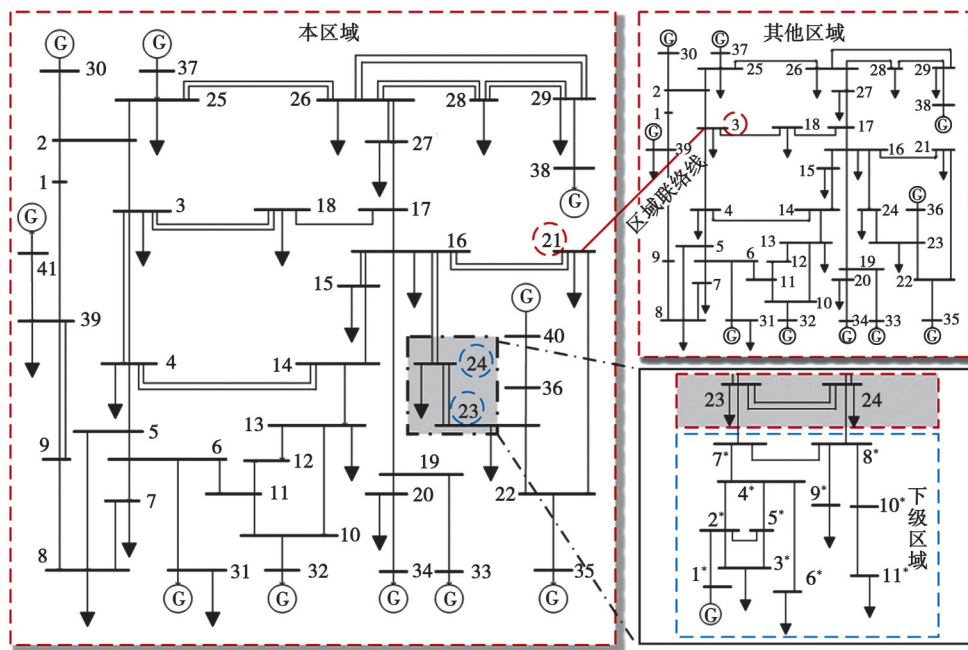


图2 文中算例网络图

Fig. 2 Examples of network

表1 文中算例网络中各新增线路参数

Table 1 Parameters of each new line in the networks

支路	电阻/p.u	电抗/p.u	电纳/p.u	变比/p.u
36~40	0	0.020 0	0	1.02
39~41	0	0.020 0	0	1.02
平级区域联络线	0.000 8	0.012 9	0.000 8	1.00
23~7*	0	0.026 7	0	1.01
24~8*	0	0.038 2	0	1.01

注：\*表示下级区域编号

为验证负荷中心电源“空心化”区域,即文中算例没有明显的主导节点,基于主导节点的可观性特征<sup>[15]</sup>,计算文中算例和初始算例(IEEE39节点接入同级区域和下级区域以外,未增加其他支路)各待选主导节点对负荷节点电压无功灵敏度平均值,结果如图3所示。

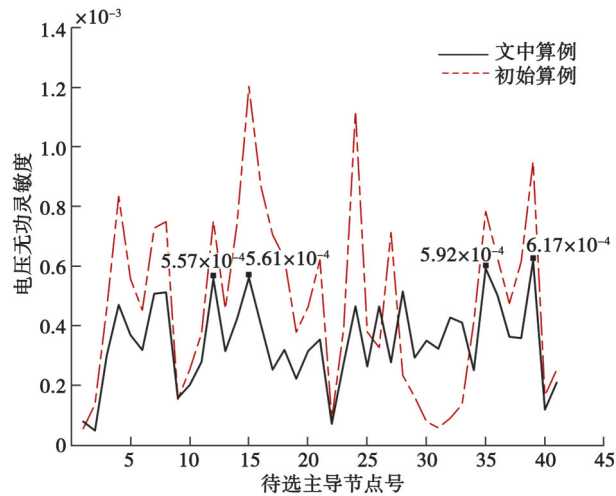


图3 负荷节点对待选主导节点电压无功灵敏度

Fig. 3 Voltage reactive power sensitivity of the load node to the selected primary node

从图3可以看出,初始系统具有明显的主导节点:节点15对于负荷节点整体具有高的电压无功灵敏度,而文中算例网络没有明显具有高电压无功灵敏的节点。计算各待选主导节点对于负荷节点电压无功灵敏度标准差,初始系统灵敏度标准差为 $3.00 \times 10^{-4}$ ,文中算例为 $1.62 \times 10^{-4}$ 。相比较而言,文中算例系统节点灵敏度整体差异不大。因此,从主导节点选择来看,文中算例系统没有明显的主导节点。

### 3.1.2 仿真方案

为验证文中模型的有效性和必要性,在保持本区域外发电机和负荷参数不变的前提下,采取以下3种控制方式。

S1:文中模型M。

S2:考虑区域主导节点电压理想偏差目标和区域发电机裕度均衡目标。

S3:在文中模型基础上,不考虑上下级区域关口控制目标。

仿真算例中的电压与无功理想值均由三级电压控制求解得到。由图3可知,节点15和节点39为无功灵敏度最大的2个节点,将其作为该区域主导节点。

### 3.1.3 上级区域电压无功控制目标影响

为了分析负荷中心电源空心化情况下,高电压等级区域电压控制目标对二级电压控制的影响,基于方案S1和方案S2进行仿真计算。仿真结果见表2和图4所示。

表2 方案S1和S2下上级区域优化结果

Table 2 Optimization results of upper-level areas under schemes S1 and S2

方案	S1	S2
上级区域节点电压合格率/%	100	92.68
上级区域电压理想偏差平均值/p.u.	0.004 3	0.009 1
区域发电机无功出力均衡因子	0.271 9	0.308 8
区域发电机无功裕度因子	0.473 8	0.498 6
区域平级联络线传输无功/MVar	26.264 1	51.275 0

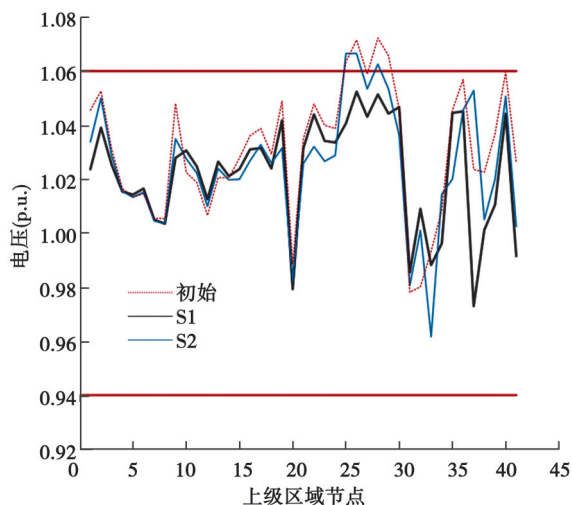


图4 优化前后各方案上级区域节点电压

Fig. 4 The node voltage in the upper-level areas of each scheme before and after optimization

在区域电压安全方面:由图4可知,优化前上级区域存在节点电压越上限。结合表2得出,方案S1优化后上级区域节点电压合格率为100%;而方案S2中上级区域节点电压合格率为92.68%,仍然存在少数节点电压越限。由于区域负荷节点电压控制自由度较高,依靠区域1~2个主导节点无法充分实现区域节点电压控制。区域电压经济性方面:由于三级电压控制主要考虑网损最优,优化下发的理想电压反映了电压的经济性控制。方案S1优化后上级区域节点理想电压偏差平均值小于方案S2。因此在节点电压控制上,对于负荷中心缺少灵活可调电源的网络,以区域可控发电厂高压母线电压理想偏差为目标拥有更好的区域电压控制效果和更优的经济性体现。

在区域无功分布方面,对于同级区域之间联络线无功传输总量,方案S1较方案S2下降了48.78%,即方案S1具有更好的区域无功平衡能力。同时,方案S1发电机无功出力均衡因子小于方案S2,即方案S1区域发电机无功出力更加均衡。方案S2以区域发电机无功备用均衡为控制目标,区域发电机整体无功裕度大于方案S1。结合上级区域电压理想偏差平均值可以分析得到,考虑区域联络线无功控制目标和区域发电机无功出力均衡目标,可以更好地实现区域无功分布的均衡性和经济性。

### 3.1.4 区域上下级电压无功控制影响分析

为分析多电压等级电网属于统一调控中心的电网,上下级区域协同电压无功目标对于二级电压控制的影响,特别是下级电压控制能力较弱的区域。基于方案S1和方案S3进行分析,结果如表3和图5所示。

表3 方案S1和S3下下级区域优化结果

Table 3 Optimization results of lower-level areas

方案	S1	S3
下级区域节点电压合格率/%	100.00	90.91
下级区域电压理想偏差平均值/p.u.	0.002 18	0.002 70
下级区域发电机无功出力均衡因子	0.271 9	0.303 2
下级区域发电机无功裕度因子	0.473 8	0.451 6

结合图5可以看出,优化前下级区域节点电压存在越限,即节点9\*越上限。结合表3可知,方案S1优化后下级区域节点电压合格率为100%,而方案S3中下级区域节点电压合格率为90.91%,即节点10\*越下限。结合图2可以看出,下级区域仅有1台发电机组,区域电压无功支撑能力较弱。此时区域关口节点电压无功对于下级区域控制具有一定的主导性。方案S1考虑了上下级区域之间的协调控制,即通过上下级区域关口节点电压和无功目标更好地实现下级区域控制。

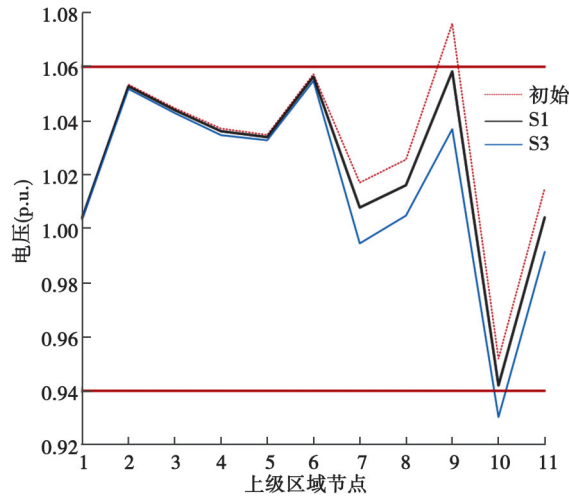


图 5 优化前后各方案下级区域节点电压

Fig. 5 The node voltage of each scheme before and after optimization

### 3.2 基于实际数据的仿真应用分析

基于文中第 1 节实际电网实际数据,仿真验证负荷中心电源“空心化”情况下文中模型的有效性。该系统含有 500 kV 和 220 kV 这 2 个电压等级电网,共计 850 个节点、1 582 条线路、149 台发电机。以中部区域为研究对象,依据主导节点可控性原则,选择区域中进出线超过 7 条的 500 kV 节点为待选主导节点。计算这些节点对于区域负荷节点电压无功灵敏度平均值,结果如图 6 所示。

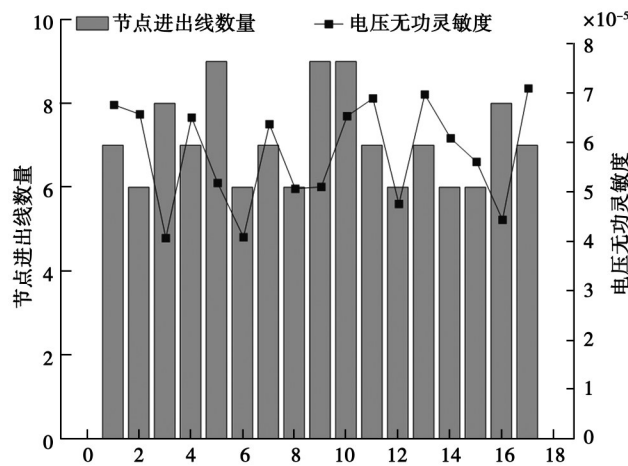


图 6 待选节点进出线数量与电压无功灵敏度

Fig. 6 Number of incoming and outgoing cables and voltage reactive power sensitivity of the node to be selected

根据图 6 结果,理论上应该选择电压无功灵敏度最大的节点作为该区域的主导节点,即节点 17。但整体来看,区域待选主导节点电压无功灵敏度没有明显突出的节点。待选主导节点的电压无功灵敏度差距在小数点第 5 位,其中有 7 个节点与最大值差距在小数点第 6 位。因此,对于大型枢纽城市负荷中心,由于电源“空心化”的影响,该区域待选节点中没有明显的主导节点。从主导节点选择方面而言,如果仅仅选择无功灵敏度最高的节点作为主导节点,可能难以保证整个区域节点电压优化控制效果。

在本次选取的实际电网数据场景下,500 kV 中部区域存在个别节点越限,节点电压越限率为 2.33%;下级 220 kV 区域 1、区域 5 和区域 7 均存在节点电压不合格。为验证文中模型的有效性,采用方案 S1-S3 进行仿真分析,结果如表 4 和表 5 所示(基于图 6 选择节点 17 和节点 13 作为该区域的主导节点)。

表4 方案S1和S2下中部区域优化结果

Table 4 Optimization results of high voltage level region

方案	S1	S2
节点电压越限率/%	0	2.33
电压理想偏差平均值/p.u.	0.001 4	0.002 7
发电机无功出力均衡因子	0.163 0	0.594 2
发电机无功裕度因子	0.473 8	0.616 4

表5 方案S1和S3下下级区域电压优化前后合格率

Table 5 Pass rate before and after voltage optimization in lower-level areas

下级区域序号	初始	S1	S3	%
1	98.25	100.00	98.25	
3	96.55	100.00	100.00	
7	88.68	100.00	84.90	

由表4可以看出,方案S1可以有效实现上级区域节点电压控制,使区域全部节点电压满足限制要求。同时,500 kV中部区域整体节点电压与理想值的偏差、发电机无功出力偏差均小于方案S2。由表5可以看出,通过关口节点电压控制可以更好地实现电压无功支撑能力弱区域的节点电压安全,使得220 kV下级区域节点电压均满足合格要求。

综上所述,对于大型枢纽城市负荷中心电源“空心化”电网,其上级超大型区域难以通过1~2个主导节点的选择,实现分区的节点电压控制。通过将区域发电机高压母线节点泛化为主导节点,可以有效地满足区域整体的节点电压和区域无功安全、经济控制。同时,对于与之相连的下级220 kV区域电网,特别是电压无功控制较弱的区域,通过上下级关口电压无功控制,可以有效地满足下级区域节点电压安全。

## 4 结束语

面对大型枢纽城市电网出现的负荷中心电源“空心化”现象,文中建立了电源“空心化”区域电网的协调二级电压控制优化模型。新模型将所有发电厂高压母线都泛化为主导节点,高效解决了电源“空心化”区域电网电压主导节点难以选择的问题。此外,新模型同时考虑了联络线/联络变无功和关口节点电压的理想偏差目标要求,高效解决了区域之间电压无功的协调问题。最后,新模型将三级电压全局优化的最优值作为二级电压控制的理想目标参考值,有效提高了二级电压控制的电压质量和经济效益。

## 参考文献

- [1] 孙宏斌,张伯明,郭庆来,等.基于软分区的全局电压优化控制系统设计[J].电力系统自动化,2003,27(8):16-20.  
Sun H B, Zhang B M, Guo Q L, et al. Design for global optimal voltage control system based on soft identification of secondary control zones[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 16-20. (in Chinese)
- [2] 莫静山,颜伟,文旭,等.考虑换流站独立控制约束的交直流系统静态无功优化方法[J].电力系统自动化,2021,45(15):77-84.  
Mo J S, Yan W, Wen X, et al. Optimization method for static reactive power of AC/DC system considering independent control constraints of converter station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(15): 77-84. (in Chinese)
- [3] 赵晶晶,贾然,陈凌汉,等.基于深度学习和改进K-means聚类算法的电网无功电压快速分区研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(14):89-95.  
Zhao J J, Jia R, Chen L H, et al. Research on fast partition of reactive power and voltage based on deep learning and an improved K-means clustering algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 89-95. (in Chinese)

- [4] 徐潇源,王晗,严正,等. 能源转型背景下电力系统不确定性及应对方法综述[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 1-13.  
Xu X Y, Wang H, Yan Z, et al. Overview of power system uncertainty and its solutions under energy transition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 1-13. (in Chinese)
- [5] 李锴,邵德军,徐友平,等. 基于新一代调相机的多目标无功电压协调控制系统研究[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2961-2967.  
Li K, Shao D J, Xu Y P, et al. Research on coordinated multi-objective reactive voltage control system based on new type synchronous condenser[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2961-2967. (in Chinese)
- [6] Zhang S Y, Zhou M, Liu Z Y, et al. Hierarchical flexible operation approach on a VSC-MTDC interconnected hybrid grid with a high share of renewable power[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(6): 4936-4949.
- [7] 韩雪,任东明,胡润青. 中国分布式可再生能源发电发展现状与挑战[J]. 中国能源, 2019, 41(6): 32-36, 47.  
Han X, Ren D M, Hu R Q. Current status and challenges of distributed renewable energy power generation in China[J]. Energy of China, 2019, 41(6): 32-36, 47. (in Chinese)
- [8] 边宏宇,徐友平,邵德军,等. 直流馈入受端电网“空心化”形势下的稳定特性分析及解决措施[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 164-170.  
Bian H Y, Xu Y P, Shao D J, et al. Analysis of stability characteristics and solutions with the hollowing of a DC feed power grid [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 164-170. (in Chinese)
- [9] 刘一锋,周小平,洪乐荣,等. 弱受端场景下角型链式 STATCOM 接入 HVDC 系统的阻抗建模及稳定性分析[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 1269-1279.  
Liu Y F, Zhou X P, Hong L R, et al. Impedance modeling and stability analysis for HVDC system with delta-connected cascaded STATCOM in weak receiving grid scenario[J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 1269-1279. (in Chinese)
- [10] 李轻言,林涛,杜蕙,等. 面向直流受端新型电力系统暂态电压稳定的紧急控制策略[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(3): 195-202.  
Li Q Y, Lin T, Du H, et al. Emergency control for transient voltage stability of HVDC receiving-end new power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(3): 195-202. (in Chinese)
- [11] 吕哲,葛怀畅,郭庆来,等. 面向受端电网暂态电压稳定的高压直流系统主动控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(22): 8041-8052.  
Lyu Z, Ge H C, Guo Q L, et al. Research on active control of HVDC system for transient voltage stability of receiving-end grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(22): 8041-8052. (in Chinese)
- [12] 崔惟,曹逸凡,李程昊,等. 考虑风电随机性的交直流系统协调二级电压控制方法[J]. 重庆大学学报, 2023, 46(9): 41-51.  
Cui W, Cao Y F, Li C H, et al. Coordinated secondary voltage control method of AC/DC system considering wind power randomness[J]. Journal of Chongqing University, 2023, 46(9): 41-51. (in Chinese)
- [13] 于汀,蒲天骄,刘广一,等. 基于柔性直流分区互联的受端城市电网无功电压控制策略[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2140-2145.  
Yu T, Pu T J, Liu G Y, et al. Reactive power and voltage control strategy of receiving-end urban power grid with flexible DC interconnected between partitions[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2140-2145. (in Chinese)
- [14] 颜伟,胡显文,崔惟,等. 考虑 LCC-HVDC 设备额外动作要求的协调二级电压控制方法[J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1511-1518.  
Yan W, Hu X W, Cui W, et al. Coordinated secondary voltage control considering additional action requirements of LCC-HVDC equipment[J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1511-1518. (in Chinese)
- [15] 杨彪,颜伟,莫静山. 考虑源荷功率随机性和相关性的主导节点选择与无功分区方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(11): 61-67.  
Yang B, Yan W, Mo J S. Pilot-bus selection and network partitioning method considering randomness and correlation of source-load power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11): 61-67. (in Chinese)
- [16] 郭庆来,孙宏斌,张伯明,等. 协调二级电压控制的研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 19-24.  
Guo Q L, Sun H B, Zhang B M, et al. Study on coordinated secondary voltage control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(23): 19-24. (in Chinese)
- [17] 盛戈晔,涂光瑜,罗毅,等. 考虑控制区域间影响的二级电压控制[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(15): 27-32.  
Sheng G H, Tu G Y, Luo Y, et al. Secondary voltage control considering interaction among neighboring control zones[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(15): 27-32. (in Chinese)

- [18] 华梁, 杨伟. 基于细菌群体趋药性算法的二级电压控制[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 146-151.  
Hua L, Yang W. Secondary voltage control based on bacterial colony chemotaxis algorithm[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 146-151. (in Chinese)
- [19] 刘小波, 丁晓群, 龙启峰, 等. 基于 Ward 等值的二级电压控制研究[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 53-56, 71.  
Liu X B, Ding X Q, Long Q F, et al. Study on secondary voltage control based on ward equivalent[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 53-56, 71. (in Chinese)
- [20] 郑晓东, 陈皓勇, 陈亦平, 等. 电力系统二级电压控制的合作博弈模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 32-38.  
Zheng X D, Chen H Y, Chen Y P, et al. Cooperative game model for secondary voltage control of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 32-38. (in Chinese)
- [21] 袁康龙, 刘明波. 计及无功耦合的多分区关联协调二级电压控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 74-80, 12.  
Yuan K L, Liu M B. Coordinated secondary voltage control method considering reactive power coupling among multiple correlated zones[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 74-80, 12. (in Chinese)
- [22] 刘明波, 冯小峰. 考虑区间耦合和无功均衡的二级电压控制器设计[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 220-230.  
Liu M B, Feng X F. Design of secondary voltage controllers considering coupling among areas and balance of reactive power outputs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 220-230. (in Chinese)
- [23] 苏辛一, 张雪敏, 何光宇, 等. 互联电网自动电压控制系统协调变量设计[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 22-26.  
Su X Y, Zhang X M, He G Y, et al. A new coordination variable for automatic voltage control of interconnected power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 22-26. (in Chinese)
- [24] 颜伟, 张紫薇, 胡显文, 等. 考虑定功率-定关断角方式的交直流协调三级电压控制方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(18): 185-192.  
Yan W, Zhang Z W, Hu X W, et al. Tertiary voltage control method for AC/DC coordination considering constant power-constant extinction angle mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 185-192. (in Chinese)

(编辑 詹燕平)