DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)10-0047-06

数据简约及配电网分区的无功补偿配置优化方法

李江涛[1]，康　凯[1]，丁　键[2]，崔旭东[2]，吕世高[2]，王成进[3]，汪　新[3]

（1.国网内蒙古东部电力有限公司,内蒙古 呼和浩特 010010;2.国网内蒙古东部电力有限公司 通辽供电公司,
内蒙古 通辽 028000;3.安徽南瑞继远电网技术有限公司,安徽 合肥 230088）

摘　要:为了提高配电网电压合格率和降低配电网线损率,针对配电网无功补偿容量需求模糊、分组欠缺理论支撑的问题,基于配电网电压、无功等在线监测运行数据,提出基于监测数据的无功补偿容量、分组和补偿点优化配置方法。首先,建立以网损和电压偏差最小为目标的配电网无功优化配置模型,其次,形成以监测数据为基础的概率简约数据缩减及无功补偿装置分组的方法,然后提出基于配电网各节点电压-损耗灵敏度以及邻近节点分区的无功补偿点筛选策略,通过改进的粒子群智能优化算法实现配电网无功补偿优化配置。建立 IEEE33 节点模型验证所提方法的可行性和有效性,基于 IEEE33 节点算例分析验证,系统运行最低电压由 0.87 p.u.提升至 0.94 p.u.,通过配电网无功优化配置各节点电压均满足限值要求,线损率降低 16.67%,配电网电压合格率和线损率得到有效改善。

关键词:无功补偿;优化配置;无功数据简约;补偿点筛选;分组;容量优化

中图分类号: TP273;TM76　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1003-7241(2025)10-0047-06

Optimization method for reactive power compensation configuration based on data simplification and distribution network partitioning

LI Jiangtao[1], KANG Kai[1], DING Jian[2], CUI Xudong[2], LV Shigao[2], WANG Chengjin[3], WANG Xin[3]

(1. State Grid Inner Mongolia East Electric Power Co., Ltd., Hohhot 010010, China;
2. Tongliao Power Supply Company, State Grid Inner Mongolia East Electric Power Co., Ltd., Hohhot 028000, China;
3. Anhui Nanrui Jiyuan Power Grid Technology Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: In order to improve the voltage qualification rate of the distribution network and reduce the line loss rate of the distribution network, a method for optimizing the configuration of reactive power compensation capacity, grouping, and compensation points based on monitoring data is proposed to address the problems of fuzzy demand for reactive power compensation capacity and lack of theoretical support for grouping in the distribution network. Firstly, it establishes a reactive power optimization configuration model for the distribution network with the goal of minimizing network loss and voltage deviation. Secondly, it forms a probabilistic simplification data reduction and reactive power compensation device grouping method based on monitoring data. Then, it proposes a reactive power compensation point screening strategy based on the voltage loss sensitivity of each node in the distribution network and the partition of adjacent nodes. The optimized configuration of reactive power compensation in the distribution network is achieved through an improved particle swarm intelligence optimization algorithm. Establishing an IEEE33 node model to verify the feasibility and effectiveness of the proposed method, based on IEEE33 node case analysis and verification, the minimum operating voltage of the system is increased from 0.87 p.u. to 0.94 p.u. Through reactive power optimization configuration of the distribution network, the voltage of each node meets the limit requirements, and the line loss rate is reduced by 16.67%. The voltage qualification rate and line loss rate of the distribution network are effectively improved.

Keywords: reactive power compensation; optimize configuration; reduced reactive power data; compensation point selection; compensation device grouping; capacity optimization

0　引言

在国家“双碳”目标和新型电力系统建设的背景下,电网精益化管理与质效运行水平提升出现了新问题与新需求,配电网电压无功和技术降损管理作为其重要的组成部分,也成为电网公司和电力用户近两年持续深耕的工作重点。

配电网无功优化配置的目标为无功补偿装置安装位置、容量及分组,满足长期多工况运行,配电网中电压无功调节应用最为广泛的设备为并联电容器,提高功率因数的同时实现电能传输过程中的降损节能。无功优化配置研究的关键技术问题主要包括确定准确的无功需量、补偿点的选取和装置如何分组[1]。无功需量是确定无功补偿装置安装容量确定的关键,但配电网运行无功具有季节性、波动性等特征,针对该问题,文献[2-4]提出基于单个补偿点年度负荷无功运行数据,建立无功功率概率分布曲线并结合最优覆盖法确定无功补偿装置的容量,该方法考虑了无功的波动性,但数据分析量大,不适用于配电网的无

*基金项目:国网内蒙古东部电力有限公司科学技术项目(SGTYHT)
收稿日期:2024-02-05

功优化;文献[5]通过对居民、商业、工业不同用户类型功率因数进行降维及概率重新匹配建立配电网典型日负荷特性无功优化模型,基于预测模型实现无功补偿安装容量的优化,未考虑模型预测的准确性对补偿安装容量的影响以及其普遍适用性。目前补偿点的选取主要基于潮流计算,通过电压无功灵敏度确定候补节点,然后以电压偏差和网损等约束通过智能算法确定补偿点[6-7],该方法的实现需要同时考虑补偿容量和装置分组等的影响,补偿点的选取受装置本体配置影响,对多无功运行工况缺少普遍适用性,且未考虑无功潮流对线损率的影响。对于补偿装置的分组配置关注度相对欠缺,主要有等容分组和不等容分组,多依据经验或标准直接确定分组方案进行容量优化。

综上所述,为了提高配电网电压合格率和降低配电网线损率,针对配电网无功补偿容量需求模糊、分组欠缺理论支撑的问题,基于配电网电压、无功等在线监测运行数据,建立一种配电网无功补偿优化配置方法。考虑电网的安全稳定、经济运行,建立以网损和电压偏差最小为目标的配电网无功优化模型,形成基于概率统计的无功需求获取方法以及补偿装置分组方法,提出基于配电网各节点电压-损耗灵敏度以及邻近节点分区的无功补偿点筛选策略,通过改进的粒子群智能优化算法实现配电网无功补偿优化配置,并建立 IEEE33 节点模型验证所提方法的可行性和有效性,基于 IEEE33 节点算例分析,系统运行最低电压由 0.87 p.u. 提升至 0.94 p.u.,线损率降低 16.67%,验证本文所提方法的实用性和有效性。

1 配电网无功优化配置模型

1.1 目标函数

为提高配电网运行的经济性、安全稳定性,将线损率和电压偏差最小作为无功优化配置目标。

线损率 P_r 为

$$\begin{cases} P_r = \sum_{l=1}^{L} \dfrac{P_{\text{loss},l}}{P} \\ P_{\text{loss}} = \sum_{l=1}^{L} P_{\text{loss},l} = \sum_{i,j\in N} G_{ij}(V_j^2 + V_i^2 - 2V_iV_j\cos\theta_{ij}) \end{cases} \tag{1}$$

式中,$P_{loss,l}$ 为支路 l 线路损耗,L 为支路总数,P 为系统有功功率,N 为节点数,G_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的电导,θ_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的电压相位差,V_i 为节点 i 的电压,V_j 为节点 j 的电压。

电压偏差 ΔV 为

$$\Delta V = \frac{\sum_{i=1}^{N} |V_i - V_{\text{N}}|}{N} \tag{2}$$

式中,V_N 为额定电压。

电压越限惩罚函数 V_{exc} 为

$$V_{\text{exc},i} = \begin{cases} V_i - V_{\max}, & V_i > V_{\max} \\ 0, & V_{\min} \leqslant V_i \leqslant V_{\max} \\ V_{\min} - V_i, & V_i < V_{\min} \end{cases} \tag{3}$$

式中,$V_{\max}$ 为电压上限值,$V_{\min}$ 为电压下限值。

则目标函数为

$$\min f = F = \lambda_1 \cdot P_r + \lambda_2 \cdot \Delta V + \gamma \cdot \sum_{i=1}^{N} \frac{V_{\text{exc},i}}{N} \tag{4}$$

式中,λ_1、λ_2 为权重系数,γ 为罚函数系数。

1.2 约束条件

配电系统潮流电压优化算法的约束条件主要包括等式约束功率潮流平衡约束,以及对节点电压、支路电流和总进线功率因数等指标的不等式约束。

等式约束为

$$\begin{cases} P_i(t) = V_i(t) \sum_{j=1,j\neq i}^{N} V_j(t)(G_{ij}(t)\cos\theta_{ij}(t) + \\ \qquad B_{ij}(t)\sin\theta_{ij}(t)) \\ Q_i(t) = V_i(t) \sum_{j=1,j\neq i}^{N} V_j(t)(G_{ij}(t)\sin\theta_{ij}(t) - \\ \qquad B_{ij}(t)\cos\theta_{ij}(t)) \end{cases} \tag{5}$$

式中,$P_i(t)$ 为 t 时刻节点 i 注入的有功功率,$Q_i(t)$ 为 t 时刻节点 i 注入的无功功率,$G_{ij}(t)$ 为 t 时刻节点 i 和节点 j 之间的电导,$B_{ij}(t)$ 为 t 时刻节点 i 和节点 j 之间的电纳,$\theta_{ij}(t)$ 为 t 时刻节点 i 和节点 j 之间的电压相位差,$V_i(t)$ 为 t 时刻节点 i 的电压,$V_j(t)$ 为 t 时刻节点 j 的电压。

不等式约束为

$$\begin{cases} Q_{\text{C}} \leqslant Q \\ T_{\text{OLTC,min}} \leqslant T_{\text{OLTC}} \leqslant T_{\text{OLTC,max}} \end{cases} \tag{6}$$

式中,Q 为配电网无功功率,Q_C 为无功补偿容量,T_{OLTC} 为有载调压挡位,$T_{\text{OLTC,min}}$、$T_{\text{OLTC,max}}$ 分别为有载调压最小值、最大值。

2 基于数据简约及配电网分区的配电网无功优化方法

2.1 基于无功功率数据简约的分组配置方法

并联无功补偿装置为分组固定补偿,其补偿容量的确定需最大程度契合补偿点的无功需求。由于配电网电力负荷具有多样性、季节性和波动性的特点,基于短时间尺度的无功运行数据确定无功补偿需量,可能导致长时间尺度无功补偿效果的差强人意。为最大程度考虑配网电力负荷的季节性变化,同时减少配网无功补偿装置配置过程中对负荷类型的依赖性,提出以年为时间单位进行无功补偿需求分析。

当前配电网无功监测数据的颗粒度为 15 min 或 1 h,15 min 颗粒度的单个监测点年无功监测数据量将超过了 51 万个,基于配电网全部监测点的年监测数据进行无功补偿需求分析的数据量是海量的。因此,需要对海量的无功监测数据进行“简约化”处理。

通常无功补偿一般为 1~3 组,常用分组符合 1∶2∶4 的比例关系,分组方式可以为 1∶1∶1、1∶1∶2、1∶2∶2,以“1”为单元来看,不同比例分组总的单元数不同,基于该特征根据无功功率时间序列,建立并联电容器分组方

法，分组计算方法如式(7)所示，通过无功功率极值比例f的大小来决定分组C的组数及分组比例。

$$f=\frac{\max Q}{\min Q}$$

$$C=\begin{cases}1:2:2, & f\geqslant 5\\ 1:1:2, & 4\leqslant f<5\\ 1:2, & 3\leqslant f<4\\ 1:1, & 2\leqslant f<3\\ 1, & f<2\end{cases}\tag{7}$$

该分组方法使得不同分组组合条件下分别满足最小和最大无功功率输出，若无功数据存在异常或少量偏大值会产生以更大的补偿容量换取较好补偿效果的情况，而无功数据存在异常或少量偏小值则会产生以更多分组实现较好补偿效果的情况。因此，考虑并联电容器运行工况的有限性以及负荷功率的日波动特性，提出基于概率统计的无功功率数据简约方法，具体实现方法如图 1 所示。众数是指在统计分布上具有明显集中趋势的数值，代表数据的一般水平[8]，故引入统计学中直方图众数概念，将D天长时间序列简约为单日时间序列。首先确定数据分组数N及组距L，从而计算第n组的界限值$l(n)$，取属于该组数据的平均值作为众数。该方法着重提取大概率数据范围，虽然会造成数据部分大值以及小值的缺失，但与无功补偿分组配置方法相匹配，适当减小单组容量，使得无功补偿装置较大时间概率均处于补偿状态，满足无功补偿的经济性和有效性。

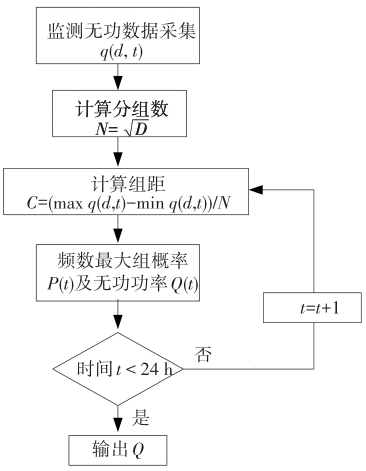


图 1　无功功率数据简约流程图

依据实际运行无功数据对该方法的有效性进行分析，某 10 kV 监测点时间颗粒度为 3 min(480 点/d)，采集 30 d 无功功率数据，共涉及数据量为 14 400 个，对数据基于概率统计进行简约化处理，处理结果如图 2 所示，通过概率简约数据量降低为 480 点，众数、中位数和平均数是常用的描述数据集中趋势的指标，少量大值将均值和中位数小值拉高，反之小值将大值拉低，与均值和中位数相比，概率简约数据更能反应无功波动时间序列的大概率时间段运行情况。

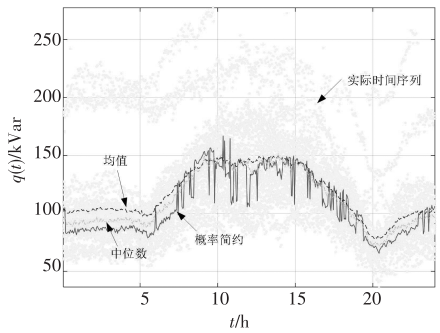


图 2　无功功率数据简约结果

以图 2 无功时间序列为例，分别对原始数据和概率简约数据进行无功优化分组，补偿容量均按照最大无功进行计算，不同无功数据源补偿方案见表 1，不同无功数据源补偿效果如图 3 所示。

表 1　不同无功数据源补偿方案

补偿方案	数据源	最大值/kVar	最小值/kVar	分组
方案一	原始数据	277.49	36.36	1∶2∶2
方案二	简约数据	166.82	65.49	1∶1

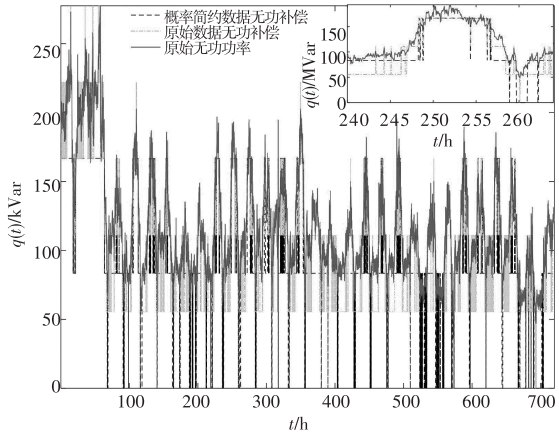


图 3　不同无功数据源分组补偿效果对比图

从全局来看，在开始的 3 d 无功功率运行水平明显高于后期，该时段方案二无功补偿量有所偏小，但后期据补偿效果优于方案一，且对长时间无功功率具有普遍适用性。以第 10 天为例(局部放大部分)方案一剩余无功电量(负荷无功功率与补偿量差值的累计)8.83 MVar，方案二剩余无功电量 7.14 MVar，基于概率简约数据的无功优化补偿效果更优，以较小的安装容量获得等同或更优的补偿效果，提高无功补偿的经济效益。

2.2　配电网无功补偿点筛选

2.2.1　基于潮流计算的电压-损耗灵敏度分析

无功补偿点的选取与网架结构和各节点运行无功功率均有关系，但各节点无功功率存在波动变化，应尽可能满足各节点不同无功大小运行情况下无功补偿点的选择普遍适用，保证配电网在该无功补偿方案下无功补偿效果(目标函数)最优。电压灵敏度[9~10]在配电网规划、调控方面有着较为广泛的应用，建立综合考虑电压灵敏度和损

耗灵敏度[11]的无功补偿点优化方法，其中电压-损耗灵敏度计算公式为

$$\begin{cases} E_{Ci} = aE_{Pi} + bE_{Ui} \\ E_{Pi} = P_{\text{loss},i,t}\big|_{\Delta Q=0} - P_{\text{loss},i,t}\big|_{\Delta Q=q} \\ E_{Ui} = \Delta U_{\text{ave},i,t}\big|_{\Delta Q=0} - \Delta U_{\text{ave},i,t}\big|_{\Delta Q=q} \end{cases} \tag{8}$$

式中，E_{Ci}、E_{pi} 和 E_{Ui} 为节点 i 的综合灵敏度、损耗灵敏度和电压灵敏度，$P_{\text{loss},i,t}$、$\Delta U_{\text{ave},i,t}$ 为 t 时刻有无功扰动 q 条件下与无无功扰动条件下损耗偏移、电压偏移量，a、b 为权重系数。

$P_{\text{loss},i,t}$ 和 $\Delta U_{\text{ave},i,t}$ 计算公式为

$$\begin{cases} P_{\text{loss},i,t} = \sum_{k=1}^{L} P_{\text{loss},k,t} \\ \Delta U_{\text{ave},i,t} = \dfrac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}(U_{j,t} - U_N) \end{cases} \tag{9}$$

式中，$P_{\text{loss},k,t}$ 为 t 时刻支路 k 的有功损耗，$U_{j,t}$ 为 t 时刻节点 j 的运行电压，U_N 为额定电压。

电压-损耗灵敏度计算中权重计算通过综合层次分析法和熵权法计算获得。层次分析法适合于具有多层次结构的多指标决策问题，但其具有主观随意性，需要通过一致性校验；而熵权法属于客观赋权法，可以有效弥补上述不足，综合层次分析法与熵值法相结合来计算，计算指标体系内各单项指标的权重，采用乘法加权获得综合权重。进而根据式(8)计算得到各节点的综合灵敏度。选择综合灵敏度较大节点作为无功补偿点，时间维度的功率波动会导致不同时间点灵敏度不同，则以时间维度出现概率较大的节点作为无功补偿点。

2.2.2 基于配电网分区的无功补偿点筛选

仅考虑电压-损耗灵敏度可能会存在补偿节点集中化的问题，为了解决这一问题基于电压-损耗灵敏度对配电网进行分区处理，同一分区内节点间具有耦合性强、不同分区节点间具有耦合性弱的特点，同一分区内设置一个补偿节点即可。电气距离越小的两个节点之间具有越为接近的电压-损耗灵敏度，利用 K-means 算法建立基于电压-损耗灵敏度的配电网分区方法，其中 K-means 算法的关键参数 K 值决定配电网分区数量，即无功补偿点的个数，依据误差平方和 SSE(sum of squared errors)进行确定，SSE 计算公式为

$$\text{SSE} = \sum_{i=1}^{K}\sum_{p\in C_i} \| p - m_i \|_2^2 \tag{10}$$

式中，C_i 为样本第 i 个簇，p 为 C_i 簇中样本，m_i 为 C_i 簇所有样本均值，K 为样本分组数。

2.3 无功优化配置模型求解

粒子群算法作为常见的智能化算法之一，具有便于理解与实现、通用性强等优点，且其飞跃性特征使其具有较好的全局搜索能力。粒子群优化算法首先生成随机的 N 个粒子，每个粒子均是一个候选解，每个粒子下一代的位置由这一代粒子的位置和速度矢量决定，而粒子的飞行速度由当前位置和局部最优及全局最优位置决定，粒子 i 第 k 次迭代过程计算公式为

$$v_{id}^{k} = wv_{id}^{k-1} + c_1r_1(p_{\text{best}\,id} - x_{id}^{k-1}) + c_2r_2(z_{\text{best}\,d} - x_{id}^{k-1}) \tag{11}$$

$$x_{id}^{k} = x_{id}^{k-1} + v_{id}^{k-1} \tag{12}$$

式中，v 为粒子速度；x 为粒子位置；w 为惯性权重；d 为维度；p_{best} 为粒子局部最优值；z_{best} 为全局最优值；c_1、c_2 为学习因子；r_1、r_2 为随机数，取值在[0,1]内。

考虑配电网无功优化配置数据信息量庞大，且迭代过程中多次进行潮流计算，使得寻优过程速度较慢，为了加快寻优过程收敛速度，采用权重优化的改进粒子群算法加速其搜索速度，权重计算公式为

$$w = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min}) \times \left(\frac{k}{K}\right)^2 \tag{13}$$

式中，K 为总的迭代次数，$w_{\max}$、$w_{\min}$ 为惯性权重最大值、最小值。

配电网无功补偿优化配置流程如图 4 所示。

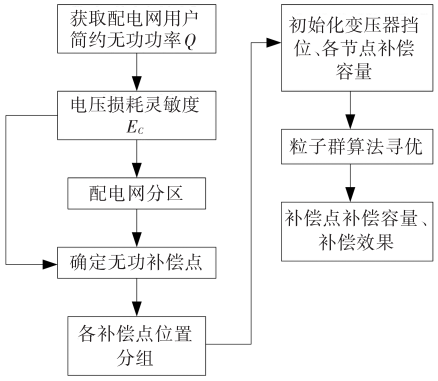


图 4 配电网无功补偿优化配置流程

3 算例分析

选取 IEEE 33 节点系统，系统接线如图 5 所示，系统基准电压 10 kV，基准容量 100 MVA，系统最大有功功率 7.20 MW，最大无功功率 3.60 MVar，系统线损率 4.02%。

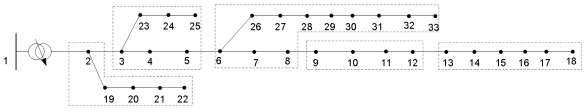


图 5 IEEE 33 节点系统图

对该 IEEE 33 节点系统进行电压无功灵敏度分析，系统各节点平均无功功率 112.50 kVar，设置 1 kVar(约 1%)无功扰动，计算各节点损耗灵敏度和电压灵敏度，根据指标重要程度等级划分为同等重要、稍许重要、较为重要和特别重要，认为损耗灵敏度和电压灵敏度重要程度标度分别为 1.8 和 1.4[3]，计算得到权重值如表 2 所示，不同时刻不同节点 node 综合灵敏度如图 6 所示。

对 IEEE 33 节点系统进行分区，不同分组条件下 SSE 值计算结果如图 7 所示，可以看出聚类组数从 5 组

后平缓减小，故本文 K 值取 5，分组结果如图 5 所示，选择各分组中综合灵敏度最大的点作为补偿节点，故选取 12、18、22、25、33 节点作为补偿节点。

表 2　综合灵敏度计算权重值

灵敏度	权重		
	客观权重	主观权重	综合权重
损耗灵敏度	0.54	0.56	0.60
电压灵敏度	0.46	0.44	0.40

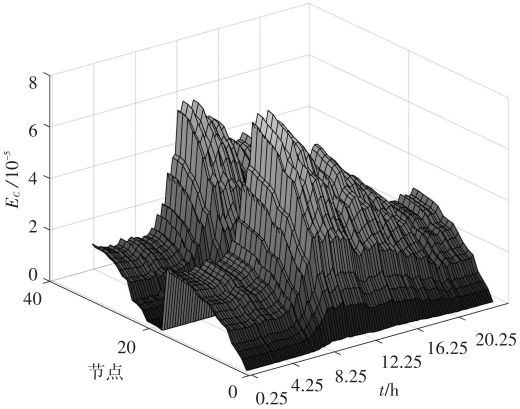


图 6　各节点综合灵敏度

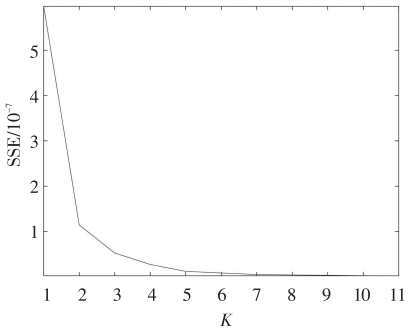


图 7　不同分组条件下 SSE 值

采用 PSO 优化算法进行无功补偿容量优化，初始化粒子种群数量为 30，粒子维度为 6，包括首端电压档位 tap 和节点无功补偿容量，迭代次数设置为 100 次，其中有载调压变压器变比调整范围设置为[0.95，1.05]，步长为 0.025。为了分析无功补偿对系统各节点电压的提升效果，选择各节点最低电压进行对比分析，补偿前后电压运行水平和系统损耗如图 8 所示，系统运行最低电压由 0.87 p.u. 提升至 0.94 p.u. 以上，算法优化后线损率降低到 3.35%，线损率降低 16.67%，有载调压变压器挡位多运行于 0.95，以提升母线电压。

各节点无功补偿优化结果如表 3 所示，有载调压变压器挡位调整如图 9 所示，无功补偿度为 18.61%，有载调压变压器主要运行在−5%（0.95）挡位，无功补偿对母线电压抬升程度有限。

根据无功运行数据对补偿装置进行分组，优化各节点安装容量，各节点装置投切运行状态如图 10 所示，定义累计无功补偿容量与累计负荷无功功率比值为无功补偿百分比，则各节点无功补偿百分比分别为 88.47%、93.06%、64.01%、90.04%、88.98%，负荷无功得到有效补偿。

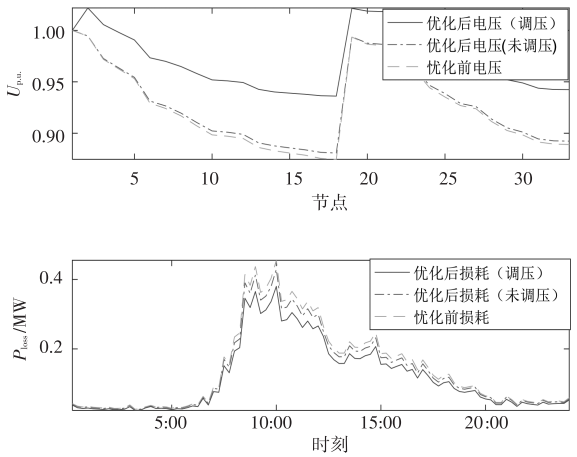


图 8　优化前后节点电压和系统损耗

表 3　各节点无功补偿优化配置结果

节点	补偿容量/kVar	分组
12	44.94	1：2
18	65.78	1：2：2
22	51.80	1：2：2
25	461.53	1：2：2
33	49.99	1：2

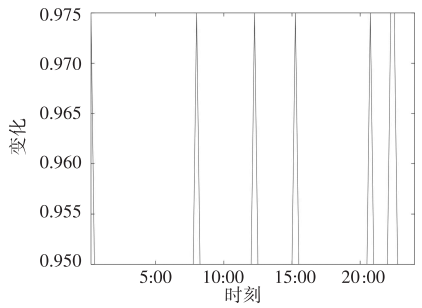
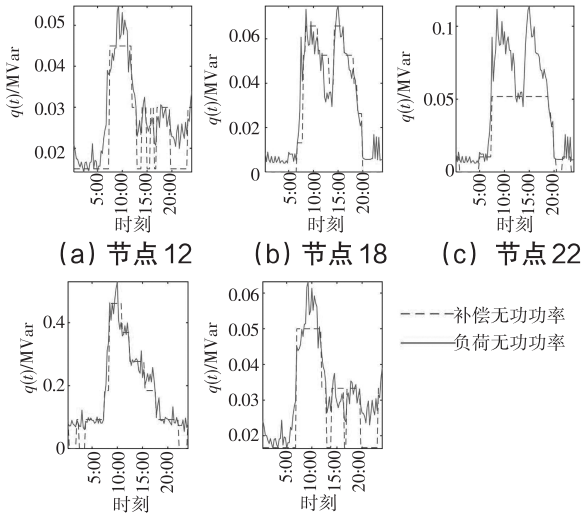


图 9　变压器变比调整



(a) 节点 12　(b) 节点 18　(c) 节点 22

(d) 节点 25　(e) 节点 33

图 10　补偿节点无功功率补偿效果

（下转第 133 页）