

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.06.008

# 含分布式光伏的配电网双层协调电压优化方法

袁昌昊<sup>1,2</sup>, 朱金大<sup>1</sup>, 倪建富<sup>1</sup>

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106;

2. 国网江苏省电力有限公司超高压分公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:**当分布式光伏进入极高比例渗透阶段时,配电网电压越限的问题会更加突出。常用方法是调用配电网内多种可调资源改善电压分布,但较少考虑实际工程中馈线层与变电站之间的信息交互。为此,文中提出一种考虑馈线层与变电站双层协调的配电网电压优化方法。在馈线层建立以线路损耗最小为目标的最优潮流模型,经二阶锥松弛求得馈线层首端电压和注入功率,并反馈给上层变电站;在变电站建立以低压侧母线电压调整量最小为目标的调压模型,将调整后的首端电压返回馈线层,更新潮流分布并获得可调资源的调度计划;最后依据扩展的IEEE 33节点配电系统算例,利用Cplex求解,验证了该优化方法在解决配电网电压越限问题的基础上,可以更好地控制电压偏差、减少设备切换次数、提高系统运行的经济性。

**关键词:**双层协调;信息交互;无功优化;极高比例渗透;电压越限;二阶锥规划

**中图分类号:** TM73

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2023)06-0074-09

## 0 引言

电压是衡量配电网电能质量优劣的重要标准,如何避免电压越限、控制电压偏差备受关注。传统无源配电网在变电站综合自动化系统中嵌入电压无功控制(voltage quadergy control, VQC)模块,根据九区图及改进策略<sup>[1]</sup>调节有载调压变压器(on-line tap changer, OLTC)分接头、投切并联电容器组(capacitor bank, CB),从配电网的首端对电压分布进行改善。然而随着整县光伏政策的推进,分布式光伏将进入渗透率超过50%的极高比例渗透阶段<sup>[2]</sup>,这将进一步扩大光照充足时光伏发电与本地负荷间的功率缺额,反向潮流显著,电压越限问题更加突出<sup>[3]</sup>,线路损耗也急剧增加。而变电站内2种离散型设备的切换频率和单次调压幅度受限,难以灵活应对极高比例光伏接入带来的不确定性,无法给出经济有效的调压方案。

为解决新形势下的配电网电压优化问题,国内外学者提出在馈线层调动多种可调资源,建立非凸非线性的混合整数规划模型<sup>[4]</sup>,在限制电压的同时兼顾网损,考虑多目标优化<sup>[5-8]</sup>,采用基于凸松弛技术的二阶锥规划(second-order cone programming, SOCP)算法<sup>[9-11]</sup>保证求解速度。文献[12-14]在此基础上,用智能软开关代替传统联络开关,可对所

连馈线的有功和无功潮流进行精准控制,但装置的高成本和复杂的优化模型给方法的使用推广带来不小的挑战;文献[15-17]采用数据驱动的方法,将强化学习与神经网络相结合,着力解决实时测量数据下模型的不完整性;文献[18-21]针对源荷预测结果与实际偏差较大的问题,提出在多个时间尺度下通过模型预测控制的方法对电压分布进行优化,着重考虑日前、日内不同时间维度下各调压设备动作的联系。上述方法调用多种可调资源在一定程度上缓解了电压越限问题,但多数是将配电网的馈线层与变电站内所有调压设备同步优化、统一调度,忽视了实际工程中不同层级设备之间的信息交互。

为此,文中提出一种考虑馈线层与变电站双层协调的配电网电压优化方法。首先,在馈线层由最优潮流模型通过二阶锥松弛求得首端电压和无功,注入并上传至变电站;其次,在变电站以电压调整量最小为目标,调节低压侧母线电压并返还馈线层;最后,更新馈线潮流分布,得到各设备调度计划,实现改善电压分布、降低设备切换频率、减少损耗的目的。

## 1 馈线层运行优化模型

配电网馈线是由变电站低压侧公共连接点(point of common coupling, PCC)引出的辐射状网络,如图1所示。图1中, $P_{j,t}$ 、 $Q_{j,t}$ 分别为时段 $t$ 内节点 $j$ 的有功和无功功率; $R_{ij}$ 、 $R_{jk_1}$ 、 $R_{jk_2}$ 分别为支路 $ij$ 、 $jk_1$ 、 $jk_2$ 的电阻值; $X_{ij}$ 、 $X_{jk_1}$ 、 $X_{jk_2}$ 分别为支路 $ij$ 、 $jk_1$ 、 $jk_2$ 的电抗值。文中选取光伏逆变器和静止

收稿日期:2023-04-17;修回日期:2023-06-08

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFB2601604);  
国家电网有限公司科技项目“面向整县屋顶光伏接入的供电系统源荷协同运行与智能运维关键技术研究”与示范”

无功补偿器 (static var compensator, SVC) 作为无功潮流调节设备, 利用储能系统 (energy storage system, ESS) 实现有功潮流调节。在每个调度计划中, 一个调度周期  $T$  被分为  $T/\Delta t$  个等长的时段,  $\Delta t$  为单次调度时间间隔。

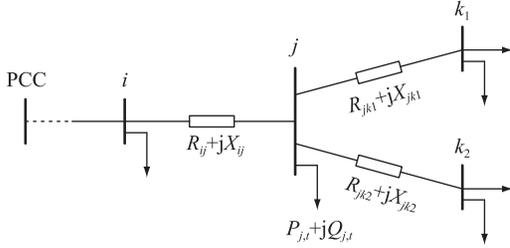


图1 馈线层拓扑

Fig.1 Topology of the feeder layer

### 1.1 馈线层优化目标

在馈线层运行优化模型中, 以时段  $t$  内配电网各支路有功损耗之和  $P_{\text{loss},t}$  最小为目标函数, 即:

$$\min P_{\text{loss},t} = \sum_{ij \in B_1} I_{ij,t}^2 R_{ij} \quad (1)$$

式中:  $B_1$  为配电网支路集合;  $I_{ij,t}$  为时段  $t$  内支路  $ij$  的电流。

### 1.2 馈线层约束条件

馈线层的约束包括支路潮流约束<sup>[5]</sup>、运行安全约束和馈线层可调资源约束。

#### 1.2.1 支路潮流约束

$$U_{i,t}^2 = U_{j,t}^2 + 2(R_{ij}P_{ij,t} + X_{ij}Q_{ij,t}) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2)I_{ij,t}^2 \quad (2)$$

$$I_{ij,t}^2 = \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{U_{j,t}^2} \quad (3)$$

$$\sum_{jk \in J} (P_{jk,t} + R_{jk}I_{jk,t}^2) + P_{j,t} = P_{ij,t} \quad (4)$$

$$\sum_{jk \in J} (Q_{jk,t} + X_{jk}I_{jk,t}^2) + Q_{j,t} = Q_{ij,t} \quad (5)$$

$$P_{j,t} = P_{j,t}^d - P_{j,t}^{\text{PV}} - P_{j,t}^{\text{ch}} + P_{j,t}^{\text{dis}} \quad (6)$$

$$Q_{j,t} = Q_{j,t}^d - Q_{j,t}^{\text{PV}} - Q_{j,t}^{\text{SVC}} \quad (7)$$

式中:  $U_{i,t}$ 、 $U_{j,t}$  分别为时段  $t$  内支路  $ij$  首节点  $i$  与末节点  $j$  的电压;  $R_{jk}$ 、 $X_{jk}$  分别为支路  $jk$  的电阻和电抗值;  $P_{ij,t}$ 、 $Q_{ij,t}$  分别为时段  $t$  内支路  $ij$  末端的有功和无功功率;  $P_{jk,t}$ 、 $Q_{jk,t}$  分别为时段  $t$  内支路  $jk$  末端的有功和无功功率;  $I_{jk,t}$  为时段  $t$  内支路  $jk$  的电流;  $J$  为以节点  $j$  作为首节点的支路集合;  $P_{j,t}^d$ 、 $Q_{j,t}^d$  分别为时段  $t$  内节点  $j$  负荷的有功和无功功率;  $P_{j,t}^{\text{PV}}$ 、 $Q_{j,t}^{\text{PV}}$  分别为时段  $t$  内节点  $j$  处光伏实际发出的有功和无功功率;  $P_{j,t}^{\text{ch}}$ 、 $P_{j,t}^{\text{dis}}$  分别为时段  $t$  内节点  $j$  处储能装置的充、放电功率;  $Q_{j,t}^{\text{SVC}}$  为时段  $t$  内节点  $j$  处 SVC 无功补偿量。

### 1.2.2 运行安全约束

$$U_{\min} \leq U_{j,t} \leq U_{\max} \quad (8)$$

$$I_{\min} \leq I_{j,t} \leq I_{\max} \quad (9)$$

式中:  $U_{\max}$ 、 $U_{\min}$  分别为为保证电压质量设定的配电网节点电压上、下限;  $I_{\max}$ 、 $I_{\min}$  分别为配电网各支路电流的上、下限。

### 1.2.3 光伏逆变器无功调约束

在实际工程中, 光伏逆变器的容量会留有裕度以支撑无功<sup>[22]</sup>。由于光伏逆变器响应速度快, 没有动作频率的限制, 不需要额外投资, 所以基于光伏逆变器的无功调节被广泛采用。文中主要考虑容量约束<sup>[22]</sup>与功率因数约束<sup>[23-24]</sup>。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{j,t}^{\text{PV}} \leq P_{j,\max,t}^{\text{PV}} \\ (Q_{j,t}^{\text{PV}})^2 \leq (S_{j,t}^{\text{PV}})^2 - (P_{j,t}^{\text{PV}})^2 \\ \frac{P_{j,t}^{\text{PV}}}{\sqrt{(P_{j,t}^{\text{PV}})^2 + (Q_{j,t}^{\text{PV}})^2}} \geq \lambda_{\min} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $P_{j,\max,t}^{\text{PV}}$  为时段  $t$  内节点  $j$  处光伏允许的最大有功功率;  $S_{j,t}^{\text{PV}}$  为时段  $t$  内节点  $j$  处光伏逆变器的容量;  $\lambda_{\min}$  为光伏逆变器并网要求的最小功率因数 (超前或滞后)。

### 1.2.4 SVC 约束

SVC 在配电网运行过程中能快速、连续地调节无功出力, 改善 PV 波动与负荷变化引起的电压质量问题, 其运行约束如下:

$$Q_{j,\min}^{\text{SVC}} \leq Q_{j,t}^{\text{SVC}} \leq Q_{j,\max}^{\text{SVC}} \quad (11)$$

式中:  $Q_{j,\min}^{\text{SVC}}$ 、 $Q_{j,\max}^{\text{SVC}}$  分别为节点  $j$  处 SVC 无功补偿量的最小值与最大值。

### 1.2.5 ESS 约束

配电线路的阻抗比较大, 有功、无功功率的耦合性较强, 所以加入 ESS 有利于调节有功潮流进而调整电压分布。ESS 运行约束包括充放电功率约束与荷电状态 (state of charge, SOC) 约束<sup>[25]</sup>。

(1) 充放电功率约束。

$$\begin{cases} C_{j,t}P_{j,\min}^{\text{ch}} \leq P_{j,t}^{\text{ch}} \leq C_{j,t}P_{j,\max}^{\text{ch}} & C_{j,t} \in \{0,1\} \\ D_{j,t}P_{j,\min}^{\text{dis}} \leq P_{j,t}^{\text{dis}} \leq D_{j,t}P_{j,\max}^{\text{dis}} & D_{j,t} \in \{0,1\} \\ C_{j,t} + D_{j,t} \leq 1 \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $C_{j,t}$ 、 $D_{j,t}$  为 0-1 变量, 表征时段  $t$  内节点  $j$  处 ESS 充、放电状态,  $C_{j,t} = 1$ , ESS 充电,  $D_{j,t} = 1$ , ESS 放电, 任意时段内 ESS 只能处于充电、放电或不充不放状态;  $P_{j,\min}^{\text{ch}}$ 、 $P_{j,\min}^{\text{dis}}$  分别为节点  $j$  处 ESS 充、放电功率的最小值;  $P_{j,\max}^{\text{ch}}$ 、 $P_{j,\max}^{\text{dis}}$  分别为节点  $j$  处 ESS 充、放电功率的最大值。

(2) SOC 约束。

$$\begin{cases} S_{j,c} + \frac{1}{E_j} \left( P_{j,t}^{\text{ch}} \eta_j^{\text{ch}} \Delta t - \frac{P_{j,t}^{\text{dis}}}{\eta_j^{\text{dis}}} \Delta t \right) = S_{j,c+\Delta t} \\ S_{j,T} = S_{j,0} \\ 20\% \leq S_{j,c} \leq 90\% \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $S_{j,c}$  为  $c$  时刻节点  $j$  处 ESS 的 SOC 值,  $c = h\Delta t$ ,  $h = 0, 1, 2, \dots, (T - \Delta t)/\Delta t$ ;  $E_j$  为节点  $j$  处 ESS 的额定容量;  $\eta_j^{\text{ch}}$ 、 $\eta_j^{\text{dis}}$  分别为节点  $j$  处 ESS 的充、放电效率。受限于装置寿命,一般将 SOC 设定为 20%~90%,为使每个调度周期内 ESS 的调节性能相同,须保证前一周期的终止时刻 SOC 与后一周期的初始时刻 SOC 相等。

## 2 变电站电压调节模型

变电站的调压是对馈线层电压分布的一次整体平移,通过切换 OLTC 分接头和投切 CB 调整低压侧母线电压,进而改变馈线上其他节点的电压分布,减小整条馈线的电压偏差。变电站拓扑如图 2 所示,其中,OLTC 的模型包含变比为  $n:1$  的理想变压器和忽略并联支路的主变阻抗  $R_T + jX_T$  两部分,馈线层被等效成值为  $P_{D,t} + jQ_{D,t}$  的负荷接在 PCC 处。为方便与馈线层潮流信息的交互,文中将变电站到上级电源间的线路阻抗  $R_L + jX_L$  和变压器阻抗  $R_T + jX_T$  都归算至低压侧,合并为  $R_{LT} + jX_{LT}$ 。图中  $Q_{p,t}^{\text{CB}}$  为时段  $t$  内变电站 CB 提供的无功功率。

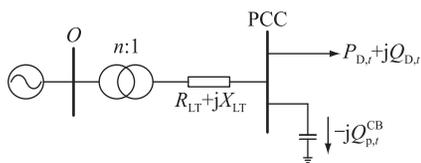


图2 变电站拓扑

Fig.2 Topology of the substation

### 2.1 变电站调压目标

变电站的调压目标是使馈线层电压分布更接近于额定电压为均值的理想分布。设定额定电压与实际电压均值之差为时段  $t$  内 PCC 处的电压调整量  $\Delta U_{p,t}$ <sup>[26]</sup>,则调压模型的目标函数可表示为:

$$\min \Delta U_{p,t} = U_N - \frac{U_{\max,t} + U_{\min,t}}{2} \quad (14)$$

式中:  $U_N$  为馈线的额定电压幅值,设定为 1 p.u.;  $U_{\max,t}$ 、 $U_{\min,t}$  分别为时段  $t$  内馈线层优化所得各节点电压幅值中的最大、最小值。

### 2.2 变电站约束条件

#### 2.2.1 支路电压约束

考虑到 110 kV 及以下的电网中功角  $\delta$  较小,电

压降落的横分量  $\delta U_{p,t}$  也较小,文中都忽略不计。变电站所在电压等级满足  $R_{LT} \ll X_{LT}$ ,故可忽略  $R_{LT}$ 。因此,当系统正常运行时可近似认为:

$$\begin{cases} U_{p,t} = U_{p,t-1} + \Delta U_{p,t} \\ \frac{U_{o,t}}{k} = U_{p,t} + \frac{(Q_{D,t} - Q_{p,t}^{\text{CB}})X_{LT}}{U_{p,t}} \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $U_{p,t-1}$  为在时段  $t$  变电站调压前 PCC 处所保持的时段  $t-1$  的电压;  $U_{o,t}$ 、 $U_{p,t}$  分别为时段  $t$  内平衡节点  $O$  和调压后 PCC 处的电压。

#### 2.2.2 设备切换频率约束

OLTC 与 CB 是机械式调节设备,为保证设备使用寿命、提高经济性,须约束其切换频率。文中考虑 OLTC 分接头切换频率与 CB 投切频率保持一致。

$$\begin{cases} 0 \leq m \leq m_{\max} \\ t_{m+1} - t_m \geq \Delta t_{\min} \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $m$ 、 $m_{\max}$  分别为一个调度周期内设备切换次数与最大切换次数;  $t_m$ 、 $t_{m+1}$  分别为第  $m$ 、 $m+1$  次设备切换所处的时段;  $\Delta t_{\min}$  为相邻 2 次设备切换的时间间隔的最小值。

上述模型仅考虑单条馈线的情形,而变电站低压侧有多条出线时,每条馈线的光伏渗透率、负荷分布都可能存在差异。假定有  $n$  条馈线,分配馈线  $i$  的权重为  $\alpha_i$ ,则目标函数时段  $t$  内 PCC 处电压综合调整量  $\Delta U_{p,t}$  为:

$$\min \Delta U_{p,t} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \left( U_N - \frac{U_{i,\max,t} + U_{i,\min,t}}{2} \right) \quad (17)$$

式中:  $U_{i,\max,t}$ 、 $U_{i,\min,t}$  分别为馈线  $i$  电压幅值的最大值和最小值。

## 3 双层电压优化模型及求解

如图 3 所示,时段  $t$  内的电压优化过程被分成馈线层与变电站两步。首先沿用时段  $t-1$  的 PCC 电压  $U_{p,t-1}$ ,由式(1)一式(13)求解以时段  $t$  内线路损耗  $P_{\text{loss},t}$  最小为目标的馈线层潮流分布,获取  $U_{\max,t}$ 、 $U_{\min,t}$ 、 $P_{D,t}$ 、 $Q_{D,t}$ ;再依据式(14)、式(15)得到以时段  $t$  内电压调整量  $\Delta U_{p,t}$  最小为目标的变电站设备调度计划,即 OLTC 的分接头位置与 CB 并联组数。如果该计划相对于时段  $t-1$  发生改变且满足式(16),则按照计划切换设备后再调压;如果该计划与时段  $t-1$  相同或虽然不同但式(16)并不满足,则沿用时段  $t-1$  的计划进行调压;最后将调整后的 PCC 电压  $U_{p,t}$  送回馈线层更新最优潮流,得到潮流分布和馈线层设备调度计划,具体流程见图 4。

在双层模块中馈线层的运行优化是一个 NP 难的混合整数非凸非线性规划问题<sup>[27]</sup>。利用二阶锥

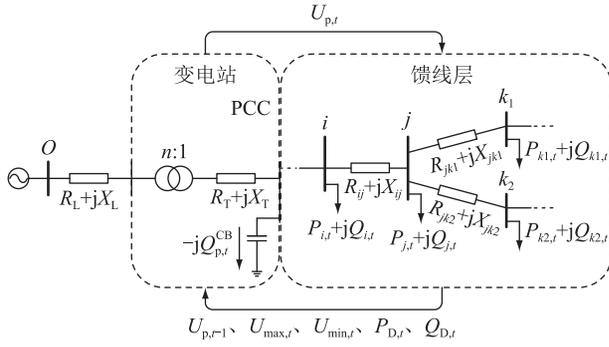


图3 含双层模块的电压优化

Fig.3 Voltage optimization with double-layer modules

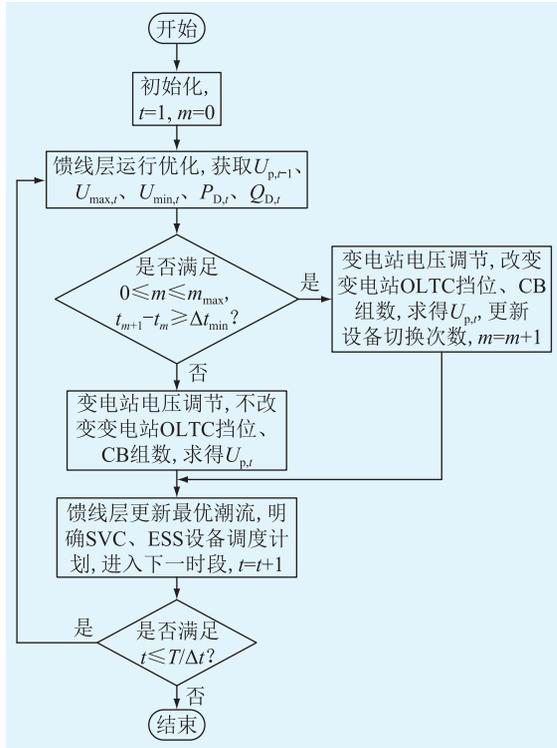


图4 双层电压优化求解流程

Fig.4 Solution flow for double-layer voltage optimization

松弛算法可以将原模型转换成可解的混合整数二阶锥规划模型,将松弛后的可行域限定在有限的凸锥范围内,利用商业求解程序 Cplex、Gurobi 等算法包可高效地求解结果。

令  $I_{ij,t}^2 = l_{ij,t}^2$ 、 $U_{j,t}^2 = v_{j,t}$ , 替换优化模型中的电流、电压幅值平方项。对式(3)进行二阶锥松弛,得到凸约束:

$$l_{ij,t} \geq \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{v_{j,t}} \quad (18)$$

可用二范数形式等价:

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ l_{ij,t} - v_{j,t} \end{array} \right\|_2 \leq l_{ij,t} + v_{j,t} \quad (19)$$

综合上述变形,原馈线层运行优化模型变为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min P_{\text{loss},t} = \sum_{ij \in B_1} l_{ij,t} R_{ij} \\ \text{s.t. } v_{i,t} = v_{j,t} + 2(R_{ij} P_{ij,t} + X_{ij} Q_{ij,t}) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) l_{ij,t} \\ \sum_{jk \in J} (P_{jk,t} + R_{jk} l_{jk,t}) + P_{j,t} = P_{ij,t} \\ \sum_{jk \in J} (Q_{jk,t} + X_{jk} l_{jk,t}) + Q_{j,t} = Q_{ij,t} \\ v_{\min} \leq v_{j,t} \leq v_{\max} \\ l_{\min} \leq l_{ij,t} \leq l_{\max} \\ \text{式(6)、式(7)、式(18)} \\ \text{式(10)—式(13)} \end{array} \right. \quad (20)$$

式中:  $v_{\max}$ 、 $v_{\min}$  分别为节点电压平方的上、下限;  $l_{\max}$ 、 $l_{\min}$  分别为支路电流平方的上、下限。

## 4 算例分析

### 4.1 仿真平台与参数

为了验证所建电压优化模型的正确性,基于 MATLAB 2021a 平台,采用 Cplex 12.9 商业求解器进行求解。测试系统的硬件环境是英特尔 Core i5-8300H、16 GB 内存、64 位 Windows10 操作系统。

如图 5 所示,在 IEEE 33 节点配电系统的基础上加以改进,设定每个调度周期  $T$  为 24 h,单次调度时间间隔  $\Delta t$  为 15 min。馈线层的节点 12、18、23、26 接入光伏,光伏逆变器的额定容量均为  $2 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,并网要求的最小功率因数  $\lambda_{\min}$  为 0.98<sup>[23]</sup>,整条线路的光伏电量渗透率为 90%<sup>[2]</sup>,线路典型日光伏发电与负荷功率曲线如图 6 所示。

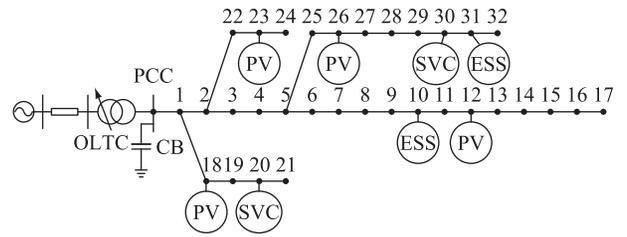


图5 改进 IEEE 33 节点网络

Fig.5 Improved IEEE 33-node network

节点 20、30 接入 SVC (SVC20、SVC30),其无功调节范围分别为  $-200 \sim 200 \text{ kvar}$  与  $-800 \sim 800 \text{ kvar}$ ;节点 10、31 接入 ESS (ESS10、ESS31),额定容量为  $1200 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,充放电功率上限为  $400 \text{ kW}$ ,充电效率为 95%,放电效率为 90%。变电站包含 OLTC 与 CB 2 种调压设备,每个调度周期内允许设备最大切换次数  $m_{\max}$  为 8,相邻 2 次切换的时间间隔最小值  $\Delta t_{\min}$  为 45 min。其中,OLTC 选用额定容量  $6300 \text{ kV} \cdot \text{A}$  的 35 kV 油浸式双绕组变压器,调压范围为

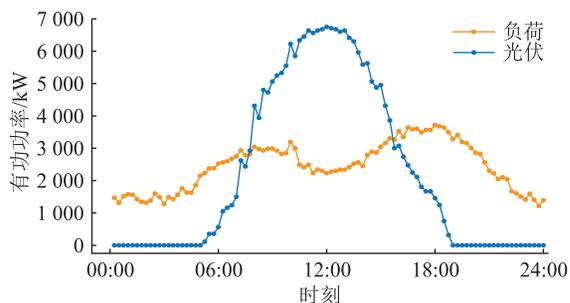


图6 分布式光伏出力与负荷功率曲线  
Fig.6 Curves of distributed photovoltaic output and load power

0.95~1.05 p.u., 档距 0.025 p.u., 短路损耗 36.7 kW, 短路电压百分比 8%<sup>[28]</sup>;CB 并联于 PCC 处,单组可补偿无功功率 600 kvar, 总共 3 组。电压合格范围为 0.93~1.07 p.u., 为对比电压偏差的程度,文中定义时段  $t$  内电压偏差  $\Delta U_t$  为:

$$\Delta U_t = \sum_{i \in B_2} (U_{i,t} - U_N)^2 \quad (21)$$

式中:  $B_2$  为配电网节点集合。

#### 4.2 算例结果与分析

为对比不同方式下电压偏差、设备切换次数、有功网损三方面的控制效果,设置以下 3 种情景。

情景一:仅考虑馈线层 ESS、SVC 与光伏逆变器参与调节,于本地进行电压优化;

情景二:仅考虑变电站内 OLTC、CB 参与调节,于馈线层首端统一进行电压优化;

情景三:运用文中方法,考虑馈线层与变电站设备间的交互,展开电压优化。

经过仿真,得到不同情景下各层设备的调度计划,如图 7—图 9 所示。在馈线层,情景一与情景三的调度计划几乎一致。如图 7(a)、(b)所示,ESS 在全天有 2 次充放电过程,第一次是为应对负荷早高峰在夜间储能,荷电量波动较小;第二次是在中午光伏高发期间充电,晚高峰时释放,荷电量大范围波动,尽可能在本地填补功率缺额,减少线路上的功率流动,降低网损。SVC 对于无功潮流的调控如图 7(c)所示,其中 SVC30 处于线路末端,电压越限问题突出,所以调度容量更大,在负荷高峰时提供的无功支撑逼近功率上限。光伏逆变器的无功调度计划如图 8 所示,相比 SVC,光伏逆变器受功率因数的限制,无功调节能力有限,不同位置负荷需求的差异对逆变器的无功出力也有极大影响,在光伏高发期间节点 12、18 会适当减少无功输出以避免电压越上限。

在变电站调压环节,对于 CB 的投切,如图 9 (a)所示,情景二中一个调度周期内需要投切 3 组、

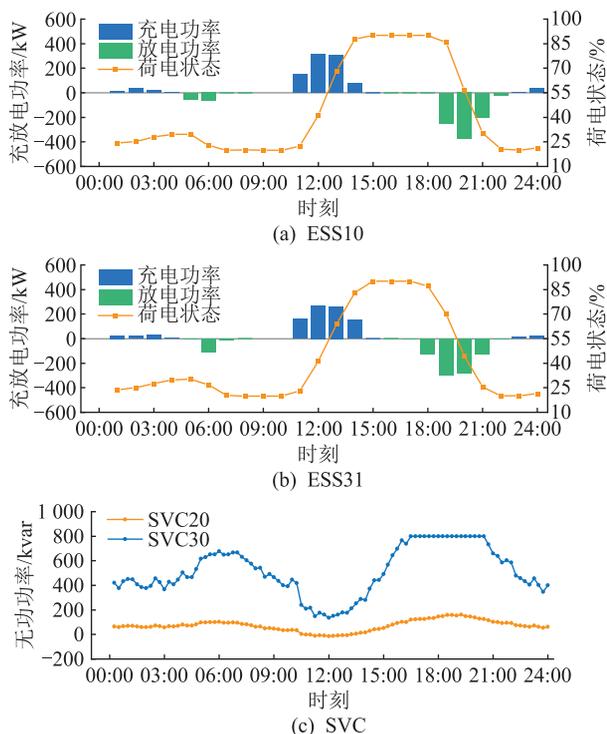


图7 ESS 与 SVC 调度计划

Fig.7 Scheduling plan for ESS and SVC

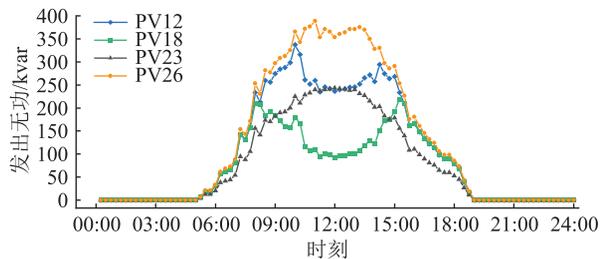


图8 光伏无功出力计划

Fig.8 Reactive power plan for PV reactive power

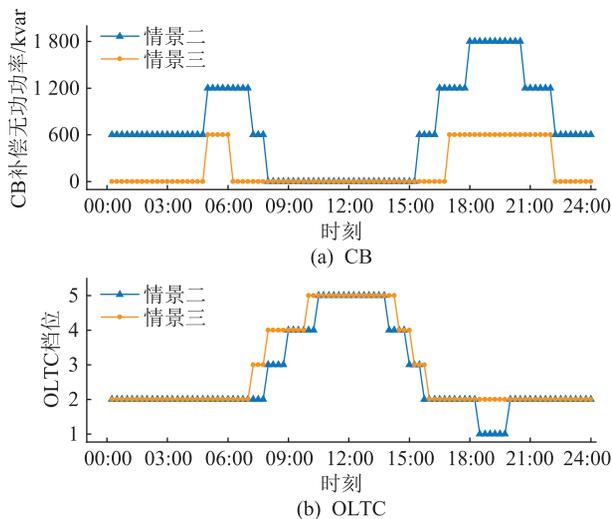


图9 变电站设备调度计划

Fig.9 Scheduling plan for equipment in the substation  
切换 8 次,而情景三只用到 2 组、切换 2 次,这极大

节约了设备的使用成本。结合图 7,相比于早高峰,在晚高峰期间,系统的负荷需求过大,馈线层的可调资源不足以缓解低电压的问题,需要变电站从配电网首端进行电压调整,提供较长时间的无功支撑。对于 OLTC 的调节,如图 9(b)所示,情景二由于调节手段匮乏,在晚高峰出现短时间内分接头来回调节的现象,而情景三不存在这一问题,在中午光伏高发期间提高 OLTC 的变比,适当降低线路末端节点 17 附近的电压,避免过电压问题出现。

经过馈线层、变电站的协调控制,配电网的电压分布有极大改善。系统在优化前的原电压分布如图 10 所示,优化后的电压分布如图 11 所示。图 10 中,电压在 0.91~1.09 p.u.波动,节点 12—17 在 12:00 的过电压问题明显,与节点 29—32 在 19:00 都出现严重的欠电压问题。对此,情景一至情景三进行了不同程度的改善。如图 11(a)所示,情景一通过 SVC 与 ESS 的合理调控,消除了电压越限问题,但电压的整体分布与优化前的情景相近,与额定电压偏差较大,在线路末端仍有“中午过高、夜晚过低”的现象。如图 11(b)所示,情景二经过 CB 与 OLTC 的调节,各时段的电压做了整体平移,尽可能在 1.0 p.u.附近波动。情景三在情景二的基础上增加了馈线层的本地控制,如图 11(c)所示,早晚高峰电压的波动幅度更小,中午线路末端的电压更低,此时配电网的各时段电压都在 0.95~1.04 p.u.波动,更贴合配电网对电压质量的要求。

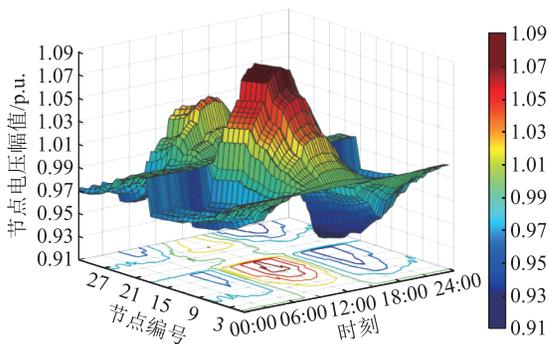


图 10 原电压分布

Fig.10 Primary voltage distribution

各种情景的网络损耗对比如图 12 所示。情景一与情景三分别以全周期和各时段网络损耗最小为目标优化求解,SVC、ESS 及光伏逆变器及时调整出力,减小网络功率流动,其损耗曲线相似,数值较小。反观情景二,调节对象为首端电压,对线路功率的控制作用不明显,因此线路损耗与无优化时的结果相近。

各种情景的电压偏差对比如图 13 所示,相比无优化的场景,可以清晰地看到 3 种情景在电压偏差

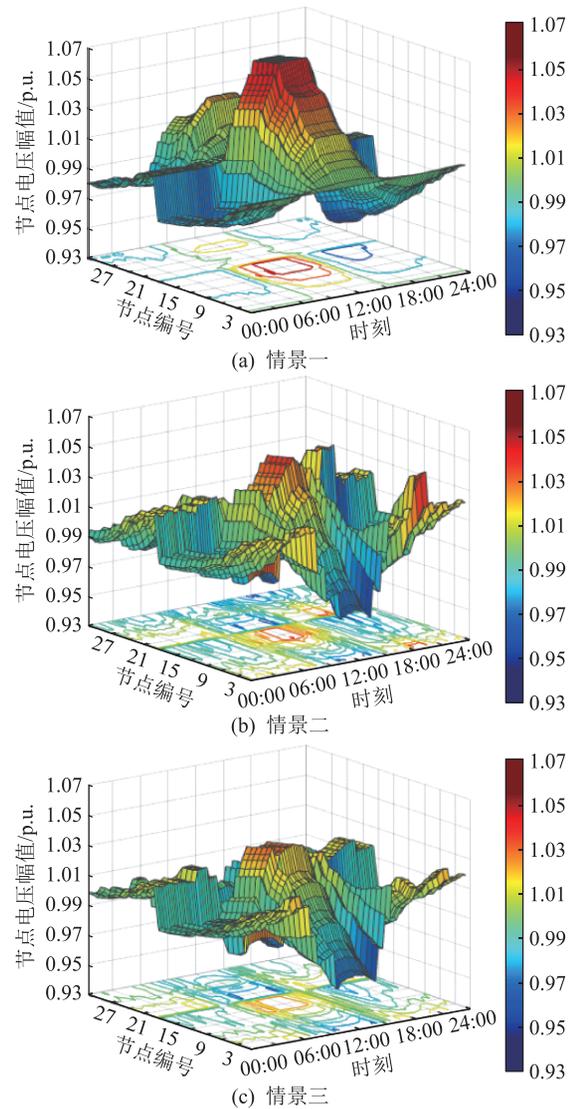


图 11 不同情景的电压分布

Fig.11 Voltage distribution under different scenarios

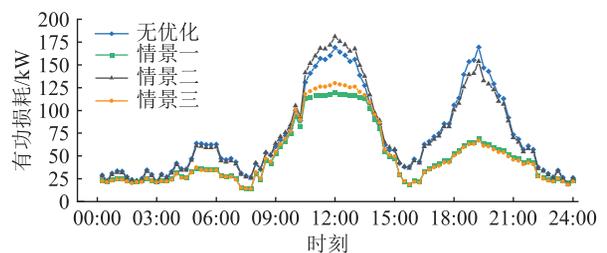


图 12 不同情景网络损耗的对比

Fig.12 Comparison of network loss under different scenarios

的控制上都有不同程度的改善。其中,情景一在光伏高发期间,2 处 ESS 的充电功率已达上限,荷电量骤升,由于缺少情景二、三中对各时段首端电压的直接调整,电压控制效果不及情景二、三。尤其是情景三在晚高峰期间馈线层 ESS 放电的同时在变电站及时投切 CB,可以将电压偏差控制在极低的范围内。

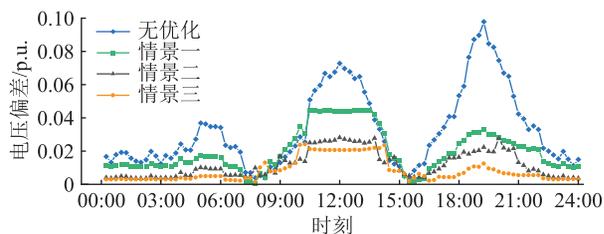


图 13 不同情景电压偏差的对比

Fig.13 Comparison of voltage deviation under different scenarios

### 4.3 求解算法对比

为验证文中 SOCP 算法的精确性与高效性,选用含网损和电压偏差的多目标粒子群算法与遗传算法分别求解双层电压优化模型,对比三者的求解信息、各时段电压偏差之和与线路损耗之和。为检验最优解处式(17)能否满足等式要求,定义每个时段下各支路的松弛误差  $e$  如下:

$$e = l_{ij,t} - \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{v_{j,t}} \quad (22)$$

求解结果如表 1 所示,其中,多目标粒子群算法随机性较大,受种群数目与迭代次数影响明显,文中选用粒子群数目和迭代次数皆为 20。遗传算法略过凸松弛处理,直接求解混合整数非凸规划问题,其求解难度明显增大,求解速度较慢。相比而言,经过 SOCP 松弛后再求解的方法在保证求解结果精确的前提下,可以获得良好的求解速度,且求解难度较低。

表 1 3 种算法的比较

Table 1 Comparison of three methods

求解算法	求解时间	运算精度	电压偏差/kV	线路损耗/kW
文中方法	58.3 s	$10^{-8}$	13.79	4 850.34
粒子群算法	220.5 s	$10^{-8}$	14.88	4 849.66
遗传算法	32 min	$10^{-6}$	16.83	4 853.91

## 5 结语

针对极高比例分布式光伏接入下配电网运行中的电压越限问题,从工程实际出发,强调不同层级间可调资源调度的先后关联与信息交互,提出一种考虑馈线层-变电站双层协调的配电网电压优化方法。在每个时段先由馈线层本地调节,再由变电站调整馈线首端电压实现电压分布的整体平移。通过 3 种情景的对比验证了文中方法在保证模型求解精度的前提下不仅将各时段电压偏差控制得较小、得到均衡的电压分布,而且优化方案的网损较低、设备切换次数少,大幅提高了系统运行的经济性。

文中模型与算例考虑的光伏有功出力是根据最大功率点跟踪得到的确定值,未来可以考虑光伏出力的不确定性与预测信息的反馈校正,进一步优化模型。

### 致谢

本文得到南瑞集团科技项目“含高比例新能源的配电网功能结构、系统架构与评价指标及方法研究”资助,谨此致谢!

### 参考文献:

[1] 尤金,刘俊勇,刘友波,等. 基于非参数估计的无功电压控制响应规则辨识[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(13): 1-12.  
 YOU Jin, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Identification of reactive power and voltage control response rules based on nonparametric estimation [J]. Power System Protection and Control, 2018,46(13):1-12.

[2] 卓振宇,张宁,谢小荣,等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化,2021,45(9): 171-191.  
 ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021,45(9):171-191.

[3] 李征,王文宾,韩胜峰,等. 考虑无功支撑的分布式光伏接入配电网电压适应性研究[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(11):32-41.  
 LI Zheng, WANG Wenbin, HAN Shengfeng, et al. Voltage adaptability of distributed photovoltaic access to a distribution network considering reactive power support [J]. Power System Protection and Control, 2022,50(11):32-41.

[4] 黄鸣宇,张庆平,张沈习,等. 高比例清洁能源接入下计及需求响应的配电网重构[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(1):116-123.  
 HUANG Mingyu, ZHANG Qingping, ZHANG Shenxi, et al. Distribution network reconfiguration considering demand-side response with high penetration of clean energy [J]. Power System Protection and Control, 2022,50(1):116-123.

[5] 赵金利,李雨薇,李鹏,等. 基于二阶锥规划的有源配电网 SNOP 电压无功时序控制方法[J]. 高电压技术,2016,42(7):2134-2141.  
 ZHAO Jinli, LI Yuwei, LI Peng, et al. Sequential voltage regulation of soft normally open point in active distribution network based on second-order cone programming [J]. High Voltage Engineering, 2016,42(7):2134-2141.

[6] 刘文霞,王凌飞,徐艺铭,等. 考虑节点运行风险差异的多端柔性配电网自适应潮流优化[J]. 电力自动化设备,2019,39(5):1-6,14.  
 LIU Wenxia, WANG Lingfei, XU Yiming, et al. Adaptive power flow optimization of multi-terminal flexible distribution network considering voltage operation risk difference [J]. Electric Power

- Automation Equipment, 2019, 39(5): 1-6, 14.
- [7] NAZIR F U, PAL B, JABR R. A two-stage chance constrained volt/var control scheme for active distribution networks with nodal power uncertainties [C]//2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Atlanta, GA, USA. IEEE, 2020:1.
- [8] YANG M S, LI J Q, DU R, et al. Reactive power optimization model for distribution networks based on the second-order cone and interval optimization[J]. Energies, 2022, 15(6): 2235.
- [9] 党皓天, 刘东, 陈飞, 等. 基于 SoC FPGA 硬件并行化计算的配电网电压控制技术[J]. 电力工程技术, 2022, 41(3): 39-47, 91.  
DANG Haotian, LIU Dong, CHEN Fei, et al. Voltage control strategy for distribution network based on SoC FPGA hardware parallel computing[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 39-47, 91.
- [10] CHOWDHURY M M U T, KAMALASADAN S. A new second-order cone programming model for voltage control of power distribution system with inverter-based distributed generation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(6): 6559-6567.
- [11] 徐添锐, 丁涛, 李立, 等. 适应三相不平衡主动配电网无功优化的二阶锥松弛模型[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(24): 81-88.  
XU Tianrui, DING Tao, LI Li, et al. Second-order cone relaxation model adapting to reactive power optimization for three-phase unbalanced active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24): 81-88.
- [12] 于文山, 黎明, 由蓁. 含储能的三端 SOP 对主动配电网的潮流优化研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(3): 101-110.  
YU Wenshan, LI Ming, YOU Rui. Power flow optimization study on active distribution network based on three-terminal sop with energy storage system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(3): 101-110.
- [13] 高聪哲, 黄文焘, 余墨多, 等. 基于智能软开关的主动配电网电压模型预测控制优化方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(13): 3263-3274.  
GAO Congzhe, HUANG Wentao, YU Moduo, et al. A model predictive control method to optimize voltages for active distribution networks with soft open point[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3263-3274.
- [14] 王成山, 季节, 冀浩然, 等. 配电系统智能软开关技术及应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(4): 1-14.  
WANG Chengshan, JI Jie, JI Haoran, et al. Technologies and application of soft open points in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 1-14.
- [15] 胡丹尔, 彭勇刚, 韦巍, 等. 多时间尺度的配电网深度强化学习无功优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5034-5045.  
HU Daner, PENG Yonggang, WEI Wei, et al. Multi-timescale deep reinforcement learning for reactive power optimization of distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5034-5045.
- [16] 顾洁, 孟璐, 朱瞳彤, 等. 数据驱动的精确定建模含源配电网无功运行优化[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1): 1-11.  
GU Jie, MENG Lu, ZHU Tongtong, et al. Data-driven optimization for reactive power operation in source distribution network without accurate modeling[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 1-11.
- [17] 倪爽, 崔承刚, 杨宁, 等. 基于深度强化学习的配电网多时间尺度在线无功优化[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 77-85.  
NI Shuang, CUI Chenggang, YANG Ning, et al. Multi-time-scale online optimization for reactive power of distribution network based on deep reinforcement learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 77-85.
- [18] 刘自发, 张婷, 王岩. 基于模型预测控制的主动配电网多场景变时间尺度优化调度[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 121-128.  
LIU Zifa, ZHANG Ting, WANG Yan. Multi-scenario variable time scale optimal scheduling of active distribution network based on model predictive control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 121-128.
- [19] 窦晓波, 常莉敏, 倪春花, 等. 面向分布式光伏虚拟集群的有源配电网多级调控[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 21-31.  
DOU Xiaobo, CHANG Limin, NI Chunhua, et al. Multi-level dispatching and control of active distribution network for virtual cluster of distributed photovoltaic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 21-31.
- [20] 任佳依, 顾伟, 王勇, 等. 基于模型预测控制的主动配电网多时间尺度有功无功协调调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1397-1407.  
REN Jiayi, GU Wei, WANG Yong, et al. Multi-time scale active and reactive power coordinated optimal dispatch in active distribution network based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1397-1407.
- [21] 陈瑞捷, 鲁宗相, 乔颖. 基于多场景模糊集和改进二阶锥方法的配电网优化调度[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4621-4629.  
CHEN Ruijie, LU Zongxiang, QIAO Ying. Optimal dispatch based on multi-scene ambiguity set and modified second-order cone algorithm for distribution network[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4621-4629.
- [22] 陈家超, 李钦豪, 唐渊, 等. 考虑光伏选相投切的低压配电网三相平衡优化[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 71-78.  
CHEN Jiachao, LI Qin hao, TANG Yuan, et al. Three-phase balance optimization of low-voltage distribution network considering photovoltaic phase selection and switching[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 71-78.
- [23] 高鹏程, 王蕾, 李立生, 等. 基于光伏逆变器调节的配电网电压控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4): 190-196.  
GAO Pengcheng, WANG Lei, LI Lisheng, et al. Voltage control strategy based on adjustment of PV inverters in distribution

- network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4):190-196.
- [24] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 光伏电站无功补偿技术规范:GB/T 29321—2012[S]. 北京:中国标准出版社,2013.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical specification for reactive power compensation of PV power station: GB/T 29321-2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [25] 邓振立,张涛,李荣,等. 基于  $\varepsilon$ -松弛的主动配电网有功-无功协调调度求解方法[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 104-111.
- DENG Zhenli, ZHANG Tao, LI Rong, et al. Active-reactive coordination scheduling method for active distribution network based on  $\varepsilon$ -relaxation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 104-111.
- [26] 吴文传,张伯明,巨云涛. 主动配电网网络分析与运行调控[M]. 北京:科学出版社,2016.
- WU Wenchuan, ZHANG Boming, JU Yuntao. Active distribution networks analysis, operation and control[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [27] 刘畅,郭力,柴园园,等. 含高渗透分布式光伏的增量配电网日前优化调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18):90-98.
- LU Chang, GUO Li, CHAI Yuanyuan, et al. Day-ahead optimal scheduling method for incremental distribution network with high penetration of distributed photovoltaic[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 90-98.
- [28] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 油浸式电力变压器技术参数和要求:GB/T 6451—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2016.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specification and technical requirements for oil-immersed power transformers: GB/T 6451-2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.

作者简介:



袁昌昊

袁昌昊(1996),男,硕士,助理工程师,研究方向为配电网运行优化(E-mail:751642713@qq.com);

朱金大(1964),男,硕士,研究员级高级工程师,从事智能配电网、电动汽车与电网互动相关工作;

倪建富(1981),男,硕士,高级工程师,从事智能配电网相关工作。

## Coordinated voltage optimization method in distribution network with distributed photovoltaic

YUAN Changhao<sup>1,2</sup>, ZHU Jinda<sup>1</sup>, NI Jianfu<sup>1</sup>

(1. NARI Group (State Grid Electric Power Research Institute) Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

2. Extra-high Voltage Branch Company of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** When the distributed photovoltaics enters the stage of extremely high proportion penetration, the problem of over-limit voltage in the distribution network becomes more prominent. A variety of adjustable resources in the distribution network are used in the common method to improve voltage distribution, but there is little consideration given to the information interaction between feeder layer and substation in practical engineering. Therefore, a voltage optimization method for distribution network considering the coordination between feeder layer and substation double layer is proposed in this paper. An optimal power flow model with the goal of minimizing the line loss is established in the feeder layer. The voltage at the head of the feeder layer and the injected power of the feeder layer are obtained by second-order cone relaxation, and fed back to the upper substation. A regulating voltage model is established in the substation with the goal of minimizing the voltage adjustment amount of PCC, and the adjusted voltage is returned to the feeder layer to update the power flow distribution. Then, the scheduling plan of adjustable resources are obtained. Finally, the extended IEEE 33-node power distribution system is taken as an example. The Cplex optimization solver is used to verify that the method can control the voltage and reduce the number of switching equipment. The economy of system operation on the basis of solving the distribution network voltage over-limit problem is improved.

**Keywords:** double layer coordination; information interaction; reactive power optimization; extremely high proportion of penetration; over-limit voltage; second-order cone programming

(编辑 方晶)