

# 含分布式光伏的主动配电网电压分布式优化控制

姜涛,张东辉,李雪,张儒峰,李国庆

(东北电力大学 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室,吉林 吉林 132012)

**摘要:**针对高比例分布式光伏接入配电网所带来的电压越限问题,提出一种含分布式光伏的主动配电网电压分布式优化控制策略。根据配电网支路潮流模型和光伏逆变器控制模型,构建以节点电压偏差、光伏削减量和网损最小为目标的主动配电网电压优化控制模型;利用二阶锥松弛技术对所构建的模型进行凸化处理;针对集中式优化控制存在计算复杂度高和信息私密性差的不足,基于分解协调原则将配电网分区,构建基于交替方向乘子法(ADMM)的多区域电压分布式协同优化控制框架;为改善算法收敛性能,基于残差平衡原理和松弛技术,提出一种加速ADMM。最后,基于IEEE 33节点测试系统进行算例分析,结果表明利用所提方法可有效解决配电网电压越限问题,并减少网络损耗。

**关键词:**主动配电网;分布式光伏;电压优化;二阶锥松弛;分布式优化;加速交替方向乘子法

**中图分类号:**TM 615

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202108011

## 0 引言

近年来,随着配电网中分布式电源接入比例不断提高,特别是分布式光伏(PV(PhotoVoltaic))的大量并网,配电网潮流逆向流动更加频繁,导致配电网电压分布发生剧烈变化;同时,PV出力的不确定性导致配电网电压波动和越限等问题愈发突出<sup>[1]</sup>,给配电网的安全运行带来了巨大挑战。

传统的配电网运行常利用电容器组和有载调压器等设备解决PV大规模并网带来的电压越限问题,但其调节速度慢且会增加投资成本,若频繁调节还将导致设备使用寿命下降。分布式PV在并网发电过程中,除了可输出有功功率外还具有一定的无功功率调节能力<sup>[2]</sup>,通过在一定范围内调节PV的无功功率输出,可改善配电网电压质量,降低网络损耗。同时,当PV出力大、负荷小时,可适当削减有功输出,增强无功调节能力,改善配电网运行状况<sup>[3]</sup>。因此,在主动配电网中,合理地优化控制分布式PV的有功和无功输出,对保障配电网安全、经济运行意义重大。

目前,含分布式PV的主动配电网电压优化控制方法主要分为以下3种:本地优化控制、集中式优化控制和分布式优化控制。文献[4]提出了一种基于PV无功调节的主动配电网本地电压控制策略;文献[5]提出了基于分布式电源有功、无功调节的本地电压控制策略,以改善配电网电压质量。它们都具有响应速度快、不需要通信网络等优点,但缺乏对分布式PV全系统范围的协调,无法实现电压的全局最优控制。文献[6]提出了一种PV逆变器集中/本地两

阶段电压/无功控制方法,弥补了采用本地控制难以实现整体协调的不足,但存在单点故障、通信计算负担大及信息私密性差的弊端。文献[7]提出了一种基于电压灵敏度的电压协调控制方案,利用叠加定理求得电压越限节点对不同位置PV的灵敏度因子,然而该控制方案通信负担重,并且计算量大。文献[8]提出了一种配电网分布式电压控制策略,采用分布式紧急控制时先利用下游节点再利用上游节点PV提供电压支持。文献[9]针对PV渗透率过高导致电压越限的问题,提出了一种两级电压/无功分布式控制策略调节PV逆变器的无功输出。文献[8-9]提高了电压调节能力,但未采用对配电网进行分区的分布式优化控制,优化效果有限。配电网的电压分区分布式优化控制方法,通过配电网分区和多区域间协调,不仅能实现电压的全局最优控制,还可以降低计算复杂度,提高优化计算效率,具有良好的优化效果。然而,目前含分布式PV的主动配电网电压分区分布式优化控制仍处于初步研究阶段。

近年来,交替方向乘子法ADMM(Alternating Direction Method of Multipliers)已成为求解电力系统分布式优化控制问题的重要方法。文献[9-10]均以节点为单元构建了基于ADMM的分布式PV无功分布式优化控制方法。文献[11]提出了一种基于ADMM的主动配电网日前两阶段分布式优化调度策略。然而,在求解过程中,上述文献采用的ADMM易出现迭代次数过多、计算速度慢等问题<sup>[12]</sup>。因此,研究ADMM的加速方法以提高主动配电网电压分布式优化控制算法的计算效率具有重要意义。

为此,本文提出一种含分布式PV的主动配电网电压分布式优化控制策略。首先,以节点电压偏差、PV削减量和网损最小为目标构建含分布式PV的主

收稿日期:2021-02-03;修回日期:2021-06-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0903402)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2017YFB0903402)

动配电网电压优化控制模型;其次,利用二阶锥SOC(Second-Order Cone)松弛技术对该模型进行凸化处理;然后,基于分解协调原则将配电网合理分区,构建基于ADMM的多区域分布式电压协同优化控制框架;进一步地,基于残差平衡原理和松弛技术,提出一种加速ADMM来改善算法收敛性能;最后,通过IEEE 33节点测试系统对所提方法进行分析和验证。

## 1 含分布式PV的主动配电网电压优化控制模型

本节首先构建含分布式PV的主动配电网电压优化控制模型,进而利用SOC松弛技术对该非凸模型进行凸化处理。

### 1.1 电压优化控制模型

本文的配电网电压优化控制目标为节点电压偏差、PV削减量和网损最小,其约束条件包括配电网支路潮流约束、运行安全约束和PV逆变器控制约束。

#### 1.1.1 目标函数

根据配电网不同运行需求,本文拟通过调节分布式PV的有功和无功输出实现节点电压偏差、PV削减量和网损最小的控制目标,因此所建立的电压优化控制目标函数为:

$$\min_{U_n, P_{PV,n}, l_{nk}} \omega_1 \xi_1 \sum_{n \in N_{bus}} (U_n - U_1)^2 + \omega_2 \xi_2 \sum_{n \in N_{PV}} (P_{PV,n}^{\max} - P_{PV,n}) + \omega_3 \xi_3 \sum_{n \in N_{bus}} \sum_{k: n \rightarrow k} r_{nk} l_{nk} \quad (1)$$

式中:  $N_{bus}$  为配电网中节点集合;  $U_n$  为节点  $n$  电压幅值; 设节点 1 电压幅值为电压基准值, 即  $U_1=1$  p.u.;  $N_{PV}$  为配电网中接有 PV 的节点集合;  $P_{PV}^{\max}$  和  $P_{PV,n}$  分别为 PV 最大有功输出功率和节点  $n$  的 PV 有功输出功率;  $k: n \rightarrow k$  表示以节点  $n$  为首端节点的支路末端节点集合;  $r_{nk}$  和  $l_{nk}$  分别为支路  $n-k$  的电阻和电流幅值平方;  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  为最小化权重系数, 均大于等于 0 且  $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ ;  $\xi_1, \xi_2, \xi_3$  为大于 0 的校正系数, 以保证式(1)中 3 项数值为同一数量级。式(1)中第一项为节点电压偏差, 第二项为 PV 削减量, 第三项为网损, 显然第一项是非线性的。

#### 1.1.2 约束条件

##### 1) 配电网潮流约束。

本文的配电网潮流模型采用图 1 所示的已广泛应用的配电网支路潮流模型<sup>[13]</sup>。

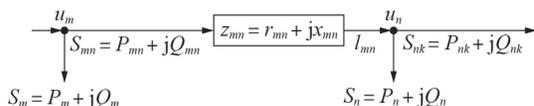


图1 配电网支路潮流模型

Fig.1 Branch power flow model of distribution network

图 1 中,  $u_m, u_n$  分别为节点  $m, n$  电压幅值的平方;  $x_{mn}$  为支路  $m-n$  的电抗;  $P_{mn}$  和  $Q_{mn}$  分别为由节点  $m$  流过支路  $m-n$  的有功和无功功率;  $P_n$  和  $Q_n$  分别为注入节点  $n$  的净有功负荷和无功负荷。与该支路有关的电流及有功、无功功率约束可表示为:

$$l_{mn} u_m = P_{mn}^2 + Q_{mn}^2 \quad l_{mn} \geq 0 \quad (2)$$

$$u_n = u_m - 2(r_{mn} P_{mn} + x_{mn} Q_{mn}) + (r_{mn}^2 + x_{mn}^2) l_{mn} \quad (3)$$

$$P_n = (P_{mn} - l_{mn} r_{mn}) - \sum_{k: n \rightarrow k} P_{nk} \quad (4)$$

$$Q_n = (Q_{mn} - l_{mn} r_{mn}) - \sum_{k: n \rightarrow k} Q_{nk} \quad (5)$$

不难看出, 式(2)为非凸非线性约束, 其他均为线性等式约束。

##### 2) 配电网运行安全约束。

为确保配电网安全运行, 运行过程中支路电流不应越限, 且节点电压应保持在安全范围内, 因此对应的配电网安全运行约束条件为:

$$\begin{cases} l_{mn} \leq l_{mn}^{\max} \\ u_n^{\min} \leq u_n \leq u_n^{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $l_{mn}^{\max}$  为支路  $m-n$  电流幅值平方最大值;  $u_n^{\min}$  和  $u_n^{\max}$  分别为节点  $n$  电压幅值平方最小值和最大值。

##### 3) PV 逆变器控制约束。

本文采用文献[14]中的 PV 逆变器最优控制模型, 该最优控制模式可对逆变器的有功、无功输出进行调节, 其工作区域示意图如附录 A 图 A1 所示。根据图 A1 所示的 PV 逆变器工作区域, 可得 PV 的运行约束为:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{PV,n} \leq P_{PV,n}^{\max} \\ P_{PV,n}^2 + Q_{PV,n}^2 \leq S_{PV,n}^2 \\ -P_{PV,n} \sqrt{1-k_f^2} / k_f \leq Q_{PV,n} \leq P_{PV,n} \sqrt{1-k_f^2} / k_f \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $Q_{PV,n}$  为节点  $n$  PV 逆变器的无功输出功率;  $S_{PV,n}$  为节点  $n$  PV 逆变器的额定容量;  $k_f = \cos \theta$ , 为 PV 逆变器的最小功率因数, 其为给定常数。易知, 式(7)为凸约束。

显然, 式(7)所示的约束充分考虑了 PV 逆变器额定容量和最小功率因数的限制。以图 A1 中的区域 I 为例, PV 逆变器运行在边界 0-1 上时表示 PV 仅有功输出可调, 无功输出为 0; 运行在边界 1-2 上时表示 PV 仅无功输出可调, 有功按最大功率输出; 运行在边界 2-3 上时表示 PV 有功、无功输出均可调, 但受逆变器额定容量限制; 运行在边界 3-0 上时表示 PV 有功、无功输出均可调, 但受最小功率因数限制。整个区域 I 均满足 PV 逆变器的运行约束条件, 且逆变器输出的无功功率为感性, 故在该区域优化 PV 逆变器的功率输出, 有利于低电压的提升。区域 II 的运行边界与区域 I 的运行边界约束相同, 但区域 II 内 PV 逆变器输出容性无功, 即消耗感性无功, 故在该区域优化 PV 的功率输出, 有利于过电压恢复。

## 1.2 模型的凸化处理

式(1)所示的非线性目标和式(2)所示的非凸非线性等式约束将导致所构建的模型非凸,进而难以获得模型最优解。为此,本节对上述模型进行凸化处理。为了将式(1)中非线性目标线性化,引入节点电压幅值与其平方的等式关系,如式(8)所示。进一步地,利用SOC松弛技术对式(2)和式(8)进行凸化处理,分别如式(9)和式(10)所示。

$$u_n = U_n^2 \quad (8)$$

$$P_{mn}^2 + Q_{mn}^2 \leq l_{mn} u_m \quad (9)$$

$$U_n^2 \leq u_n \quad (10)$$

其标准的SOC形式分别为:

$$\| [ 2P_{mn} \ 2Q_{mn} \ l_{mn} - u_m ]^T \| \leq l_{mn} + u_m \quad (11)$$

$$\| [ 2U_n \ u_n - 1 ]^T \| \leq u_n + 1 \quad (12)$$

上述SOC松弛过程如附录A图A2所示。利用SOC松弛技术,可将原问题的非凸可行域 $C_{\text{original}}$ 松弛成一个凸锥可行域 $C_{\text{SOC}}$ ,进而将原问题转化成了一个凸问题。由于引入了SOC松弛,在 $C_{\text{SOC}}$ 中求解得到的最优解 $S$ 是原问题的下界解,若最优解 $S$ 为原始可行域 $C_{\text{original}}$ 中的点,则SOC松弛被认为是精确的,即最优解 $S$ 也为原问题最优解。文献[15]严格推导了松弛精确成立的充分条件,在满足一定条件下,即目标函数为关于支路电流的增函数、网络拓扑为辐射形连通图等,证明了原问题在得到最优解时,可以保证松弛后的等号足够精确,满足原问题的所有约束。而本文所提主动配电网电压优化问题可以满足上述条件。由于松弛后为凸模型,采用传统的分支定界法和切平面法也可以保证解的最优性和计算效率。经凸化处理后,式(1)所示的模型可重新表述为:

$$\begin{cases} \min_{U_n, P_{PV,n}, l_{nk}} \omega_1 \xi_1 \sum_{n \in N_{\text{bus}}} (u_n - 2U_n U_1 - U_1^2) + \\ \omega_2 \xi_2 \sum_{n \in N_{\text{PV}}} (P_{PV,n}^{\max} - P_{PV,n}) + \omega_3 \xi_3 \sum_{n \in N_{\text{bus}}} \sum_{k: n \rightarrow k} r_{nk} l_{nk} \quad (13) \\ \text{s.t. 式(3)---(7)、(11)、(12)} \end{cases}$$

## 2 电压分布式优化控制模型及其求解

针对上述电压优化控制模型,一般可通过附录A图A3所示的集中式和分布式优化控制来实现全局最优控制。图A3(a)中,集中式优化控制将所有的PV和负荷运行信息经过通信网络传送到中央控制中心,由中央控制器统一进行优化计算,并发布最优的控制指令,以实现控制的全局最优。然而,随着高比例分布式PV电源的接入,集中式优化控制存在通信网络建设成本高、计算复杂度大、信息私密性差且易出现单点故障等弊端[16]。分布式优化控制方法可以很好地克服上述问题,该控制模式如图A3(b)所示。PV和负荷运行信息仅需上传到其所属子区控制中心,各子区控制器可独立、并行计算,相邻子

区仅需交换少量边界信息,通过迭代计算实现全局最优,各子区独立发布最优控制指令。因此,本文采用分布式优化控制方法实现配电网电压的全局最优控制。

为此,本节首先基于分解协调原则将配电网分区,构建基于ADMM的电压分布式优化控制模型;然后,基于残差平衡原理和松弛技术,提出一种加速ADMM来改善算法收敛性能;最后,采用加速ADMM对电压分布式优化模型进行求解。

### 2.1 基于ADMM的电压分布式优化控制模型

为实现含分布式PV的主动配电网电压分布式优化控制,首先根据分解协调原则[17],将配电网分区;然后,基于ADMM一般一致性优化方法[18],建立电压分布式优化控制模型。

#### 2.1.1 配电网分区

本节以图2所示6节点辐射形配电网为例,根据分解协调原则,对配电网进行分区。

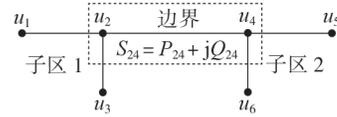


图2 6节点辐射形配电网结构

Fig.2 Structure of 6-bus radial distribution network

图2中,由节点2、4和支路2-4构成子区1和子区2的边界,边界变量为节点2和节点4电压及由节点2流过支路2-4的传输功率。进行配电网分区时,根据分解协调原则,需将子区间边界复制到相邻子区内,以实现相邻子区的解耦。配电网具体分区过程如图3所示。图中,点划线表示复制相邻子区的边界支路;空心圆圈表示复制相邻子区的边界节点;上标“+”表示子区保留边界变量;上标“-”表示复制相邻子区的边界变量。可见子区1复制节点4和支路2-4,保留节点2;子区2复制节点2,保留节点4和支路2-4。将子区1边界变量定义为 $\hat{x}_1 = [u_2^+, u_4^-, P_{24}^-, Q_{24}^-]$ 、子区2边界变量定义为 $\hat{x}_2 = [u_2^-, u_4^+, P_{24}^+, Q_{24}^+]$ 。为使配电网分区后相邻子区问题解耦,保证分区前后问题的等效性,定义全局变量 $\hat{y} = [u_2, u_4, P_{24}, Q_{24}]$ 以保证子区1和子区2边界变量对应相等,即令 $\hat{x}_1 = \hat{y}$ 、 $\hat{x}_2 = \hat{y}$ 。

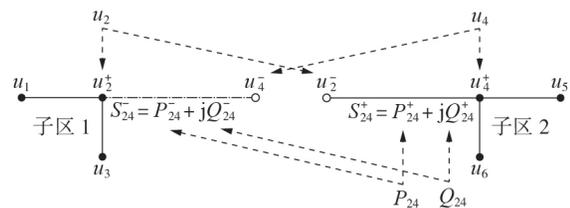


图3 6节点辐射形配电网分区过程

Fig.3 Partition process of 6-bus radial distribution network

### 2.1.2 基于ADMM的分布式优化控制模型

ADMM的思想是将凸问题中的原始变量分解为不同变量 $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{y}$ ,目标函数也分解为两部分,以保证优化过程的可分解性,算法标准形式如下:

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{y}) \\ \text{s.t. } \mathbf{Ax} + \mathbf{By} = \mathbf{c} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $f(\mathbf{x})$ 和 $g(\mathbf{y})$ 均为凸函数; $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{c}$ 为系数矩阵。变量 $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{y}$ 的约束条件 $\mathbf{Ax} + \mathbf{By} = \mathbf{c}$ 构成了ADMM目标函数中变量的可行域<sup>[19]</sup>。

基于文献[18]所提ADMM的一般一致性优化方法,本文以式(14)中 $f(\mathbf{x})$ 表示各子区独立优化目标,构建的基于ADMM一般一致性优化方法的电压分布式优化控制模型为:

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{x}_j \in X_j} \sum_{j=1}^N f_j(\mathbf{x}_j) \\ \text{s.t. } \hat{\mathbf{x}}_j - \hat{\mathbf{y}}_j = 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $N$ 为配电网子区数量; $f_j(\mathbf{x}_j)$ 为凸函数,表示式(13)中与子区 $j$ 对应的电压优化控制目标函数;子区变量 $\mathbf{x}_j$ 由子区内部变量和边界变量 $\hat{\mathbf{x}}_j$ 组成; $X_j$ 为子区变量 $\mathbf{x}_j$ 的可行域,即式(13)中与子区 $j$ 对应的约束条件; $\hat{\mathbf{x}}_j - \hat{\mathbf{y}}_j = 0$ 为边界变量 $\hat{\mathbf{x}}_j$ 与其全局变量 $\hat{\mathbf{y}}_j$ 构成的一致性约束,以保证相邻的子区独立求解时边界节点电压和边界支路传输功率相等。式(15)的增广拉格朗日函数形式为:

$$\mathcal{L}_j = f_j(\mathbf{x}_j) + \boldsymbol{\lambda}_j^\top (\hat{\mathbf{x}}_j - \hat{\mathbf{y}}_j) + 0.5\rho_j \|\hat{\mathbf{x}}_j - \hat{\mathbf{y}}_j\|^2 \quad (16)$$

式中: $\rho_j > 0$ 为子区 $j$ 惩罚参数; $\boldsymbol{\lambda}_j$ 为子区 $j$ 对偶变量。为了便于对全局变量更新,将对偶变量 $\boldsymbol{\lambda}_j$ 伸缩为 $\boldsymbol{\mu}_j = (1/\rho_j)\boldsymbol{\lambda}_j$ ,则式(17)与式(16)等效。

$$\mathcal{L}_j = f_j(\mathbf{x}_j) + 0.5\rho_j \|\hat{\mathbf{x}}_j - \hat{\mathbf{y}}_j + \boldsymbol{\mu}_j\|^2 - 0.5\rho_j \|\boldsymbol{\mu}_j\|^2 \quad (17)$$

ADMM的迭代计算过程如下:

$$\mathbf{x}_j^{k+1} = \underset{\mathbf{x}_j \in X_j}{\operatorname{argmin}} \mathcal{L}_j(\mathbf{x}_j, \hat{\mathbf{y}}_j^k, \boldsymbol{\mu}_j^k) \quad (18)$$

$$\hat{\mathbf{y}}_j^{k+1}(g) = \frac{1}{k_g} \sum_{\mathcal{G}(j,i)=g} \hat{\mathbf{x}}_i^{k+1}(i) \quad (19)$$

$$\boldsymbol{\mu}_j^{k+1} = \boldsymbol{\mu}_j^k + (\hat{\mathbf{x}}_j^{k+1} - \hat{\mathbf{y}}_j^{k+1}) \quad (20)$$

式中: $k$ 为迭代次数; $k_g$ 为与 $\hat{\mathbf{y}}_j(g)$ 相连的边界变量个数; $\mathcal{G}(j,i)=g$ 为边界变量 $\hat{\mathbf{x}}_j$ 中第 $i$ 个元素与全局变量 $\hat{\mathbf{y}}_j$ 中第 $g$ 个元素的映射关系。

图4为配电网子区独立优化和子区间的边界变量交互过程。

以子区1为例,子区1内的子区变量 $\mathbf{x}_1 = [u_1, P_{12}, Q_{12}, \dots, u_2^+, u_4^-, P_{24}^-, Q_{24}^-]$ ,其中, $\hat{\mathbf{x}}_1 = [u_2^+, u_4^-, P_{24}^-, Q_{24}^-]$ 为边界变量,其余变量为内部变量;全局变量 $\hat{\mathbf{y}}_1 = [u_2, u_4, P_{24}, Q_{24}]$ 。子区1和子区2利用式(18)独立、并行优化,求解得子区变量 $\mathbf{x}_1$ 和 $\mathbf{x}_2$ ;子区1和子区2交换彼此的边界变量 $\hat{\mathbf{x}}_1$ 和 $\hat{\mathbf{x}}_2$ ,利用式(19)对全局变

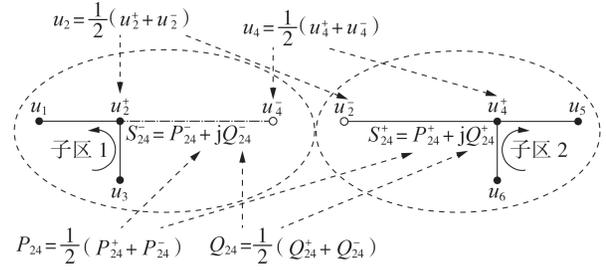


图4 子区独立优化和子区间的边界变量交互

Fig.4 Independent optimization of sub-network and boundary variables exchange between sub-networks

量 $\hat{\mathbf{y}}_1$ 、 $\hat{\mathbf{y}}_2$ 更新,如图4所示;利用式(20)更新对偶变量 $\boldsymbol{\mu}_1$ 和 $\boldsymbol{\mu}_2$ ;循环图4子区内的优化计算和子区间的边界变量交互过程,直至满足收敛条件式(22),停止迭代。

$$\begin{cases} \|\mathbf{r}_j^{k+1}\| = \|\hat{\mathbf{x}}_j^{k+1} - \hat{\mathbf{y}}_j^{k+1}\| \\ \|\mathbf{s}_j^{k+1}\| = \|\boldsymbol{\rho}_j(\hat{\mathbf{y}}_j^{k+1} - \hat{\mathbf{y}}_j^k)\| \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} \|\mathbf{r}_j^{k+1}\| \leq \epsilon_{\text{pri},j}^{k+1} = \sqrt{|\hat{\mathbf{x}}_j|} \epsilon^{\text{abs}} + \epsilon^{\text{rel}} \max\{\|\hat{\mathbf{x}}_j^{k+1}\|, \|\hat{\mathbf{y}}_j^{k+1}\|\} \\ \|\mathbf{s}_j^{k+1}\| \leq \epsilon_{\text{dua},j}^{k+1} = \sqrt{|\hat{\mathbf{x}}_j|} \epsilon^{\text{abs}} + \epsilon^{\text{rel}} \rho_j \|\boldsymbol{\mu}_j^{k+1}\| \end{cases} \quad (22)$$

式中:初始残差 $\mathbf{r}_j^{k+1}$ 和对偶残差 $\mathbf{s}_j^{k+1}$ 为本次迭代解到最优解的距离,当一致性约束条件精确满足时, $\mathbf{r}_j^{k+1}$ 趋向于0,当目标函数值趋向最小值时, $\mathbf{s}_j^{k+1}$ 趋向于0; $\epsilon_{\text{pri},j}^{k+1}$ 和 $\epsilon_{\text{dua},j}^{k+1}$ 分别为本次迭代初始残差和对偶残差的收敛阈值; $|\hat{\mathbf{x}}_j|$ 为配电网子区边界变量 $\hat{\mathbf{x}}_j$ 元素的数量; $\epsilon^{\text{abs}}$ 和 $\epsilon^{\text{rel}}$ 分别为绝对容差和相对容差参考值,本文中 $\epsilon^{\text{abs}} = 10^{-6}$ , $\epsilon^{\text{rel}} = 5 \times 10^{-5}$ 。

### 2.2 加速ADMM

由于采用ADMM求解所提电压分布式优化控制模型过程时,传统ADMM的计算效率受惩罚参数影响严重且迭代次数过多,为此,本文基于残差平衡原理和松弛技术<sup>[18]</sup>,提出一种加速ADMM来改善算法收敛性能,具体方法如下。

#### 1) 自适应惩罚参数。

由于惩罚参数选取不当将导致初始、对偶残差的收敛速度差别较大,迭代次数过多,故基于残差平衡原理,提出一种自适应惩罚参数方法,具体如下:

$$\rho_j^{k+1} = \begin{cases} \tau^{\text{incr}} \rho_j^k & \|\mathbf{r}_j^{k+1}\| \geq \eta \|\mathbf{s}_j^{k+1}\| \\ \rho_j^k / \tau^{\text{decr}} & \|\mathbf{s}_j^{k+1}\| \geq \eta \|\mathbf{r}_j^{k+1}\| \\ \rho_j^k & \text{其他} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $\eta > 1$ , $\tau^{\text{incr}} > 1$ , $\tau^{\text{decr}} > 1$ ,一般情况下,令 $\eta = 10$ 、 $\tau^{\text{incr}} = \tau^{\text{decr}} = 2$ 。若增大 $\rho_j$ 的数值,将增强式(16)和式(17)中范数项的最小化程度,促进子区边界变量 $\hat{\mathbf{x}}_j$ 与其全局变量 $\hat{\mathbf{y}}_j$ 相等,加快 $\mathbf{r}_j^{k+1}$ 收敛;若减小 $\rho_j$ 的数值,可抑制目标函数振荡,加快 $\hat{\mathbf{y}}_j$ 的收敛。

#### 2) 超松弛。

在利用ADMM迭代计算过程中,基于松弛技术引入松弛参数 $\alpha \in (0, 2)$ ,若 $\alpha > 1$ 则为超松弛;在 $\hat{y}$ 和 $\mu$ 的更新公式中,计及上一次迭代计算结果,用 $\alpha Ax^{k+1} - (1-\alpha)(By-c)$ 代替 $Ax^{k+1}$ ,有助于数值平稳更新。经整理,迭代计算过程如下:

$$\hat{\mu}_j^{k+1} = \mu_j^k + (\alpha - 1)(\hat{x}_j^{k+1} - \hat{y}_j^k) \quad (24)$$

$$\hat{y}_j^{k+1}(g) = \frac{1}{k_g} \sum_{g(j,i)=g} (x_i^{k+1}(i) + \hat{\mu}_j^{k+1}(i)) \quad (25)$$

$$\mu_j^{k+1} = \hat{\mu}_j^{k+1} + (\hat{x}_j^{k+1} - \hat{y}_j^{k+1}) \quad (26)$$

与式(19)和式(20)相比,式(24)~(26)增加了一个中间计算过程,即利用式(24)求解得到 $\hat{\mu}_j^{k+1}$ 后,再利用 $\hat{\mu}_j^{k+1}$ 更新 $\hat{y}_j$ 和 $\mu_j$ 。仿真研究表明,当松弛参数 $\alpha \in [1.5, 1.8]$ 时,算法收敛性能更好。

### 2.3 基于加速ADMM的模型求解

综上,本文利用所提加速ADMM求解含分布式PV的主动配电网电压分布式优化控制的计算流程如附录A图A4所示,相关计算过程如下。

1)确定配电网各子区域边界,将配电网分区,生成各子区的子区变量 $x_j$ 、边界变量 $\hat{x}_j$ 和全局变量 $\hat{y}_j$ ,并构建如式(15)所示的含分布式PV的主动配电网电压分布式优化控制模型。

2)输入配电网子区网络、分布式PV和负荷数据,初始化基本参数 $\rho_j$ 、 $\eta$ 、 $\tau^{incr}$ 、 $\tau^{decr}$ 、 $\alpha$ 、 $\hat{y}_j$ 和 $\mu_j$ ,并将其导入电压分布式优化控制模型,形成如式(17)所示的增广拉格朗日函数。

3)各子区独立、并行优化求解式(18),求解得到子区变量 $x_j$ ;相邻子区互相传送边界变量 $\hat{x}_j$ ,根据式(24)~(26),利用超松弛方法,求解中间变量 $\hat{\mu}_j$ ,并更新全局变量 $\hat{y}_j$ 和对偶变量 $\mu_j$ 。

4)由式(21)计算初始残差 $r_j$ 和对偶残差 $s_j$ ,并利用式(22)判断是否收敛,若初始、对偶残差均小于收敛阈值,则停止迭代并输出电压优化控制结果;否则,根据式(23),利用自适应惩罚参数方法,更新惩罚参数 $\rho_j$ 并返回到步骤3)。

## 3 算例分析

针对所提含分布式PV的主动配电网电压分布式优化控制方法,本节通过含分布式PV的IEEE 33节点测试系统进行算例分析,以验证所提模型的可行性和算法的有效性。

IEEE 33节点测试系统如图5所示。分布式PV编号为PV<sub>1</sub>—PV<sub>9</sub>,依次安装在节点5、8、11、15、18、21、25、29和33,最小功率因数 $k_f = 0.95$ ;基于文献[19]提出的利用系统分区形成的全局变量数量来指导系统分区的方法,综合考虑配电网拓扑结构、地理区域和PV分布等情况,以节点5、6和支路5-6为边界分解子区A<sub>1</sub>和A<sub>2</sub>,以节点8、9和支路8-9为边界

分解子区A<sub>2</sub>和A<sub>3</sub>;子区A<sub>1</sub>—A<sub>3</sub>安装的分布式PV电源分别为(PV<sub>1</sub>, PV<sub>6</sub>, PV<sub>7</sub>)、(PV<sub>2</sub>, PV<sub>8</sub>, PV<sub>9</sub>)和(PV<sub>3</sub>, PV<sub>4</sub>, PV<sub>5</sub>)。在本文算例中,令电压基准值为12.66 kV,基准负荷为3715+j2300 kV·A,功率基准值为10 MW,节点电压安全运行范围为[0.95, 1.05] p.u.。

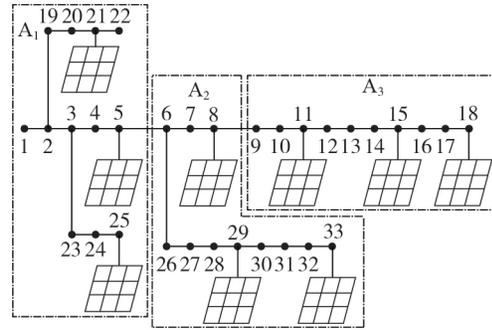


图5 IEEE 33节点测试系统示意图

Fig.5 Schematic diagram of IEEE 33-bus test system

### 3.1 电压优化控制前后对系统运行的影响

为研究所提电压优化控制策略对配电网电压、PV削减量和网损的影响,分别设置以下2种场景:场景1为PV出力大且负荷水平低导致系统节点电压出现越上限的情景;场景2为PV出力小且负荷水平高导致系统节点电压出现越下限的情景。

上述2种场景下式(1)中各权重系数取值为 $\omega_1 = 0.4$ ,  $\omega_2 = 0.3$ ,  $\omega_3 = 0.3$ ,各场景的计算结果说明如下。

#### 1)场景1。

晴朗天气下,在10:00—14:00间的某一时刻,光照充足且负荷水平低,造成PV出力过剩,从而导致部分节点电压越限,此时PV输出功率如附录B表B1中控制前的输出功率所示,负荷为基准负荷的50%。采用所提控制策略对分布式PV进行有功、无功调节,优化控制前、后系统节点电压分布如图6所示。图中,节点电压为标么值,后同。

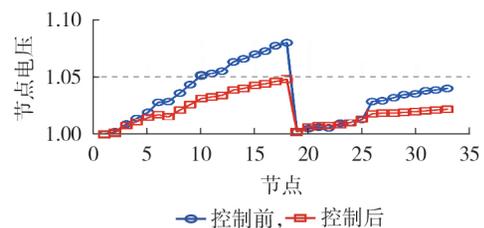


图6 场景1下控制前、后系统节点电压分布

Fig.6 Node voltage profiles of system before and after control in Scenario 1

图6中,优化控制前由于PV出力过剩,导致节点10—18电压出现了越上限现象,其中节点18电压越限至1.08 p.u.。为使配电网节点电压均在安全运行范围内,采用所提电压优化控制策略后PV输出功率及其变化量如附录B表B1中控制后的输出功率

所示,其中正值表示PV增发有功/感性无功,负值表示削减有功/发出容性无功。根据本文所提算法可得PV<sub>2</sub>—PV<sub>5</sub>、PV<sub>8</sub>和PV<sub>9</sub>均发出容性无功,用于抑制节点电压的升高;由于节点18电压越限最为严重,PV<sub>5</sub>需削减64 kW有功输出来弥补无功调节的不足,进而满足电压控制要求。通过对PV有功、无功输出进行调节,系统各节点电压均运行在1~1.0479 p.u.之间,满足电压安全约束。同时,由于PV<sub>1</sub>、PV<sub>6</sub>和PV<sub>7</sub>的无功调节对电压越限节点的影响小,故其发出感性无功主要用于优化系统潮流分布,补偿无功负荷,以减小网损。然而,为消除电压越限,PV增发的容性无功将导致系统净无功负荷增加了641 kvar,进而导致网损增大了54.8 kW。

## 2) 场景2。

选择傍晚(17:00—19:00)的某一时刻,此时光照强度下降、负荷增大,导致部分末端节点电压越下限,PV输出功率为附录B表B2中控制前的输出功率,负荷为基准负荷的1.2倍。采用本文所提方法对分布式PV控制前、后的配电网节点电压分布如图7所示。

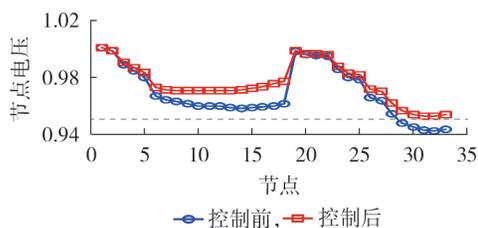


图7 场景2下控制前、后系统节点电压分布

Fig.7 Node voltage profiles of system before and after control in Scenario 2

图7中,由于PV出力变小且负荷增加,电压优化控制前,系统节点电压水平较低且末端节点29—33电压低于下限值,如节点32电压低至0.942 p.u.。采用所提优化控制策略后PV输出功率及其变化量如附录B表B2中控制后的输出功率所示。此时,PV<sub>1</sub>—PV<sub>9</sub>有功输出变化量均为0,即系统PV有功输出未发生变化,各PV无功输出受最小功率因数限制,充分利用PV逆变器无功输出能力增发感性无功789 kvar以减小系统净无功负荷,进而提高系统节点电压水平,系统节点电压运行在0.952~1 p.u.之间,网损减小了45.7 kW。

场景1、2的分析结果表明:采用本文所提含分布式PV的主动配电网电压分布式优化控制策略可有效解决配电网电压越限问题。场景1下,PV通过增发容性无功和适当削减有功,可消除电压越上限的现象;场景2下,PV通过增发感性无功补偿无功负荷,可消除电压越下限的现象,同时可减小网损。因此,通过调节分布式PV的有功、无功输出,有助于改

善系统电压安全性,使系统运行更安全、经济。

## 3.2 权重系数对系统运行的影响

由式(1)可知,不同的权重系数 $\omega_1$ — $\omega_3$ 将直接影响所提电压分布式优化控制策略的结果,为此本节进一步研究了不同 $\omega_1$ — $\omega_3$ 取值对系统电压、PV削减量和网损的影响。由于减小单位网损可能导致削减更多的PV,故在本节算例中仅研究权重系数对电压偏差和PV削减量的影响。令 $\omega_1 + \omega_2 = 1$ , $\omega_3$ 为十分接近于0的数值,用于保证SOC松弛后原问题的精确性,可忽略其对电压偏差和PV削减量的影响。设置以下5种不同的权重系数( $\omega_1, \omega_2$ )组合: $G_1=(1, 0)$ 、 $G_2=(0.75, 0.25)$ 、 $G_3=(0.5, 0.5)$ 、 $G_4=(0.25, 0.75)$ 和 $G_5=(0, 1)$ ,这5种组合代表了目标函数从完全最小化电压偏差到完全最小化PV削减量的变化。

图8为不同权重系数下节点电压分布情况。不难看出,随着电压偏差最小化权重系数的减小,组合 $G_1$ — $G_5$ 的系统节点最大电压偏差逐渐增大,由0.0005 p.u.增大到0.05 p.u.。

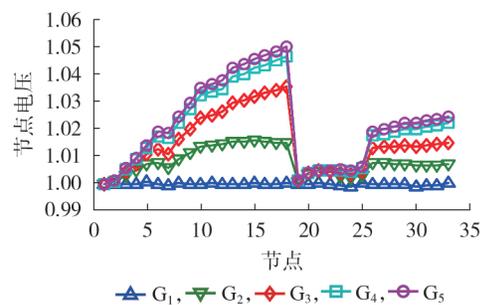


图8 不同权重系数下节点电压计算结果

Fig.8 Calculation results of node voltage with different weight coefficients

不同权重系数下的PV功率输出情况如附录B图B1所示。图B1(a)为PV电源有功输出情况,随着PV削减量最小化权重系数的增大,组合 $G_1$ — $G_5$ 的系统总PV有功输出由1966.3 kW逐渐增大到4479.9 kW;在组合 $G_2$ 中,电压偏差最小项影响仍较大,PV<sub>5</sub>位于系统末端且距根节点1最远,其有功出力增加不利于电压分布,为了增大系统PV电源有功出力,同时保持较好的电压分布,此时削减了PV<sub>5</sub>的有功输出。图B1(b)为PV电源无功输出情况,由于组合 $G_1$ 完全最小化电压偏差,此时PV电源发出的感性无功用于补偿系统无功负荷,以减小电压偏差;然而,在组合 $G_2$ — $G_4$ 中,最优潮流下,PV电源发出容性无功来抑制电压的升高,同时随着电压偏差最小化影响程度的下降,发出的无功逐渐减小;在组合 $G_5$ 中,由于完全最小化PV削减量,部分PV电源发出感性无功用于减小网损。

表1为不同权重系数下系统的PV削减量、网损和功率损失,其中功率损失为PV削减量和网损之

和。可见随着PV削减量最小化程度增加,PV削减量和系统功率损失逐渐减小,由于电压偏差和PV削减量存在最小化的平衡过程,网损呈现先增加后减小的趋势。

表1 不同权重系数下系统的PV削减量、网损和功率损失

Table 1 PV curtailment, network loss and power loss of system with different weight coefficients  
单位: kW

组合	PV削减量	网损	功率损失
G <sub>1</sub>	2533.7	5.1	2538.8
G <sub>2</sub>	557.0	112.3	669.3
G <sub>3</sub>	104.5	161.0	265.5
G <sub>4</sub>	32.1	143.5	175.6
G <sub>5</sub>	20.1	136.9	157.0

上述分析表明:调整权重系数可实现不同的优化方案,组合G<sub>1</sub>实现了电压偏差最小,有利于系统的安全运行;组合G<sub>5</sub>实现了PV削减量最小,同时系统功率损失最小,使系统运行更经济。因此,改变优化模型中的权重系数,可有效权衡电压偏差与PV削减量间的最小化程度,使配电网运行更加主动、灵活。

### 3.3 基于加速ADMM的分布式优化方法分析

本节首先对比了3.1节中场景1和3.2节中组合G<sub>3</sub>的分布式优化结果与集中式优化结果,以验证所提电压分布式优化方法的可行性;然后,分析了所提模型SOC松弛的精确性,以验证该模型的有效性;最后,对本文采用的加速ADMM收敛性能进行分析、验证。

表2为场景1和组合G<sub>3</sub>下分布式与集中式优化结果的数值对比,表中电压偏差为标幺值。不难看出,采用分布式优化后的系统节点电压偏差、PV削减量和网损与集中式优化结果十分接近,偏差均在合理范围内,故利用所提方法可实现配电网电压全局最优控制;同时,分布式优化计算效率高于集中式。由此可得,采用所提分布式优化方法可通过交换少量边界信息实现系统全局最优控制,且计算效率高,能适应含分布式PV的主动配电网运行需求。

表2 分布式与集中式优化结果对比

Table 2 Comparison of results between distributed and centralized optimization

优化设置	控制方式	电压偏差	PV削减量/kW	网损/kW	计算时间/s
场景1	集中式	0.0201	63.4	249.8	4.04
	分布式	0.0200	64.0	249.7	1.75
组合G <sub>3</sub>	集中式	0.0110	104.6	161.0	4.08
	分布式	0.0110	104.5	161.0	1.82

为验证所提电压分布式优化中SOC松弛的精确性,由式(25)定量计算了场景1、2和组合G<sub>1</sub>—G<sub>5</sub>的节点电压和支路电流的SOC松弛间隙最大值 $\delta_{u,soc}$

和 $\delta_{l,soc}$ 。各分布式优化中SOC松弛间隙最大值如附录B表B3所示。由表可知,各分布式优化中节点电压SOC松弛间隙最大值均小于 $10^{-7}$  p.u.,支路电流SOC松弛间隙最大值均小于 $10^{-5}$  p.u.,满足松弛后原问题的精确性要求,因此可认为所提电压分布式优化模型的计算结果是原非凸问题的全局最优解。

$$\begin{cases} \delta_{u,soc} = \max \left\{ 1 - \frac{U_n^2}{u_n} \right\} \\ \delta_{l,soc} = \max \left\{ l_{mn} - \frac{P_{mn}^2 + Q_{mn}^2}{u_m} \right\} \end{cases} \quad (27)$$

图9为利用传统ADMM和加速ADMM求解时目标函数值(标幺值)的收敛过程。不难发现:利用加速ADMM进行求解时,目标函数可快速收敛到与集中式优化结果十分接近的数值。传统ADMM收敛所需的迭代次数为107次,计算耗时为3.77 s;而本文所提的加速ADMM所需迭代次数仅为42次,计算耗时为1.73 s,是传统ADMM计算耗时的0.46。由此可得,本文所提加速ADMM具有良好的收敛性能,可有效减少迭代次数,提高算法计算效率。

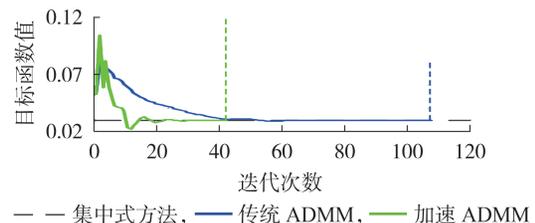


图9 目标函数值的收敛过程

Fig.9 Convergence process of objective function value

不同惩罚参数下的算法收敛性能如附录B表B4所示。可以看出:不同惩罚参数下,加速ADMM的收敛迭代次数和计算时间均小于传统ADMM;同时,所提加速ADMM可有效降低算法收敛性能对惩罚参数的敏感性。当惩罚参数 $\rho$ 取值在 $[4, 32]$ 之间时,加速ADMM的收敛迭代次数和计算时间变化不大;当 $\rho=64$ 时,加速ADMM迭代77次可自动收敛,而传统ADMM达到最大迭代次数时才停止收敛。由此可知,所提加速ADMM可有效解决由惩罚参数选取不当导致算法收敛困难的问题。

## 4 结论

针对高比例分布式PV接入配电网带来的电压越限问题,本文提出一种含分布式PV的主动配电网电压分布式优化控制策略,通过IEEE 33节点测试系统对所提方法进行分析、验证,得到相关结论如下:

1)所提含分布式PV的配电网电压分布式优化控制策略可有效消除电压越限现象,减小网损,有利于主动配电网的安全、经济运行;

2)所提加速ADMM通过调整优化目标的权重

系数,可有效实现不同的电压分布式优化控制目标,提高主动配电网运行的主动性和灵活性;

3)与集中式控制方式相比,所提配电网电压分布式优化控制方法不仅可实现电压的全局最优控制,还可提高计算效率;

4)所提加速ADMM有效减少了迭代次数,降低了算法收敛性能对惩罚参数的敏感性,对求解未来含高比例分布式电源的主动配电网优化运行模型具有一定的参考价值。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 陈伟,艾欣,吴涛,等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):26-32,39.  
CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32, 39.
- [2] TURITSYN K, SULC P, BACKHAUS S, et al. Options for control of reactive power by distributed photovoltaic generators[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(6): 1063-1073.
- [3] 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.
- [4] ZHAO J, LI Y, LI P, et al. Local voltage control strategy of active distribution network with PV reactive power optimization[C]//2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Chicago, IL, USA: IEEE, 2017: 1-5.
- [5] 魏昊焜,刘健,高慧. 分布式电源的本地电压控制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(9):40-45.  
WEI Haokun, LIU Jian, GAO Hui. Local voltage control of distributed generations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 40-45.
- [6] 蔡永翔,唐巍,张博,等. 含高比例用户光伏低压配电网集中-就地两阶段电压-无功控制[J]. 电网技术,2019,43(4):1271-1280.  
CAI Yongxiang, TANG Wei, ZHANG Bo, et al. A two-stage volt-var control in LV distribution networks with high proportion of residential PVs[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1271-1280.
- [7] 龚向阳,周开河,徐孝忠,等. 含分布式光伏的配电网电压分区协调控制方案[J]. 电力系统及其自动化学报,2018,30(5):127-133.  
GONG Xiangyang, ZHOU Kaihe, XU Xiaozhong, et al. Voltage partition coordinated control scheme for distribution network with distributed PV[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(5): 127-133.
- [8] 柴园园,郭力,王成山,等. 含高渗透率光伏的配电网分布式电压控制[J]. 电网技术,2018,42(3):738-746.  
CHAI Yuanyuan, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Distributed voltage control in distribution networks with high penetration of PV[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 738-746.
- [9] WANG Y, ZHAO T, JU C, et al. Two-level distributed voltage/var control using aggregated PV inverters in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(4): 1844-1855.
- [10] ŠULC P, BACKHAUS S, CHERTKOV M. Optimal distributed control of reactive power via the alternating direction method of multipliers[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4): 968-977.
- [11] 张进,胡存刚,芮涛. 基于交替方向乘子法的主动配电网日前两阶段分布式优化调度策略[J]. 中国电力,2021,54(5):91-100.  
ZHANG Jin, HU Cungang, RUI Tao. A day-ahead two-stage distributed optimal scheduling method for active distribution network based on ADMM[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 91-100.
- [12] 赵波,倪筹帷,李志浩,等. 基于自适应步长ADMM的电-气混联系统多时间尺度优化调度[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):294-299.  
ZHAO Bo, NI Chouwei, LI Zhihao, et al. Multi-time scale optimal scheduling of electricity-gas hybrid system based on adaptive step size ADMM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 294-299.
- [13] BARAN M, WU F F. Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 735-743.
- [14] DALL'ANESE E, DHOPLÉ S V, GIANNAKIS G B. Optimal dispatch of photovoltaic inverters in residential distribution systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2): 487-497.
- [15] FARIVAR M, LOW S H. Branch flow model: relaxations and convexification-part I[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2554-2564.
- [16] 乐健,周谦,赵联港,等. 基于一致性算法的电力系统分布式经济调度方法综述[J]. 电力自动化设备,2020,40(3):44-54.  
LE Jian, ZHOU Qian, ZHAO Liangang, et al. Overview of distributed economic dispatch methods for power system based on consensus algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 44-54.
- [17] YAN W, WEN L, LI W, et al. Decomposition-coordination interior point method and its application to multi-area optimal reactive power flow[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2011, 33(1): 55-60.
- [18] BOYD S, PARIKH N, CHU E, et al. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers[M]. Boston, USA: Now Publishers Inc., 2010.
- [19] 陈厚合,王子璇,张儒峰,等. 含虚拟电厂的风电并网系统分布式优化调度建模[J]. 中国电机工程学报,2019,39(9):2615-2625.  
CHEN Houhe, WANG Zixuan, ZHANG Rufeng, et al. Decentralized optimal dispatching modeling for wind power integrated power system with virtual power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2615-2625.

## 作者简介:



姜涛

姜涛(1983—),男,湖北随州人,教授,博士,主要研究方向为电力系统安全性与稳定性、可再生能源集成、综合能源系统(E-mail:electricpowersys@163.com);

张东辉(1992—),男,山东济宁人,硕士研究生,主要研究方向为配电网分布式优化控制(E-mail:donghuizhang@aliyun.com);

李雪(1986—),女,陕西西安人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统高性能计算(E-mail:xli@neepu.edu.cn)。

(编辑 李玮)

(下转第125页 continued on page 125)

## Optimal scheduling strategy of cascaded hydro-photovoltaic-pumped storage hybrid generation system based on electric energy sharing

XIA Yisha<sup>1</sup>, LIU Junyong<sup>1</sup>, LIU Jichun<sup>1</sup>, LI Yunman<sup>1</sup>, HAN Xiaoyan<sup>2</sup>, DING Lijie<sup>2</sup>, GAO Hongjun<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In order to carry out complementary economic optimization for multi-energy power generation system with pumped storage, cascaded hydropower and photovoltaic power stations in remote areas, a day-ahead coordinated optimal model of electric energy sharing among multiple township level power consumers is built, each power consumer in township consortium is managed and controlled harmoniously by the regional operators to realize economic and efficient formulation of power consumption plan. The pumped storage is used to further smooth the fluctuation of hydropower and photovoltaic power, the energy flow among township level power consumers, regional grid and main grid is optimized, and the benefit is allocated optimally according to the contribution function of township participating in sharing. Practical case analysis verifies the effectiveness of the proposed model and method.

**Key words:** cascaded hydro-photovoltaic-pumped storage hybrid generation system; township level power consumer; day-ahead scheduling; electric energy sharing; hydro-photovoltaic complementation

(上接第109页 continued from page 109)

## Distributed optimal control of voltage in active distribution network with distributed photovoltaic

JIANG Tao, ZHANG Donghui, LI Xue, ZHANG Rufeng, LI Guoqing

(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology,

Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

**Abstract:** As for the problem of voltage over-limit due to the high penetration of PV (PhotoVoltaic) integrated into distribution network, a distributed optimal control strategy of voltage in active distribution network with distributed PV is proposed. Based on the branch flow model of distribution network and PV inverter control model, an optimal control model of voltage in active distribution network is formulated, which takes the minimum of the voltage deviation of each bus, PV curtailment and network loss as the objective. Then, SOC (Second-Order Cone) relaxation technique is employed to convert the developed model from nonconvex to convex model. In view of the disadvantages of high computation complexity and poor information privacy for the centralized optimal control, the distribution network partition is achieved based on the decomposition and coordination principle, and then the multi-region distributed cooperative optimization control framework of voltage based on ADMM (Alternating Direction Method of Multipliers) is constructed. Furthermore, to improve the convergence of the algorithm, an accelerated ADMM is proposed based on the residual balance principle and relaxation technique. Finally, the case analysis is conducted on the IEEE 33-bus test system, and the results show that the proposed method can effectively solve the problem of voltage over-limit, and reduce the network loss.

**Key words:** active distribution network; distributed photovoltaic; voltage optimization; second-order cone relaxation; distributed optimization; accelerated alternating direction method of multipliers

### 附录 A

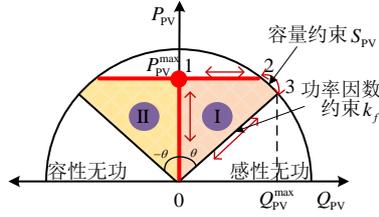


图 A1 PV 逆变器工作区域  
Fig.A1 Operating region of PV inverter

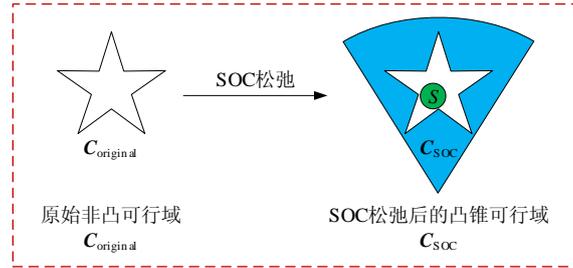


图 A2 SOC 松弛示意图  
Fig.A2 Schematic diagram of SOC relaxation

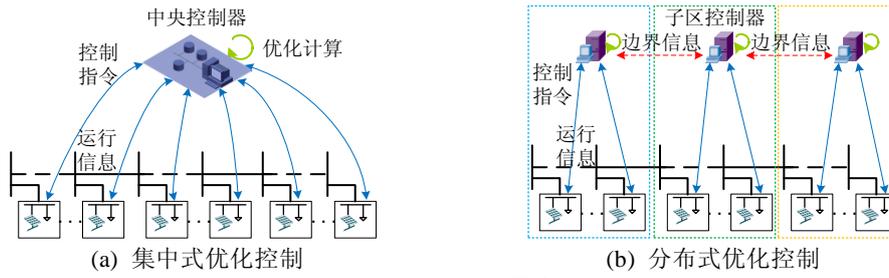


图 A3 优化控制示意图  
Fig.A3 Schematic diagram of optimal control

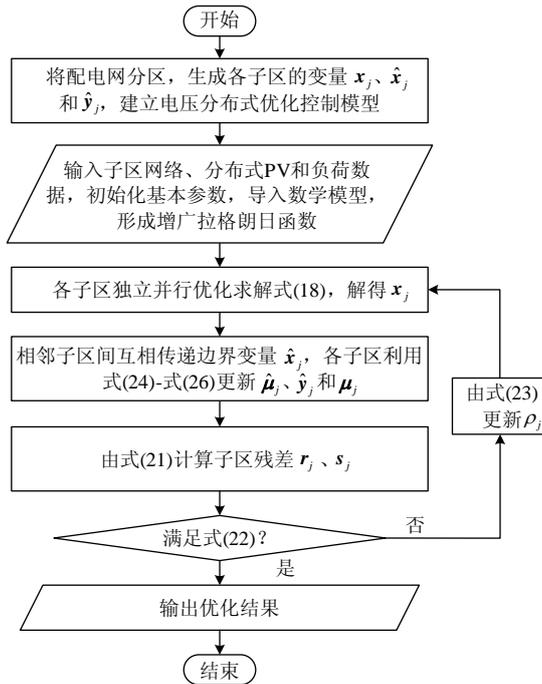


图 A4 加速 ADMM 求解电压分布式优化模型流程图  
Fig.A4 Flowchart of proposed voltage control strategy

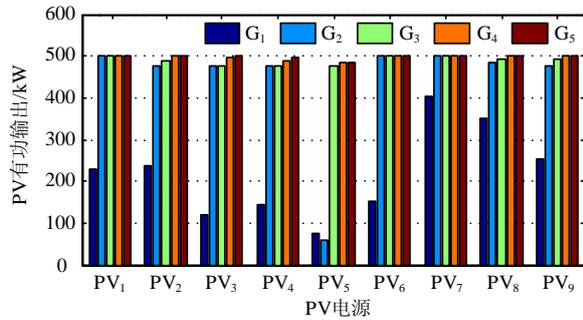
## 附录 B

表 B1 场景 1 的 PV 输出功率及其变化量  
Table B1 PV output and its regulation in Scenario 1

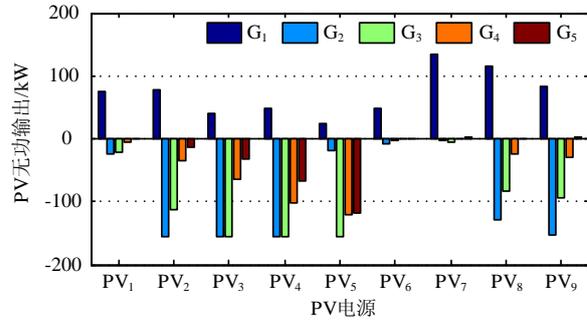
PV	额定容量/ (kV · A)	有功输出/kW		无功输出/kvar		有功变化量/ kW	无功变化量/ kvar
		控制前	控制后	控制前	控制后		
PV <sub>1</sub>	600	500	500	0	77	0	77
PV <sub>2</sub>	600	500	500	0	-164	0	-164
PV <sub>3</sub>	600	500	500	0	-164	0	-164
PV <sub>4</sub>	600	500	500	0	-164	0	-164
PV <sub>5</sub>	800	750	686	0	-225	-64	-225
PV <sub>6</sub>	600	500	500	0	164	0	164
PV <sub>7</sub>	800	750	750	0	247	0	247
PV <sub>8</sub>	600	500	500	0	-164	0	-164
PV <sub>9</sub>	800	750	750	0	-247	0	-247

表 B2 场景 2 的 PV 输出功率及其变化量  
Table B2 PV output and its regulation in Scenario 2

PV	额定容量/ (kV · A)	有功输出/kW		无功输出/kvar		有功变化量/ kW	无功变化量/ kvar
		控制前	控制后	控制前	控制后		
PV <sub>1</sub>	600	200	200	0	66	0	66
PV <sub>2</sub>	600	200	200	0	66	0	66
PV <sub>3</sub>	600	200	200	0	66	0	66
PV <sub>4</sub>	600	200	200	0	66	0	66
PV <sub>5</sub>	800	400	400	0	131	0	131
PV <sub>6</sub>	600	200	200	0	66	0	66
PV <sub>7</sub>	800	400	400	0	131	0	131
PV <sub>8</sub>	600	200	200	0	66	0	66
PV <sub>9</sub>	800	400	400	0	131	0	131



(a) PV 电源有功输出



(b) PV 电源无功输出

图 B1 不同权重系数下 PV 功率输出

Fig.B1 PV output with different weight coefficients

表 B3 分布式优化计算的 SOC 松弛间隙最大值  
Table B3 Maximum relaxation deviation of SOC for distributed optimization

优化设置	$\delta_{i,soc}/p.u.$	$\delta_{l,soc}/p.u.$
场景 1	$9.63 \times 10^{-10}$	$6.62 \times 10^{-7}$
场景 2	$1.38 \times 10^{-10}$	$6.31 \times 10^{-6}$
组合 G <sub>1</sub>	$6.90 \times 10^{-9}$	$1.13 \times 10^{-6}$
组合 G <sub>2</sub>	$2.27 \times 10^{-8}$	$3.01 \times 10^{-6}$
组合 G <sub>3</sub>	$3.64 \times 10^{-8}$	$3.82 \times 10^{-6}$
组合 G <sub>4</sub>	$8.42 \times 10^{-8}$	$4.51 \times 10^{-6}$
组合 G <sub>5</sub>	$2.22 \times 10^{-16}$	$1.38 \times 10^{-6}$

表 B4 不同惩罚参数下的算法收敛性能

Table B4 Convergence of proposed method with different penalties

惩罚参数 $\rho$ 初值	传统 ADMM		加速 ADMM	
	迭代次数	计算时间/s	迭代次数	计算时间/s
4	47	1.84	38	1.66
8	57	2.10	38	1.66
16	107	3.77	42	1.73
32	207	5.28	44	1.79
64	300	7.86	77	2.56