

考虑配电网主动重构的分布式光伏消纳能力概率化评估方法

罗 涛, 赵高帅, 闫大威, 张 章

(国网天津市电力公司经济技术研究院, 天津 300160)

摘要: 为评估配电网的分布式光伏消纳能力并对其进行有效提升, 提出了考虑配电网主动重构的分布式光伏消纳能力概率化评估方法。首先, 定义了配电网分布式光伏消纳能力, 并构建了以配电网分布式光伏消纳能力最大为目标的优化问题, 通过对网络拓扑进行动态优化重构实现分布式光伏消纳能力指标的最大化。其次, 为了研究分布式光伏输出的随机特性对配电网光伏消纳能力的影响, 以配电网节点电压偏差为机会约束条件, 采用机会约束法对配电网最大分布式光伏消纳能力值进行计算。再次, 提出了结合遗传算法和线性规划的混合计算方法对优化问题进行高效求解。最后, 以 IEEE 33 节点配电系统为例进行仿真验证。算例结果表明, 配电网应用所提方法进行主动重构, 可以有效提升分布式光伏消纳能力。

关键词: 配电网; 主动重构; 分布式光伏; 消纳能力; 概率化评估方法

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 1003-8930(2025)01-0064-10

DOI: 10.19635/j.cnki.csu-epsa.001409

Probabilistic Assessment Method for Distributed PV Hosting Capability of Distribution Network Considering Active Feeder Reconfiguration

LUO Tao, ZHAO Gaoshuai, YAN Dawei, ZHANG Zhang

(Economic and Technological Research Institute, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300160, China)

Abstract: To assess and further effectively enhance the distributed photovoltaic (PV) hosting capability of distribution network, a probabilistic assessment method for the distributed PV hosting capability of distribution network considering active feeder reconfiguration is proposed in this paper. First, the distributed PV hosting capability of distribution network is defined, and an optimization problem is formulated with the maximization of distributed PV hosting capability of distribution network as the objective, which is achieved through dynamic optimization and reconfiguration of the network topology. Second, to account for the stochastic nature of distributed PV output and its impact on the distributed PV hosting capability of distribution network, the maximum value of distributed PV hosting capability of distribution network is computed using the chance constraint method with the voltage deviation at distribution network nodes as a chance constraint. Third, a hybrid computational approach that combines genetic algorithms and linear programming is proposed to efficiently solve the optimization problem. Finally, the proposed method is validated through simulations using an IEEE 33-node distribution system as an example, and results demonstrate that the proposed approach can effectively enhance the distributed PV hosting capability of distribution network through active feeder reconfiguration.

Keywords: distribution network; active feeder reconfiguration; distributed photovoltaic (PV); hosting capability; probabilistic assessment method

实现碳达峰进而实现碳中和的“双碳”目标不断临近^[1], 太阳能作为清洁且可再生能源的代表, 其大力发展是实现“双碳”目标的重要抓手。太阳能具有的清洁、可再生且无污染的特点, 成为当今世界追求可持续发展和减少温室气体排放的重要能源之一。太阳能利用较成熟较广泛的是光伏发电技术, 具备显著的环保和经济效益, 是典型的绿色电力^[2]。

随着我国新型电力系统建设的深化, 以分布式光伏发电为代表的分布式新能源就地开发利用快速发展。由于分布式光伏输出的随机性和波动性, 其大规模接入配电网引发了一系列问题, 包括配电网稳定性降低、电能质量降低、网络规划困难等^[3]。优化加强配电网网架结构、合理配置布点容量、不断丰富配电网调节手段和智能化升级成为新型配

收稿日期: 2023-11-30; 修回日期: 2023-12-29; 网络出版时间: 2024-01-12 21:59:14。

基金项目: 国网天津市电力公司科技项目: 整区光伏背景下配电网电力电量平衡分析及网架优化技术研究(经研-研发 2023-09)。

电系统建设的重点,而准确可信评估配电网的分布式光伏消纳能力,是重要前提之一^[4]。

在配电网的分布式光伏消纳能力方面,已有大量工作进行了深入探讨。文献[4]提出了一种配电网光伏接纳能力评估方法可以有效量化因光伏配置方式的不确定性导致的配电网过电压风险;文献[5]综合考虑了分布式光伏电源接入对配电网电能质量、短路容量及网损的影响,构建了分布式光伏接入量最大、配电网网损最小的多目标优化模型,同时考虑了配电网节点电压偏差和波动;文献[6]提出了一种基于电压偏差机会约束的分布式光伏发电并网准入容量规划方法,有效考虑了分布式光伏出力随机性对配电网分布式光伏消纳能力的影响;文献[7]从配电网安全运行的角度出发,基于年时序仿真评估得到配电网节点的光伏最大准入容量,并对最佳容量的影响因素进行了敏感性分析;文献[8]通过深入研究分布式光伏电源接入电网对有源配电网电压偏差和系统网损的影响,以实现分布式光伏电源接入功率的最大化和系统网损的最小化为目标。在此基础上,以配电网节点电压约束作为约束条件,构建了有源配电网分布式光伏消纳能力评估模型,用于全面评估有源配电网对光伏发电的消纳潜力。文献[9]分析了不同天气类型下光伏出力特性,提出了基于光伏出力波动特性的广义天气类型聚类划分方法和基于净空理论的光伏出力时间序列模型构建方法。前述研究对配电网的分布式光伏消纳能力进行了全面深入的探讨,但未充分考虑到配电网通过主动重构可能对分布式光伏的消纳能力产生提升效果。

配电网网络重构是通过调整分段与联络开关的组合状态可以解决网损严重、解决过载、负荷不平衡、电压质量低等配网问题的手段^[10]。随着配网系统和配电管理手段的不断完善,主动配电网逐步成为新型大规模分布式电源接入配电网的形式^[11]。一方面,主动配电网具备整合分布式光伏、风能、储能以及可控负荷等多种分布式能源资源的能力^[12];另一方面,主动配电网可以进行主动的网络重构,优化电气网络潮流分布并改善系统节点电压分布,进而有效提升配电网的分布式光伏消纳能力^[12]。文献[12]以提升配电网的最大供电能力为目标,提出了配电网的网络动态重构方法,结果表明通过网络主动重构可有效提升配电网的供电能力;文献[13]提出了一种配电网网络重构方法,目标函数是以提高分布式电源的接纳能力,结果表明通过配

电网重构提高配电网对分布式电源接纳能力;文献[14]提出了一种基于配电网主动重构和无功电压调节的光伏接纳能力提升量化评估模型,结果表明配电网通过进行网络重构与无功电压优化调节,能够有效增强对光伏的接纳能力;文献[15]则提出了以弃风弃光最小为目标的主动配电网柔性开关和网络重构的协调优化方法,有效提升配电网对分布式新能源的消纳能力。上述研究对配电网主动重构来提升分布式光伏的消纳能力进行了深入研究,但未考虑光伏出力的随机性。分布式光伏具有随机出力的特性,会对所接入配电网支路的节点电压大小与有功潮流分布产生影响,因此在评估配电网对分布式光伏的接纳能力时,需充分考虑这一随机性。此外,考虑配电网主动重构的分布式光伏消纳能力评估问题,其本质是一个包含连续和离散变量的混合整数、非凸、非线性优化问题^[16],其中配电网的分段开关和联络开关的状态是离散的整数变量,接入配电网各个节点的分布式光伏最大准入容量是连续变量,同时配电网的交流潮流约束是非凸及非线性约束^[17]。因此,对上述包含连续-离散变量的混合整数、非凸、非线性优化问题进行高效求解也是亟待解决的问题之一。

本文为解决上述问题提出了考虑配电网主动重构的分布式光伏消纳能力概率化评估方法,并以配电网节点电压偏差为机会约束条件,采用机会约束法对配电网最大分布式光伏消纳能力值进行计算,从而充分考虑分布式光伏出力随机性对配电网分布式光伏消纳能力的影响。此外,为了对包含连续和离散变量的混合整数非凸、非线性这一配电网主动重构的分布式光伏消纳能力评估优化问题进行高效求解,本文提出了结合遗传算法和线性规划的混合计算方法。需要说明的是,本文主要从规划的视角出发,对配电网的分布式光伏消纳能力进行评估,从而为配电网的规划提供边界条件。

本文创新点凝练如下:①本文提出了考虑配电网主动重构的分布式光伏消纳能力概率化评估方法,通过配电网的主动重构来提升其分布式光伏的消纳能力;②考虑了分布式光伏输出的随机特性对配电网光伏消纳能力的影响,本文以配电网节点电压偏差为机会约束条件,采用机会约束法对配电网最大分布式光伏消纳能力进行计算;③本文提出了结合遗传算法和线性规划的混合计算方法,对考虑配电网主动重构的分布式光伏消纳能力计算这一包含连续-离散变量的混合整数、非凸、非线性优化

问题进行高效求解。

1 配电网分布式光伏消纳能力指标

分布式光伏的接纳能力指的是在满足支路功率和节点电压约束的前提下,配电网所能容纳的最大分布式光伏容量。这一能力主要受到配电网拓扑结构、线路参数、负荷水平以及上级变电站容量等因素的综合影响。

本文定义配电网的分布式光伏接纳能力指标(PV hosting capability index, PVHCI)的数学模型为

$$\delta_{\text{PVHCI}} = \max \sum_{n=1}^{N_{\text{PV}}} P_{\text{PV},n}^{\text{max}} \quad (1)$$

式中: δ_{PVHCI} 为配电网的分布式光伏接纳能力指标; $P_{\text{PV},n}^{\text{max}}$ 为接入配电网节点 n 处的分布式光伏最大准入容量; N_{PV} 为配电网中有分布式光伏接入的节点总数。

配电网网络重构可根据系统运行状况实时调整网络拓扑结构,从而优化电气网络潮流分布并改善系统节点电压分布,进而有效提升配电网的分布式光伏消纳能力。对于中低压配电网,其节点电压约束是限制分布式光伏消纳能力的最重要因素。特别是当大规模的分布式光伏系统接入配电网后,产生的功率倒送会抬升节点电压^[18],在上一级变压器容量越限前,配电网的节点电压往往已经越限。因此,关于分布式光伏消纳能力计算的已有研究大多将节点电压约束作为分布式光伏消纳能力评估的首要约束条件^[6,8,14]。由于配电网节点电压约束是限制分布式电源接入容量的最重要因素,本文将网络重构引入配电网分布式光伏消纳能力提升中,并介绍考虑主动重构的配电网分布式光伏消纳能力评估方法。

2 考虑主动重构的配电网分布式光伏消纳能力概率化评估方法

本节以第1节中所构建的配电网 δ_{PVHCI} 最大为目标,通过对配电网进行主动重构,实现 δ_{PVHCI} 的提升。同时,为了充分考虑分布式出力的随机性,进一步以配电网节点电压偏差为机会约束条件,采用机会约束法对配电网最大 δ_{PVHCI} 进行计算。

2.1 目标函数

目标函数表示为

$$\max f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \max \delta_{\text{PVHCI}} \quad (2)$$

$$\mathbf{x} = [\mathbf{V}; \mathbf{S}] = [|V_1|, |V_2|, \dots, |V_{N_{\text{e-bus}}}|; |S_1|, |S_2|, \dots, |S_{N_{\text{br}}}|] \quad (3)$$

$$\mathbf{u} = [\mathbf{SW}] = [\mathbf{SW}_1, \mathbf{SW}_2, \dots, \mathbf{SW}_{N_{\text{br}}}] \quad (4)$$

式中: \mathbf{x} 和 \mathbf{u} 分别为状态与控制变量; \mathbf{V} 和 \mathbf{S} 为配电网节点电压向量及视在功率向量; $|V_1|$ 为配电网第1个节点的电压幅值; $|V_{N_{\text{e-bus}}}|$ 为配电网第 $N_{\text{e-bus}}$ 个节点的电压幅值; $N_{\text{e-bus}}$ 为配电网的电气节点数; $|S_1|$ 为配电网第1条支路的功率幅值; $|S_{N_{\text{br}}}|$ 为配电网第 N_{br} 条支路的功率幅值; N_{br} 为配电网中可进行开关操作的分段与联络开关的总数量,也即配电网的支路总数; \mathbf{SW}_r 为配电网开关 r ($r = 1, 2, \dots, N_{\text{br}}$) 的开关状态,联络与分段开关的状态分别用“0”“1”来表示,“0”代表打开状态,“1”代表闭合状态^[12]。

2.2 约束条件

以图1所示的接入分布式光伏单元的配电网为例,其分布式光伏接纳能力指标即式(2)的约束条件表示为

$$P_{n+1} + P_{\text{PV},n+1} = P_n + P_{\text{PV},n} - r_f \frac{P_n^2 + Q_n^2}{V_n^2} - p_{n+1} \quad (5)$$

$$Q_{n+1} = Q_n - x_f \frac{P_n^2 + Q_n^2}{V_n^2} - q_{n+1} \quad (6)$$

$$V_{n+1}^2 = V_n^2 - 2(r_f P_n + x_f Q_n) + (r_f^2 + x_f^2) \frac{P_n^2 + Q_n^2}{V_n^2} \quad (7)$$

$$1 - \varepsilon \leq V_n \leq 1 + \varepsilon \quad (8)$$

$$0 \leq i_{ij}^f \leq i_{ij,\text{max}}^f \quad (9)$$

$$N_{\text{loop}} = N_{\text{br}} - N_{\text{e-bus}} + 1 \quad (10)$$

$$\sum_{r=1}^{N_{\text{br}}} |\mathbf{SW}_r - \mathbf{SW}_{r,0}| \leq \mathbf{SW}^{\text{max}} \quad (11)$$

式中: P_n 、 Q_n 为节点 n 的注入有功和无功功率; P_{n+1} 、 Q_{n+1} 为节点 $n+1$ 的有功和无功功率; $P_{\text{PV},n}$ 为接入节点 n 的分布式光伏实际输出有功功率; $P_{\text{PV},n+1}$ 为接入节点 $n+1$ 的分布式光伏实际输出有功功率; p_{n+1} 、 q_{n+1} 为节点 $n+1$ 的负荷消耗的有功和无功功率; V_n^2 、 V_{n+1}^2 分别为点 n 和 $n+1$ 的电压; r_f 、 x_f 为节点间的电阻和电抗; ε 为配电网节点 n 的电压允许偏差,本文设定为0.1^[12]; i_{ij}^f 和 $i_{ij,\text{max}}^f$ 分别为配电网支路 ij 的电流及其允许的最大值; N_{loop} 为配电网的环网个数; $\mathbf{SW}_{r,0}$ 表示开关 r 重构后的状态; \mathbf{SW}^{max} 为配电网开关操作次数的上限值。其中,式(5)和式(6)为潮流方程约束,式(7)和式(8)为节点电压约束,式(9)为支路的容量约束,式(10)为配电网辐射状运行约束。此外,配电网动态重构会导致开关频繁的动作,从而影响开关的寿命,因此增加了开

关动作次数约束,即式(11)。

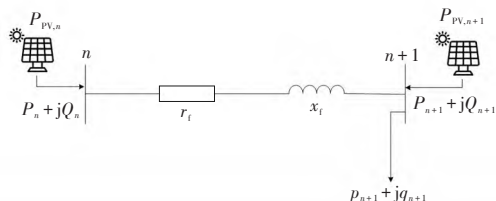


图 1 接入分布式光伏单元的配电网示意

Fig.1 Schematic of distribution network connected with distributed PV units

根据上述 δ_{PVHCL} 的定义可以看到,配电网分布式光伏接纳能力受到配电网各条支路潮流的平衡约束(式(5))和节点电压约束(式(8))。通过式(5)和式(8)可以看到,每条支路的有功潮流平衡及每个节点的电压约束均跟该条支路电气节点接入分布式光伏出力相关。光伏出力具有随机性,从而使接入分布式光伏的配电网支路有功潮流平衡和节点电压约束能否满足亦具有随机性。因此,在评估配电网分布式光伏接纳能力的时候需要考虑分布式光伏的随机性。本文假设光伏出力满足 Beta 分布^[19],其概率密度函数为

$$f\left(\frac{P_{PV}}{P_{PV}^{\max}}\right) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{P_{PV}}{P_{PV}^{\max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P_{PV}}{P_{PV}^{\max}}\right)^{\beta-1} \quad (12)$$

式中: P_{PV} 为光伏设备的实际输出功率,即式(5)中接入配电网节点的实际输出有功功率; P_{PV}^{\max} 为光伏设备的装机容量,即式(1)中接入配电网节点的光伏最大准入容量; $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数; α 与 β 为 Beta 分布的尺度参数。

机会约束法是处理随机优化问题的一种有效方法,其主要理念是在一定程度上允许优化结果不严格符合优化问题的约束条件,然而,所得出的优化结果必须在所设定的置信度 γ ($0 \leq \gamma \leq 1$) 下满足约束条件^[6,19]。置信度 γ 越大,代表着对应优化结果满足约束条件的几率越大。根据 γ 是否为最大值 1,优化问题的约束条件可以分为软约束与硬约束 2 类。其中,软约束是指在优化结果中此约束被满足的概率大于等于 γ 的约束条件类型;硬约束是指在优化过程中需要被严格满足的约束条件类型。

配电网的节点电压受接入的分布式光伏输出特性的概率分布影响。若采用严格的硬约束条件,就是要求系统在所有情况下都满足电压要求,这将对分布式光伏的接入能力加以限制^[6]。因此,本文考虑软约束为配电网节点电压约束,即式(8)。

将式(8)利用机会约束法改写为软约束类型,有

$$\text{Pro}\{1 - \varepsilon \leq V_n \leq 1 + \varepsilon\} \geq \gamma \quad (13)$$

式中,Pro 为约束(即配电网节点电压约束)成立的概率。

为了评估软约束的满足概率,本文采用蒙特卡洛抽样模拟技术对分布式光伏的输出进行抽样^[20],抽样次数设定为 10 万次。通过分布式光伏出力的概率模型,利用大量的抽样数据,获得了一系列包含不同预测误差大小的分布式光伏出力数据^[21]。抽样的具体过程如下:

步骤 1 基于式(12)对分布式光伏出力进行抽样,并计算光伏设备的实际输出功率;

步骤 2 当抽样次数达到 10 万次时,进行配电网的潮流计算,并利用式(13)计算软约束的满足概率^[21];否则,重复执行步骤 1。

2.3 求解算法

本文考虑配电网主动重构对分布式光伏消纳能力的提升作用,需要对配电网各个支路的开关状态进行优化,因此本文的优化模型是一个连续-离散混合整数非线性优化问题。为了对该优化问题进行高效求解,采用结合遗传算法和线性规划(可通过调用 CPLEX 商业求解器高效求解)的混合计算方法,算法流程如图 2 所示。待求模型包含连续变量(也即配电网各个节点接入的分布式光伏最大容量 $P_{PV,n}^{\max}$)和离散变量(也即配电网各个开关的状态 SW_r),在离散控制变量部分保持固定的情况下,调用 CPLEX 商业求解器进行连续变量部分求解;在保持连续控制变量部分不变的情况下,采用遗传算法对离散部分进行求解。具体步骤如下。

步骤 1 系统初始化。对配电网拓扑结构进行初始化,输入原始数据。

步骤 2 将连续和离散的控制变量分离,生成初始种群。令迭代次数 $\text{iter} = 1$ 。

步骤 3 调用 CPLEX 商业求解器对连续型优化问题进行求解,得到当前配电网拓扑结构下的配电网各个节点接入的分布式光伏最大容量 $P_{PV,n}^{\max}$ 。

步骤 4 计算个体的适应度。如果满足收敛条件,则执行步骤 6;否则,令 $\text{iter} = \text{iter} + 1$,执行步骤 5。

步骤 5 在求解含离散变量优化问题时,利用遗传操作产生子代,随后基于分布式光伏出力的概率密度函数利用蒙特卡洛抽样模拟技术进行抽样。根据所得抽样结果,对所有新产生个体对应的配电网拓扑进行潮流计算,并根据式(12)计算软约

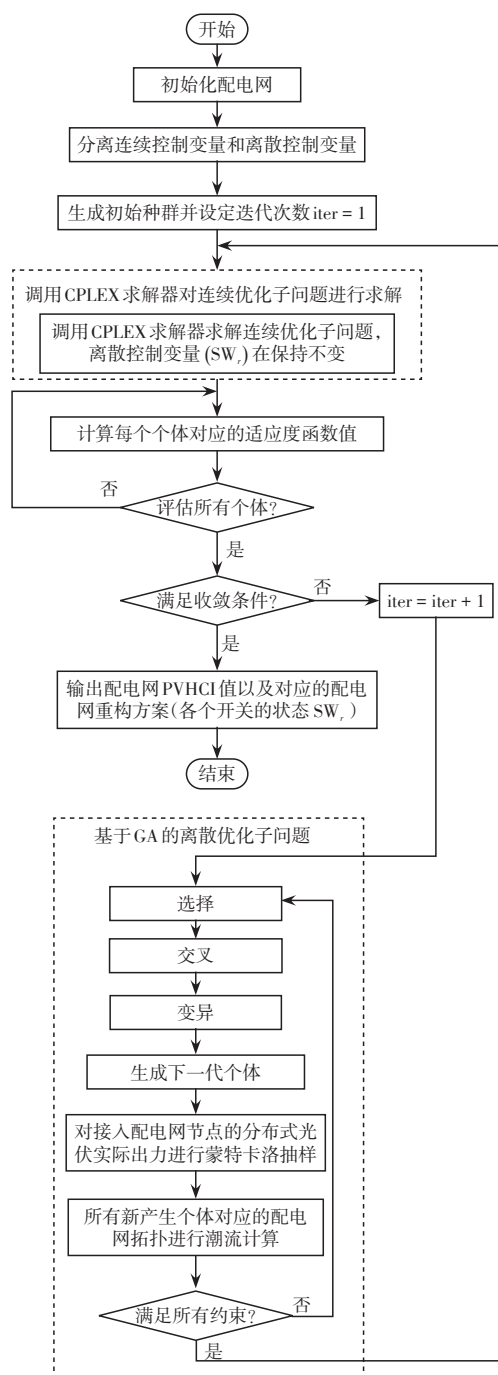


图2 优化问题求解流程

Fig.2 Flow chart of solving the optimization problem

束的满足概率(也即满足置信度要求)。若满足,则执行步骤3;否则,重复执行步骤5。

步骤6 获得满足约束条件的 δ_{PVHCl} 值,并对各控制变量进行输出。

该算法的收敛条件为:优化迭代次数达到设定的最大迭代次数(本文设定为150次),或者在连续10次迭代中最优个体保持不变^[16]。

本文基于 MATLAB-YALMIP 联合仿真平台,通过调用 CPLEX 商业求解器对连续优化子问题^[22]进

行求解。联合仿真计算平台如图3所示。优化问题数学建模在 MATLAB-YALMIP 平台实现,CPLEX 求解器通过与连续优化子问题数学模型的接口进行模块之间的数据通信,从而完成优化求解。本文的连续优化子问题中误差精度设置为 CPLEX 求解器的默认值 0.01%^[23-24]。

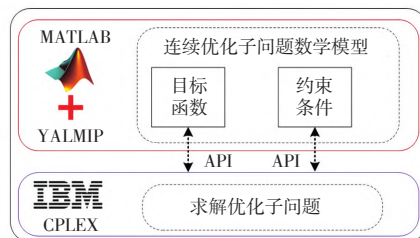


图3 连续优化子问题计算平台

Fig.3 Calculation platform of continuous optimization sub-problem

3 算例分析

3.1 算例设置

本文采用 IEEE 33 节点系统进行算例验证,算例具体参数见文献[12],其中节点电压满足 $0.90 \text{ p.u.} \leq V_n \leq 1.10 \text{ p.u.}$ 。设定配电网的光伏接入点分别为电气节点 10、14、16、18、19、22、24、27、31、32,测试配电网算例示意图如图4所示。本文设配电网开关动作次数的上限值 SW^{\max} 为 10。

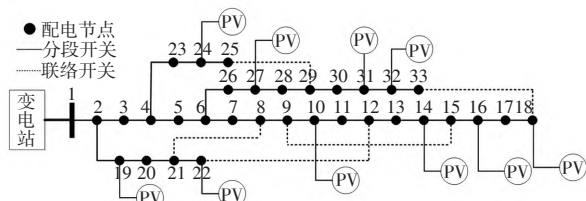


图4 测试配电网算例示意

Fig.4 Schematic of example of distribution network under test

3.2 仿真结果分析

3.2.1 不考虑配电网主动重构的分布式光伏消纳能力

多种置信度下不考虑配电网主动重构的 δ_{PVHCl} 如图5所示。从图中可以看到,随着置信度的降低,配电网的 δ_{PVHCl} 也逐渐增加。这是因为随着置信度水平的降低,配电网节点电压约束(即 $0.90 \text{ p.u.} \leq V_n \leq 1.10 \text{ p.u.}$)成立的概率也降低,意味着配电网节点电压违反约束的机会增加。由于配电网节点电压约束是限制分布式电源接入容量的最重要因素,因此随着置信度水平的降低,配电网节点电压违反约束的机会增加,使得配电网的 δ_{PVHCl} 也随着增大。

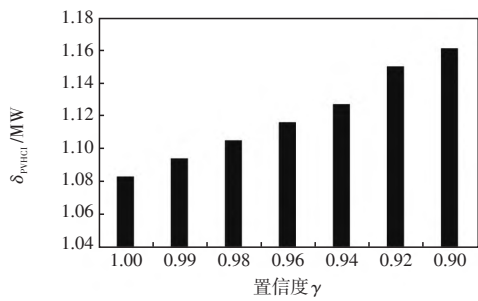


图 5 多种置信度下不考虑配电网主动重构的 δ_{PVHCl} 值
Fig.5 δ_{PVHCl} values without considering active feeder reconfiguration of distribution network at multiple confidential levels

不考虑配电网主动重构的 δ_{PVHCl} 如表 1 所示。从表 1 的具体数据可以看到,随着置信度从 1.00 下降到 0.90,配电网 δ_{PVHCl} 从 1.083 MW 逐渐增加到 1.161 MW。当置信度为 1.00 时,配电网节点电压约束 (即 $0.90 \text{ p.u.} \leq V_n \leq 1.10 \text{ p.u.}$) 成立的概率为 100%,也即完全满足节点电压约束。此时 δ_{PVHCl} 对应的节点最高电压值为节点电压约束的上限 1.1 p.u.,其对应的节点编号为当前配电网 (见图 5) 馈线的最末端节点 18。

当置信度为 0.90 时,配电网节点电压约束 (也即 $0.90 \text{ p.u.} \leq V_n \leq 1.10 \text{ p.u.}$) 成立的概率为 90%,即配电网节点电压有 10% 的概率会违反 $0.90 \text{ p.u.} \leq V_n \leq 1.10 \text{ p.u.}$ 的约束。此时 δ_{PVHCl} 对应的节点最高电压为 1.12 p.u.,超出了电压约束的上限 1.10 p.u.,其对应的节点编号同样为当前配电网 (见图 5) 馈线的最末端节点 18。通过表 1 的数据分析可以发现,配电网节点电压约束是限制分布式电源接入容量的最重要因素。

表 1 不考虑配电网主动重构的 δ_{PVHCl}

置信度 γ	δ_{PVHCl}/MW	节点最高电压 (p.u.)	对应节点编号
1.00	1.083	1.10	18
0.99	1.094	1.12	18
0.98	1.105	1.14	18
0.96	1.116	1.15	18
0.94	1.127	1.17	18
0.92	1.150	1.20	18
0.90	1.161	1.21	18

多种置信度下不考虑配电网主动重构的配电网节点电压分布如图 6 所示。从图中可以看到,随着置信度从 1.00 下降到 0.90,配电网节点电压的越限情况也更加明显。当置信度为 1.00 时,配电网节点电压约束完全满足,无节点电压越限情况的发生;而随着置信度的下降,配电网节点电压约束违反约束

的机会增加,节点电压越限更多。值得注意的是,图 6 中配电网节点电压是对分布式光伏出力的概率密度函数进行抽样后进行配电网潮流计算,并满足置信度要求的所有抽样结果的节点电压的平均值。

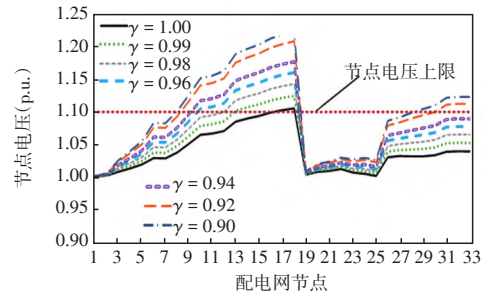


图 6 多种置信度下不考虑配电网主动重构的配电网节点电压

Fig.6 Voltage at nodes in distribution network without considering active feeder reconfiguration at multiple confidential levels

3.2.2 考虑配电网主动重构的分布式光伏消纳能力
多种置信度下考虑配电网主动重构的 δ_{PVHCl} 如图 7 和表 2 所示。多种置信度下考虑配电网主动重构的配电网节点电压分布如图 8 所示。与第 3.2.1 小节中不考虑配电网主动重构的结果类似,随着置信度的降低,配电网的 δ_{PVHCl} 值也逐渐增加,具体分析不再赘述。

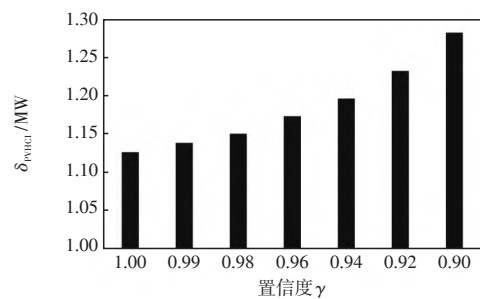


图 7 多种置信度下考虑配电网主动重构的 δ_{PVHCl}

Fig.7 δ_{PVHCl} considering active feeder reconfiguration of distribution network at multiple confidential levels

表 2 考虑配电网主动重构的 δ_{PVHCl} ($SW^{\max} = 10$)

Tab.2 δ_{PVHCl} considering active feeder reconfiguration of distribution network ($SW^{\max} = 10$)

置信度 γ	δ_{PVHCl}/MW	节点最高电压 (p.u.)	对应节点编号	开关动作次数
1.00	1.126	1.10	33	8
0.99	1.138	1.12	18	8
0.98	1.15	1.13	18	8
0.96	1.173	1.15	16	8
0.94	1.196	1.17	16	8
0.92	1.232	1.19	18	10
0.90	1.282	1.21	18	10

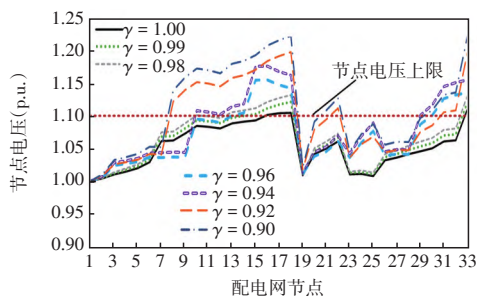


图 8 多种置信度下考虑配电网主动重构的配电网节点电压

Fig.8 Voltage at nodes in distribution network considering active feeder reconfiguration at multiple confidential levels

对比表 1 和表 2 可知,与第 3.2.1 节中不考虑配电网主动重构的结果不同之处有以下两点。

(1)在不同置信度情况下,考虑配电网主动重构的 δ_{PVHCl} 均高于不考虑配电网重构的值。这是因为配电网主动重构可优化电气网络潮流分布并改善系统节点电压分布。由于配电网节点电压约束是限制分布式电源接入容量的最重要因素,因此配电网网络重构提升了配电网的 δ_{PVHCl} 。

(2)节点最高电压对应的节点编号不再是节点 18,而是变为了节点 33(置信度为 1.00)、节点 18(置信度为 0.99、0.98、0.92 和 0.90)、节点 16(置信度为 0.96 和 0.94)。这是因为考虑配电网主动重构后,配电网的网络拓扑相较于原始拓扑(见图 5)发生了改变,且在不同置信度下,对应最优 δ_{PVHCl} 的配电网网络拓扑也不相同。

从图 8 中可以看到,当置信度为 1.00 时,配电网节点电压约束完全满足,无节点电压越限情况的发生;而随着置信度的下降,配电网节点电压约束违反约束的机会增加,节点电压越限也更多。

对比图 6 和图 8 可以看到,图 6 中不同置信度下的配电网节点电压分布趋势是一致的,而图 8 中不同置信度下的配电网节点电压分布趋势不尽相同。这是因为图 8 中不同置信度下对应最优 δ_{PVHCl} 的配电网网络拓扑不同,因此对应的节点电压分布趋势也不相同。不同置信度下对应最大 δ_{PVHCl} 值的配电网网络拓扑见图 9。

算例仿真的硬件环境为 Intel i7-8550U CPU 1.80GHz, 16GB RAM, 操作系统为 Win11 64 位, 开发环境为 MATLAB R2022a。遗传算法和线性规划的混合计算方法整个优化问题的求解时间为 43.38 s。

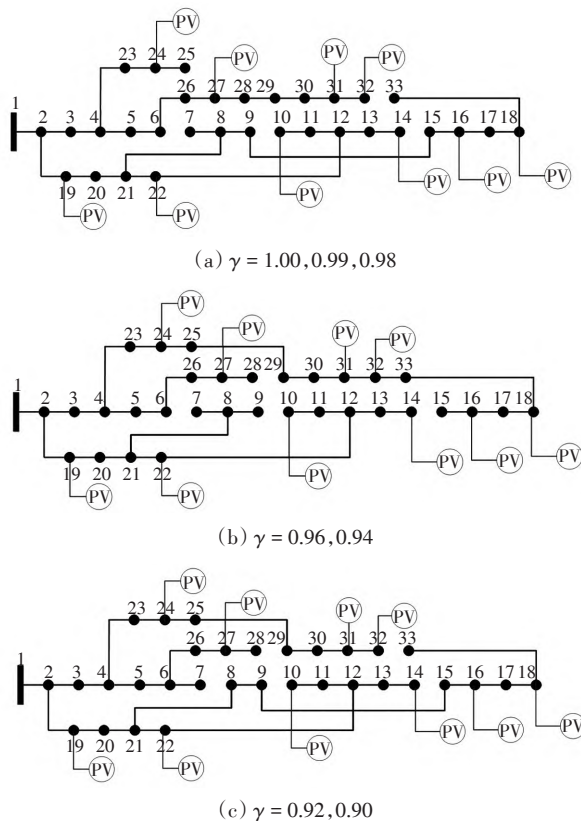


图 9 不同置信度下对应最大 δ_{PVHCl} 值的配电网网络拓扑 ($SW^{\max} = 10$)

Fig.9 Topologies of distribution network corresponding to maximum δ_{PVHCl} values at multiple confidential levels ($SW^{\max} = 10$)

3.2.3 对比分析

本节进一步对比分析了不考虑配电网主动重构和考虑配电网主动重构的 δ_{PVHCl} , 如图 10 所示。从图中可以看到,虽然不考虑配电网主动重构和考虑配电网主动重构 2 种场景下,配电网的 δ_{PVHCl} 均随着置信度的降低而增加,然而考虑配电网主动重构场景下配电网的 δ_{PVHCl} 随着置信度降低而增加的速率和幅度明显高于不考虑配电网主动重构场景。

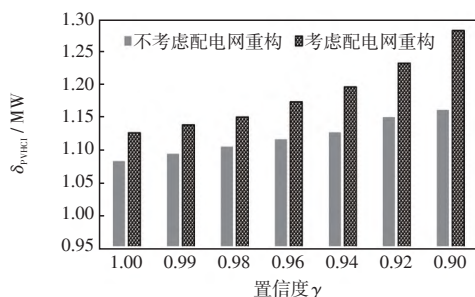


图 10 考虑和不考虑配电网主动重构的 δ_{PVHCl} 对比
Fig.10 Comparison of δ_{PVHCl} values with and without considering active feeder reconfiguration of distribution network

这进一步说明配电网进行主动重构可有效提升对分布式光伏的消纳能力。

为了进一步分析开关动作次数约束的影响,将配电网开关操作次数的上限 SW^{\max} 设定为 8 进行分析计算。当 $SW^{\max} = 8$ 时,多种置信度下考虑配电网主动重构的 δ_{PVHCl} 如表 3 所示。

表 3 考虑配电网主动重构的 δ_{PVHCl} 值 ($SW^{\max} = 8$)

Tab.3 δ_{PVHCl} values considering active feeder reconfiguration of distribution network ($SW^{\max} = 8$)

置信度 γ	δ_{PVHCl} / MW	节点最高电压 (p.u.)	对应节点编号	开关动作次数
1.00	1.126	1.10	33	8
0.99	1.138	1.12	18	8
0.98	1.15	1.13	18	8
0.96	1.173	1.15	16	8
0.94	1.196	1.17	16	8
0.92	1.199	1.19	32	8
0.90	1.220	1.21	32	8

对比表 2 和表 3 可以看到,当置信度 $\gamma = 1.00, 0.99, 0.98, 0.96, 0.94$ 时,不管 SW^{\max} 为 10 还是为 8,配电网的 δ_{PVHCl} 均保持不变。说明在 γ 不同时, δ_{PVHCl} 未受到配电网开关动作次数的约束。

对比表 2 和表 3 可以看到,当 $\gamma = 0.92, 0.90$ 时, $SW^{\max} = 10$ 与 $SW^{\max} = 8$ 的 δ_{PVHCl} 不同。原因是 $SW^{\max} = 10$ 时对应的配电网重构方案的开关动作次数达到了 10 次,说明该配电网重构方案下 δ_{PVHCl} 受到了配电网开关动作次数的约束,而该配电网重构方案不满足 $SW^{\max} = 8$ 的开关动作次数约束。因此,当 $SW^{\max} = 8$ 时配电网重构方案与 $SW^{\max} = 10$ 时不同(对比图 9(c)和图 11(c)也可以看到)。

$SW^{\max} = 8$ 时,不同置信度下对应最大 δ_{PVHCl} 值的配电网网络拓扑如图 11 所示。与上文分析结论一致,当置信度 $\gamma = 1.00, 0.99, 0.98, 0.96, 0.94$ 时,不管 SW^{\max} 是 10 还是 8,配电网的网络重构方案一致;而当 $\gamma = 0.92, 0.90$ 时, $SW^{\max} = 10$ 的配电网网络重构方案与 $SW^{\max} = 8$ 的配电网网络重构方案不同。具体原因不再赘述。

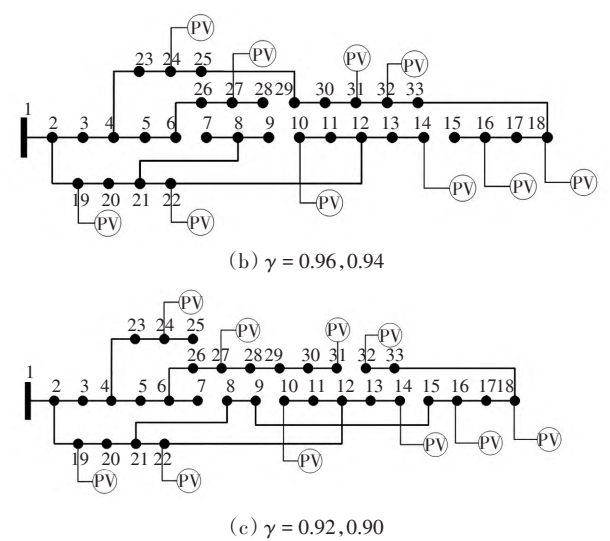
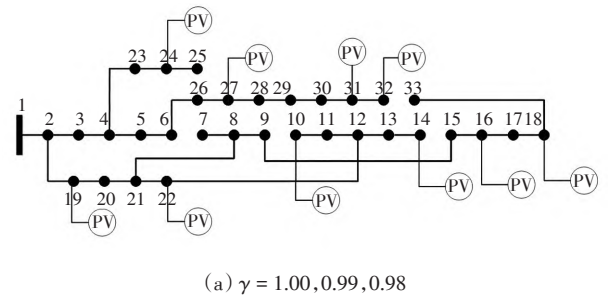


图 11 不同置信度下对应最大 δ_{PVHCl} 值的配电网网络拓扑 ($SW^{\max} = 8$)

Fig.11 Topologies of distribution network corresponding to maximum δ_{PVHCl} values at multiple confidential levels ($SW^{\max} = 8$)

4 结 论

本文通过机会约束法提出了考虑配电网主动重构的分布式光伏消纳能力概率化评估方法。所得结论如下。

(1)配电网节点电压约束是限制分布式电源接入容量的最重要因素。配电网主动重构可优化电气网络潮流分布并改善系统节点电压分布,从而有效提升配电网的分布式光伏消纳能力。

(2)分布式光伏出力的随机特性对配电网的分布式光伏消纳能力具有重要影响。以配电网节点电压偏差为机会约束条件对分布式光伏的随机特性对配电网的分布式光伏消纳能力进行分析发现随着置信度的降低,配电网的分布式光伏消纳能力值逐渐增加。同时,考虑配电网主动重构场景下配电网的分布式光伏消纳能力值随着置信度降低而增加的速率和幅度明显高于不考虑配电网主动重构场景,进一步说明了配电网进行主动重构可有效提升对分布式光伏的消纳能力。

未来研究工作将从以下 2 个方面开展:

(1)本文只考虑了单个配电网重构对分布式光伏消纳能力的提升,未来研究中进一步考虑多个互联配电网之间进行网络的主动重构,从而提升整区分布式光伏的消纳能力。

(2)本文主要从规划的视角出发,对配电网的分布式光伏消纳能力进行评估,未来研究将从运行

视角出发,对含高比例分布式光伏的配电网运行问题进行研究。

参考文献:

- [1] 王永真,潘崇超,韩恺,等(Wang Yongzhen, Pan Chongchao, Han Kai, et al). "双碳"目标下中国综合能源服务的态势辨析与理论架构(Situation identification and theory architecture of integrated energy services under dual carbon goal in China)[J]. 全球能源互联网(Journal of Global Energy Interconnection), 2023, 6(4): 379-389.
- [2] 张哲旸,巨星,潘信宇,等(Zhang Zheyang, Ju Xing, Pan Xinyu, et al). 太阳能光伏-光热复合发电技术及其商业化应用(Photovoltaic/concentrated solar power hybrid technology and its commercial application)[J]. 发电技术(Power Generation Technology), 2020, 41(3): 220-230.
- [3] 苏粟,李泽宁,靳小龙,等(Su Su, Li Zening, Jin Xiaolong, et al). 基于机会约束规划的含智能楼宇主动配电网分布式能量管理策略(Distributed energy management strategy for active distribution network incorporating intelligent buildings based on chance-constrained programming)[J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2023, 43(10): 3781-3793.
- [4] 董逸超,王守相,高丽娟,等(Dong Yichao, Wang Shouxiang, Gao Lijuan, et al). 考虑过电压风险的配电网光伏接纳能力评估方法(PV hosting capacity evaluation method in distribution network considering overvoltage risk)[J]. 分布式能源(Distributed Energy), 2019, 4(6): 35-40.
- [5] 梁海平,王翠,王正平,等(Liang Haiping, Wang Cui, Wang Zhengping, et al). 基于改进 FPA 算法的配电网光伏消纳能力评估(Evaluation of distributed photovoltaic integration capacity based on improved FPA algorithm)[J]. 可再生能源(Renewable Energy Resources), 2019, 37(2): 190-198.
- [6] 孙玲玲,赵美超,王宁,等(Sun Lingling, Zhao Meichao, Wang Ning, et al). 基于电压偏差机会约束的分布式光伏发电准入容量研究(Research of permitted capacity of distributed photovoltaic generation based on voltage deviation chance constrained)[J]. 电工技术学报(Transactions of China Electrotechnical Society), 2018, 33(7): 1560-1569.
- [7] 李振坤,管琰玲,张代红,等(Li Zhenkun, Guan Yanling, Zhang Daihong, et al). 基于年时序曲线的配电网节点光伏接纳能力评估及最佳容量研究(Photovoltaic hosting ability evaluation and optimum capacity research of distribution networks node based on annual time-series curve)[J]. 太阳能学报(Acta Energiae Solaris Sinica), 2021, 42(4): 200-208.
- [8] 仲泽天,李梦月,王加澍,等(Zhong Zetian, Li Mengyue, Wang Jiashu, et al). 一种有源配电网分布式光伏消纳能力评估方法(An assessment method for distributed photovoltaic absorption capacity of active distribution networks)[J]. 电网与清洁能源(Power System and Clean Energy), 2023, 39(2): 60-68.
- [9] 黄伟,高怡芳,张勇军,等(Huang Wei, Gao Yifang, Zhang Yongjun, et al). 计及不确定性的分布式光伏接入配电网极限容量评估(Evaluation of ultimate capacity for distributed photovoltaic access distribution network considering uncertainty)[J]. 电力系统保护与控制(Power System Protection and Control), 2018, 46(14): 9-16.
- [10] 魏恩伟,阳浩,薛荣,等(Wei Enwei, Yao Hao, Xue Rong, et al). 基于离散猴群算法的多目标配电网重构方法(Multi-objective distribution network reconfiguration method based on discrete monkey algorithm)[J]. 电力系统及其自动化学报(Proceedings of the CSU-EPSCA), 2023, 35(1): 30-35.
- [11] 曾博,刘念,张玉莹,等(Zeng Bo, Liu Nian, Zhang Yuying, et al). 促进间歇性分布式电源高效利用的主动配电网双层场景规划方法(Bi-level scenario programming of active distribution network for promoting intermittent distributed generation utilization)[J]. 电工技术学报(Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28(9): 155-163.
- [12] 靳小龙,穆云飞,贾宏杰,等(Jin Xiaolong, Mu Yunfei, Jia Hongjie, et al). 面向最大供电能力提升的配电网主动重构策略(An active reconfiguration strategy for distribution network based on maximum power supply capability)[J]. 电工技术学报(Transactions of China Electrotechnical Society), 2014, 29(12): 137-147.
- [13] 易海川,张彼德,王海颖,等(Yi Haichuan, Zhang Bide, Wang Haiying, et al). 提高 DG 接纳能力的配电网动态重构方法(Distribution network dynamic reconfiguration method for improving distribution network's ability of accepting DG)[J]. 电网技术(Power System Technology), 2016, 40(5): 1431-1436.
- [14] 崔荣喜,丁月明,贾伟,等(Cui Rongxi, Ding Yueming, Jia Wei, et al). 基于网络重构和无功电压调节的光伏接纳能力提升方法(PV hosting capacity improvement based on network reconfiguration and reactive voltage regulation)[J]. 供用电(Distribution & Utilization), 2023, 40(7): 18-23.
- [15] 丛鹏伟,唐巍,姜铨伟,等(Cong Pengwei, Tang Wei, Lou Chengwei, et al). 含高渗透率可再生能源的主动配电网两阶段柔性软开关与联络开关协调优化控制(Two-stage coordination optimization control of soft open point and tie switch in active distribution network with high pen-

- etration renewable energy generation)[J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2019, 34(6): 1263-1272.
- [16] 靳小龙 (Jin Xiaolong). 集成智能楼宇的电/气/热区域综合能源系统建模及运行优化研究 (Modelling and Optimal Operation of Smart Buildings-Integrated Electricity, Gas and Heating Systems at Community Level)[D]. 天津: 天津大学 (Tianjin: Tianjin University), 2018.
- [17] 彭月, 熊伟, 袁旭峰, 等 (Peng Yue, Xiong Wei, Yuan Xufeng, et al). 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网最优潮流研究 (Research on optimal power flow of active distribution network based on mixed integer second-order cone programming)[J]. 电测与仪表 (Electrical Measurement & Instrumentation), 2023, 60(5): 139-143.
- [18] 姚宏民, 杜欣慧, 李廷钧, 等 (Yao Hongmin, Du Xinhui, Li Tingjun, et al). 光伏高渗透率下配网消纳能力模拟及电压控制策略研究 (Simulation of consumption capacity and voltage control strategy of distribution network with high penetration of photovoltaics) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2019, 43(2): 462-469.
- [19] 李琳, 徐晶, 林威, 等 (Li Lin, Xu Jing, Lin Wei, et al). 考虑随机性的区域综合能源系统多目标日前优化调度方法 (Multi-objective day-ahead optimal scheduling method for integrated community energy system considering the stochastic behaviors)[J]. 电力建设 (Electric Power Construction), 2018, 39(12): 39-46.
- [20] 樊晓伟, 王瑞妙, 朱小军, 等 (Fan Xiaowei, Wang Ruimiao, Zhu Xiaojun, et al). 考虑风光荷时序波动特性的配电网投资策略多目标优化 (Multi-objective optimization of distribution network investment strategy considering the time series fluctuation of wind power generation, photovoltaic power generation and power load)[J]. 可再生能源 (Renewable Energy Resources), 2023, 41(2): 268-276.
- [21] 林威 (Lin Wei). 区域综合能源系统多目标优化运行调度方法 (Multi-Objective Optimal Scheduling Method for Integrated Community Energy Systems)[D]. 天津: 天津大学 (Tianjin: Tianjin University), 2018.
- [22] 王志贺, 刘元园, 唐沂媛, 等 (Wang Zhihe, Liu Yuanyuan, Tang Yiyuan, et al). 考虑二氧化碳排放的冷热电联供系统的容量配置 (Capacity configuration of CCHP system considering carbon dioxide emissions)[J]. 电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the CSU-EPSC), 2017, 29(8): 104-110.
- [23] Pan Kai, Guan Yongpei, Watson J P, et al. Strengthened MILP formulation for certain gas turbine unit commitment problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1440-1448.
- [24] Jabr R A, Dzafic I. Sensitivity-based discrete coordinate-descent for volt/var control in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 4670-4678.

作者简介:

罗 涛 (1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网规划及电力系统分析计算, luotao1003@163.com;

赵高帅 (1987—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网规划及电力系统分析, zgs_0420@126.com;

闫大威 (1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为城市电网规划及电力系统分析, 502707224@qq.com。

关于论文中的表

- (1) 表要精选, 应具有自明性。表的内容切忌与插图及文字表述重复。
- (2) 表应精心设计, 为使表的结构简洁, 采用三线表, 必要时可加辅助线。
- (3) 项目栏中各栏标注应齐全。若所有栏的单位相同, 该单位标注在表右上角, 不写“单位”二字。
- (4) 表中的术语、符号、单位等应与插图及文字表述所用的一致。
- (5) 表中内容相同的相邻栏或上下栏, 重复示出或通栏表示, 不用“同左”、“同上”等字样代替。

摘编于《中国高等学校自然科学学报编排规范》(修订版)