

DOI: 10.7667/PSPC170135

基于机会约束规划的主动配电网最大供电能力双层优化

周玮¹, 孙恺¹, 孙辉¹, 马千², 刘劲松², 王如伟³, 孔剑红³, 姜学朴³, 陈晓东³

(1. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110006;
3. 国网大连供电公司, 辽宁 大连 116001)

摘要: 与传统配电网不同, 接入主动配电网的可控分布式电源能够参与配电网的经济运行。可控分布式电源的出力分配由主动配电网的经济调度策略确定。为实现供电能力最大化, 可控分布式电源通常运行在额定状态, 这与经济运行的目标相背离。这一矛盾会对最大供电能力计算带来影响。提出一种基于机会约束规划的主动配电网最大供电能力双层优化模型。上层模型用于求解主动配电网的最大供电能力; 下层模型在负荷增长的过程中结合主动配电网对可控分布式电源有效管理的特点, 对可控分布式电源出力按经济调度原则进行分配。以改进 IEEE-33 配电系统为例对该模型进行验证, 结果表明该模型可获得符合主动配电网经济运行要求的最大供电能力。

关键词: 主动配电网; 最大供电能力; 经济调度; 双层优化; 机会约束规划

Bi-level optimization model for load supplying capability in active distribution network based on chance-constrained programming

ZHOU Wei¹, SUN Kai¹, SUN Hui¹, MA Qian², LIU Jinsong², WANG Ruwei³,
KONG Jianhong³, JIANG Xuepu³, CHEN Xiaodong³

(1. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. State Grid Liaoning Electric Power Company Ltd., Shenyang 110006, China; 3. State Grid Dalian Power Supply Company, Dalian 116001, China)

Abstract: Different from traditional distribution network, the controllable distributed generations assessed to Active Distribution Network (ADN) could participate in the economic operation of distribution network. The output allocation of controllable distributed generations is determined by the economic schedule strategy for ADN. In order to maximize Load Supplying Capability (LSC), controllable distributed generations usually work at rated state, which departs from the pursuit of economic operation. The contradiction has an impact on LSC. This paper highlights a bi-level optimization model for LSC of ADN based on chance-constrained programming. The upper-level model aims at calculating the LSC of ADN, and the lower-level model is to allocate the output of controllable distributed generations based on economic dispatch principle combining the characteristics of ADN effectively managing controllable distributed generations during the process of load growth. Finally, the modified IEEE 33-bus distribution system is taken as an example for verifying the proposed model. The results show that the LSC which meets the requirements of ADN economic operation is acquired.

This work is supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. DUT15QY50) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 2017YF-27).

Key words: active distribution network; load supplying capability; economic dispatch; bi-level optimization; chance-constrained programming

0 引言

主动配电网源于分布式能源应用和发展^[1]。与

传统有源配电网相比, 主动配电网具有对接入的分布式电源主动控制和主动管理的特性, 得到广泛关注和快速发展^[2-3]。主动配电网中分布式电源的出力受多种因素的影响: 对于柴油发电机和微型燃气轮机等可控分布式电源, 由于受到源网协调控制, 其有功出力由调度策略决定; 而对于风力发电、光伏

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (DUT15QY50); 国家电网公司科技项目 (2017YF-27)

发电等不可控分布式电源, 其有功出力受自然因素影响具有强烈的不确定性^[4-7]。最大供电能力是反映配电网运行安全性和可靠性的重要指标, 并由配电网运行方式所决定^[8-10]。然而, 影响分布式电源出力的因素势必会对最大供电能力的分析带来影响。结合主动配电网运行特点研究其最大供电能力, 将运行调度因素考虑进最大供电能力问题的研究中, 能够反映主动配电网运行要求, 具有重要的指导意义。

配电网最大供电能力的概念借鉴输电网可用输电能力的概念^[11]。针对输电网可用输电能力问题, 有学者对初始运行点的有功发电按照发电成本进行经济分配, 而未考虑其他运行点的经济分配^[12]; 在此基础上, 有学者考虑输电系统的安全性和经济性的矛盾, 协调了可用输电能力与最优调度的关系^[13]。针对有源配电网, 分布式电源接入配电网对最大供电能力的分析已取得丰硕成果。例如: 从风力发电、光伏发电等不可控分布式电源出力的预测角度出发, 采用不同的理论表述不可控分布式电源出力的不确定性, 并将其应用于配电网最大供电能力的计算当中, 加强最大供电能力的准确性和可信性^[14-17]; 从平抑不可控分布式电源出力不确定性角度出发, 在尽量不改动配电网结构的基础上接入储能电站, 不仅提升了网络的最大供电能力也增加了配电网的可调度性^[18-19]; 从配电网的调度角度出发, 在计算最大供电能力时, 对不可控分布式电源出力进行预测, 在此基础上通过采用互补调度规则调整可控分布式电源的有功出力, 降低由不可控分布式电源的不确定性造成的影响^[20]。

但在主动配电网中, 部分分布式电源是作为可控、可调度机组参与配电网的经济运行^[21]。因此, 在建立主动配电网的最大供电能力模型时, 必须考虑其可控分布式电源主动管理以及不可控分布式电源的不确定性因素的影响, 相关的研究成果文献较少^[22-23]。

本文建立了主动配电网最大供电能力双层优化模型。根据主动配电网经济运行的相关要求, 在下层模型中, 对可控分布式电源有功出力按经济调度原则进行分配; 利用上层模型求解主动配电网的最大供电能力。其中针对不可控分布式电源出力的不确定性, 利用机会约束规划理论进行处理。

1 影响最大供电能力建模的因素

在研究主动配电网最大供电能力问题时, 应首先考虑影响最大供电能力计算准确性和合理性的主要因素, 并基于此进行建模。

1.1 主动配电网经济调度因素的影响

有别于传统有源配电网, 主动配电网不仅集合

了各种形式的分布式电源, 而且还是具有主动控制和调度能力的配电系统。这种调度特性不仅影响可控分布式电源的出力分配方案, 还会对配电网的电压分布、线路潮流分布等带来不同程度的影响。在供电能力最大化的过程中, 应该在每一个运行点对可控分布式电源出力进行经济调度。追求配电网运行的经济性和供电能力的最大化之间就存在博弈关系, 对最大供电能力建模过程中需要考虑如何协调这一博弈关系。

1.2 不可控分布式电源不确定性的影响

由于风力发电和光伏发电等不可控分布式电源的输出功率受自然因素影响具有不确定性, 并网后使得主动配电网的潮流也具有不确定性, 这些不确定性的存在给主动配电网最大供电能力的计算带来困难。本文将此类分布式电源具有不确定性的有功出力作为随机变量处理, 相关约束条件中也因此含有随机变量^[7]。机会约束规划可以在一定程度上允许不满足约束条件, 从而可以更好地表述含随机变量的优化问题^[24]。

1.3 双层模型逻辑架构

将上述影响因素纳入到最大供电能力问题的研究中。在实现配电网的供电能力最大化的过程中, 需要根据主动配电网经济运行的要求对可控分布式电源有功出力进行经济调度。双层优化模型可以很好地表述这一逻辑^[25], 如图 1 所示。其中, 上层模型旨在确定主动配电网当前最大供电能力, 而下层模型根据考虑运行调度因素的影响对接入的可控分布式电源进行经济调度。同时, 为应对不可控分布式电源的不确定性的影响, 利用机会约束规划理论, 一定程度上允许不满足约束的要求。最终, 得到了考虑主动配电网运行特点的最大供电能力, 有效地协调了配电网安全运行和经济运行之间的矛盾。

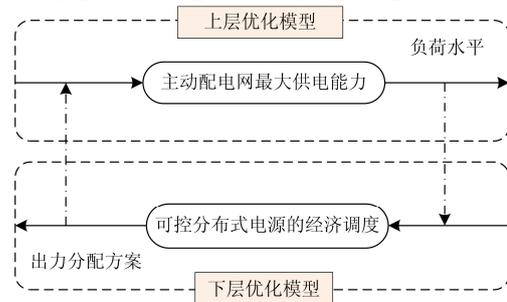


图 1 双层模型逻辑架构图

Fig. 1 Logical structure of bi-level model

2 基于机会约束规划的主动配电网最大供电能力双层优化模型及求解

2.1 上层最大供电能力优化模型

上层模型用于求解最大供电能力。考虑到不可控分布式电源输出功率的不确定性, 基于机会约束

规划理论, 为将不确定性的影响限制在可接受范围内, 利用概率形式表述约束条件。

2.1.1 目标函数

根据定义, 最大供电能力指配电网在满足节点潮流平衡约束、各类可控分布式电源输出功率约束、支路功率约束和节点电压约束的条件下所能供给的最大负荷, 它由配电网的运行方式和负荷的增长模式所决定^[9-10]。当网络负荷增长时, 可控分布式电源的有功出力也要做出相应的调整。本文假设负荷是等比例增长, 负荷以及可控分布式电源的增长模式可表示为

$$\begin{cases} P_{di} = P_{di}^0 (1 + \lambda K_{di}) \\ Q_{di} = Q_{di}^0 (1 + \lambda K_{di}) \\ P_{DGi} = P_{DGi}^0 (1 + \lambda K_{DGi}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{di} 与 P_{DGi} 表示节点 i 满足安全约束下的有功负荷和可控分布式电源的有功出力; P_{di}^0 与 P_{DGi}^0 表示节点 i 基态时有功负荷和可控分布式电源的有功出力; λ 为负荷增长因子; K_{di} 为节点 i 负荷增长方式; K_{DGi} 为节点 i 所接可控分布式电源有功输出的增长方式。

本文采用以主动配电网中负荷总和最大为目标函数的最大供电能力计算模型^[23], 其数学表达式为

$$\max P_{\max} = \sum_{i=1}^N P_{di}^0 (1 + \lambda K_{di}) \quad (2)$$

2.1.2 约束条件

为保证主动配电网安全稳定运行, 最大供电能力模型中约束条件的选取主要考虑配电网的安全运行要求以及可控分布式电源的运行限制, 具体约束如下。

1) 潮流平衡约束

$$P_{Gi} + P_{DGi}^0 (1 + \lambda K_{DGi}) + P_{RESi} - P_{di}^0 (1 + \lambda K_{di}) - U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (3)$$

$$Q_{Gi} + Q_{DGi} - Q_{di}^0 (1 + \lambda K_{di}) - U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (4)$$

2) 节点电压约束

$$\Pr \{U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max}\} \geq \beta \quad (5)$$

3) 线路容量约束

$$\Pr \{|P_{ij}| \leq P_{ij,\max}\} \geq \beta \quad (6)$$

4) 变压器约束

$$S_T \leq S_{T,\max} \quad (7)$$

5) 分布式电源出力约束

$$P_{DGi,\min} \leq P_{DGi} (1 + \lambda K_{DGi}) \leq P_{DGi,\max} \quad (8)$$

$$Q_{DGi,\min} \leq Q_{DGi} \leq Q_{DGi,\max} \quad (9)$$

式中: P_{RESi} 表示不可控分布式电源的有功出力; U_i 与 θ_i 分别为节点 i 的电压幅值与相角; G_{ij} 与 B_{ij} 分别为支路 ij 的电导和电纳; P_{ij} 为支路 ij 的线路传输功率; S_T 为变压器 T 支路流出的功率值。式(5)、式(6)为状态变量应满足的机会约束规划置信度约束, $\Pr\{\cdot\}$ 表示机会约束成立的概率; β 为预先设定的置信度; 下标 \max 和 \min 分别表示各自的上下限。

2.2 下层主动配电网经济调度模型

在实现主动配电网供电能力最大化的过程中, 根据经济运行要求对可控分布式电源的有功出力进行调整。因此, 需建立主动配电网经济调度模型, 按照经济调度的原则分配可控分布式电源, 进而得到可控分布式电源出力的增长方式。

2.2.1 目标函数

在主动配电网中, 对不可控分布式电源一般采用最大功率点跟踪控制模式, 不参与经济调度; 对主动配电网能够主动管理的可控分布式电源以及与大电网间的电力交互进行统筹协调, 实现运行成本最低。因此目标函数主要考虑的是整个主动配电网的经济运行成本^[14]。

主动配电网经济调度的目标函数可表示如式(10)。

$$\min F = \sum_{i=1}^{N_1} C_{DGi} (P_{DGi}) + C_{pt} P_{grid} \quad (10)$$

式中: N_1 为可控分布式电源的数目; C_{DG} 为可控分布式电源的运行成本; C_{pt} 为主动配电网从大电网购电时的电价; P_{grid} 为主动配电网与大电网间的交互功率。

对于柴油发电机, 其运行成本函数类似火电机组^[19], 一般采用二次函数近似表示, 如式(11)。

$$C_{DE} = aP_{DE}^2 + bP_{DE} + c \quad (11)$$

式中: C_{DE} 为柴油发电机发电成本; a 、 b 、 c 为柴油发电机的耗量特性系数; P_{DE} 为柴油发电机的有功输出功率。

对于燃气轮机, 其运行效率随着输出功率的增大而上升, 其运行成本与有功输出功率有如式(12)所示关系式^[26]。

$$C_{MT} = (C_{ng} / LHV_{ng}) \cdot \frac{P_{MT}}{\eta(P_{MT})} \quad (12)$$

式中: C_{MT} 为燃气轮机发电成本; C_{ng} 为天然气价

格; LHV_{ng} 为天然气低热值; P_{MT} 为燃气轮机的有功输出功率; $\eta(P_{MT})$ 为燃气轮机的运行效率, 单台燃气轮机的效率函数表达式为

$$\eta(P_{MT}) = 0.0753 \times (P_{MT}/65)^3 - 0.3095 \times (P_{MT}/65)^2 + 0.4147 \times (P_{MT}/65) + 0.1068 \quad (13)$$

2.2.2 约束条件

主动配电网经济调度约束条件主要考虑各可控分布式电源的运行约束以及对主动配电网的可靠性要求, 具体约束如下。

1) 功率平衡约束

$$P_{DG} + P_{RES} + P_{grid} - P_d - P_{Loss} = 0 \quad (14)$$

2) 分布式电源出力约束

$$P_{DGi,min} \leq P_{DGi} (1 + \lambda K_{DGi}) \leq P_{DGi,max} \quad (15)$$

3) 主动配电网与大电网间交互功率约束

$$P_{grid,min} \leq P_{grid} \leq P_{grid,max} \quad (16)$$

2.3 最大供电能力模型求解

本文所建主动配电网最大供电能力模型, 属于双层优化问题。双层优化模型的上下两层之间包含相互影响的变量。交替迭代算法是一种能够有效求解双层优化问题的数学方法, 通过内外层的反复迭代计算结束得到最优解^[25]。针对本文所建立的双层优化模型, 采用交替迭代算法直接进行求解, 求解流程如图 2 所示。由于上层优化模型中含有随机变量, 其中的机会约束需要满足一定的置信水平, 因此上层模型采用基于蒙特卡洛模拟的粒子群优化算法进行求解^[27]; 下层优化模型采用内点法求解。具体步骤如下。

1) 初始化相关参数。获取配电网的相关参数, 设置粒子群算法基本参数, 并给出基态运行点的负荷和可控分布式电源有功出力。

2) 求解上层模型。得到一组主动配电网的最大供电能力并确定负荷增长因子 λ 。

3) 传递信息。将求解得到的负荷增长因子 λ 传递至下层优化模型。

4) 求解下层模型。根据已传递的负荷增长因子对可控分布式电源进行经济调度, 得出一组经济分配方案并确定可控分布式电源出力增长方式 K_{DGi} 。

5) 判断收敛条件。如果新的运行点满足收敛条件或循环迭代至设定的迭代次数, 停止并输出优化结果; 否则, 更新可控分布式电源出力增长方式 K_{DGi} , 返回步骤 2)。

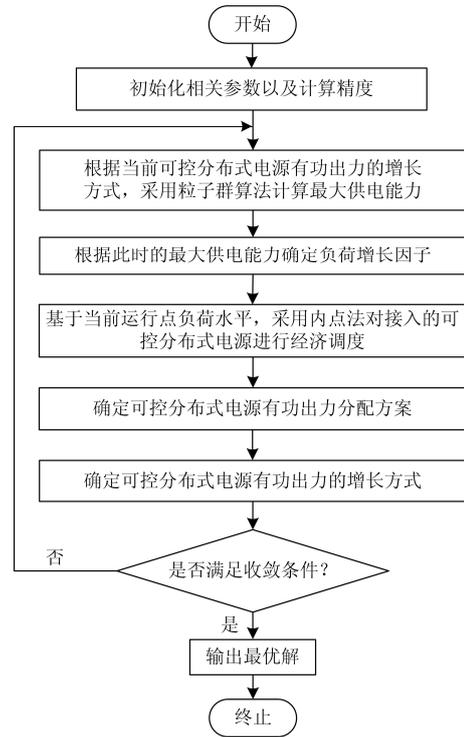


图 2 双层优化模型求解流程图

Fig. 2 Solving flow chart of bi-level optimization model

3 算例分析

本文以含有风力、光伏发电和柴油发电机等分布式电源的改进 IEEE33 节点主动配电网为例进行仿真计算, 如图 3 所示, 线路参数见文献[28]。优化变量及相关参数在优化过程中采用标么值进行计算。

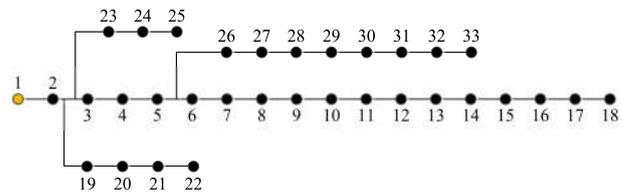


图 3 IEEE33 节点配电网结构图

Fig. 3 Diagram of IEEE 33-bus distribution network

表 1 为各种分布式电源的相关参数。在算例中, 节点 30 接入光伏发电机组, 光照强度满足 Beta 分布^[29]; 节点 7 与 24 处接入风力发电机组, 风电出力采用基于局部误差的 Beta 分布模型^[30]; 节点 14、25 接入柴油发电机; 节点 32 接入燃气轮机。各机会约束的置信水平设为 0.95。粒子群算法中学习因子 c_1 和 c_2 分别取 2 和 2, 种群规模为 40, r_1 和 r_2 为 0 到 1 之间的随机数, 最大迭代次数为 1000, 惯性权重初始值为 0.9。 C_{ng} 取 2.5 元/ m^3 , LHV_{ng} 取 9.7 kWh/ m^3 。

表 1 分布式电源装机容量

序号	连接节点	类型	安装容量/kW	调度模式
1	A7	风力发电	300	不可调度
2	A14	柴油发电机	600	可调度
3	A24	风力发电	300	不可调度
4	A25	燃气轮机	650	可调度
5	A30	光伏发电	200	不可调度
6	A32	柴油发电机	600	可调度

求解得到的最大供电能力见表 2，同时列出了不考虑经济调度影响(假设为追求供电能力最大,可控分布式电源运行在额定工况)的最大供电能力以及运行成本作为对比。

表 2 主动配电网最大供电能力及运行成本

模型	运行成本/元	最大供电能力/kW
考虑经济调度	3098.1	4746
不考虑经济调度	3187.3	4769

从表 2 可以看出，在计算主动配电网最大供电能力的过程中考虑可控分布式电源经济调度的影响后，所得的最大供电能力和主动配电网的运行成本有所降低。考虑可控分布式电源经济调度前后，最大供电能力由 4769 kW 降低到 4746 kW，但运行成本由 3187.3 元到 3098.1 元，节约了 89.2 元的成本。由此可见，在对主动配电网最大供电能力进行研究时，合理地考虑主动配电网运行调度的影响，能够得到符合经济运行要求的最大供电能力，实现主动配电网安全运行和经济运行之间矛盾的有效协调。

表 3 给出了在计算最大供电能力的过程中考虑经济调度前后两种情况下可控分布式电源有功输出的分布结果。在不考虑经济调度的情况下，为追求供电能力最大化使得可控分布式电源运行在额定功率状态。在一定负荷水平下配电网的这种运行方式，会使得其运行成本增高，不符合经济运行的要求。当考虑主动配电网经济调度的影响后，随着负荷的增长，在每个运行点根据配电网的运行成本经济地分配可控分布式电源有功出力。当负荷达到一定水平时，可控分布式电源的运行成本将高于向大电网购电的成本，所以原来由可控分布式电源供给的部分有功功率转为由向大电网购买进行供给。因此，本文所提模型使主动配电网的资源得到经济合理的利用，在保证安全运行的前提下节约了运行成本，得到的最大供电能力更能反映主动配电网的实际运行状况。

表 3 可控分布式电源输出功率

节点	考虑经济调度/kW	不考虑经济调度/kW
A14	426.9	600
A25	571.1	650
A32	421.1	600

图 4 与图 5 分别列出了两种情况下的节点电压分布和线路潮流分布。在负荷增长的过程中，节点电压分布以及线路潮流分布发生较明显的改变。由图 4 可知，节点电压尚有一定裕度，但后者使节点电压有所下降。从图 5 结果来看，未计及经济调度时，线路 14 与线路 17 的有功潮流是限制供电能力增长的瓶颈。而后者因主动配电网对可控分布式电源的调度会改变配电网的潮流分布。线路 14 与线路 17 虽未达到线路功率约束上限，在物理上还有一定的供电裕度，但再增加的负荷不能满足经济性要求，从而限制了负荷的增长。

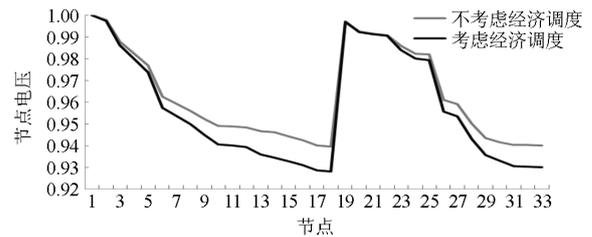


图 4 两种模式下节点电压分布对比

Fig. 4 Comparison of node voltage distribution under two modes

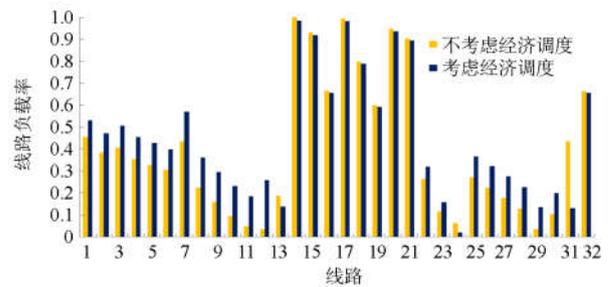


图 5 两种模式下线路负载率对比

Fig. 5 Comparison of line load rate under two modes

表 4 分别列出负荷增长方式为仅单一节点负荷增长、部分区域负荷增长和整个配电网负荷同时增长的最大供电能力。在算例中单一节点选取节点 33，由计算结果知，当继续增加负荷时，线路 32 将发生传输容量越限;当负荷增长方式为节点 26-33 区域内的负荷同时增长时，得到的供电能力为 4316 kW，继续增大负荷则节点 33 将电压越限。对比结果表明，同时参与增长的节点负荷越多，则配电网的供电能力越大。

表 4 不同范围最大供电能力及限制瓶颈
Table 4 Load supplying capability and bottleneck constraints under different areas

模型	最大供电能力/kW	限制瓶颈
单一节点	3772	线路 32 越限
部分区域	4316	节点 33 电压越限
整个配网	4746	线路 14、17 越限

图 6 描述了不同区域负荷增长所得到的最大供电能力。其中区域 1 为节点 26-33, 区域 2 为节点 19-22, 区域 3 为节点 23-25。其中, 区域 3 的最大供电能力最大, 所以该区域能够承受负荷变化的能力最理想。

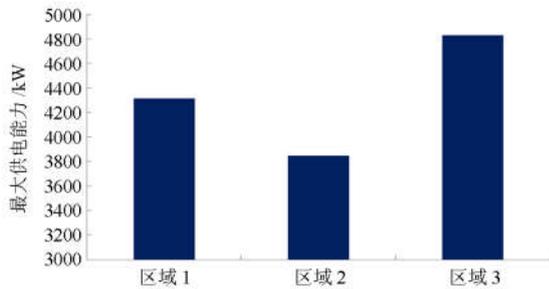


图 6 不同区域最大供电能力对比

Fig. 6 Comparison of load supplying capability under different regions

图 7 列出了不同置信度下最大供电能力及运行成本。分析图 7 可以看出, 机会约束规划模型可以实现在不确定环境下, 配电网安全约束以一定概率满足, 但要以牺牲一定量的目标值为代价。置信度越高, 安全约束越严格, 目标值的牺牲量越大。因此, 随着置信度的提高, 最大供电能力值逐渐减小。

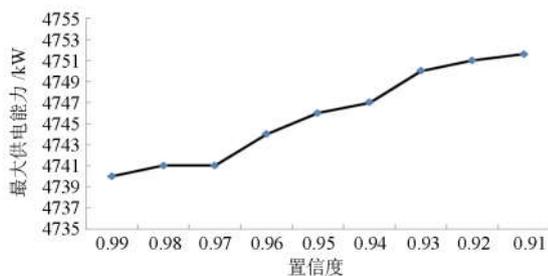


图 7 不同置信度下最大供电能力

Fig. 7 Comparison of load supplying capability under different confidence levels

4 结论

本文在传统最大供电能力求解的基础上, 结合主动配电网的特性, 考虑不可控分布式电源的不确

定性以及主动配电网的经济运行对最大供电能力带来的影响, 对主动配电网最大供电能力建立模型。通过对改进的 IEEE33 配电系统进行算例分析并得到以下结论:

1) 通过建立双层模型, 将主动配电网经济运行因素纳入到对最大供电能力的求解中。在实现供电能力最大化的过程中, 主动配电网的经济调度一定程度上会降低配电网的最大供电能力, 提高了运行的经济效益, 增加了配电网资源使用的合理性。

2) 针对不可控分布式电源的不确定性, 采用机会约束规划模型, 使约束条件的处理更加灵活。仿真结果表明置信度设置越高, 安全约束越严格, 所得到最大供电能力值会越小。

参考文献

- [1] 尤毅, 刘东, 于文鹏, 等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 10-16.
YOU Yi, LIU Dong, YU Wenpeng, et al. Technology and its trends of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10-16.
- [2] 柳春芳. 主动配电网的一体化设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 49-55.
LIU Chunfang. An integrated design method of active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 49-55.
- [3] 范明天, 张祖平, 苏傲雪, 等. 主动配电系统可行技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 12-18.
FAN Mingtian, ZHANG Zuping, SU Aoxue, et al. Enabling technologies for active distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 12-18.
- [4] 高亚静, 李瑞环, 梁海峰, 等. 考虑间歇性电源与负荷不确定性情况下基于多场景技术的主动配电系统两步优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1657-1665.
GAO Yajing, LI Ruihuan, LIANG Haifeng, et al. Two step optimal dispatch based on multiple scenarios technique considering uncertainties of intermittent distributed generations and loads in the active distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1657-1665.
- [5] AI Qian, FAN Songli, PIAO Longjian. Optimal scheduling strategy for virtual power plants based on credibility theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 48-55. DOI: 10.1186/s41601-016-0017-x.
- [6] 董雷, 陈卉, 蒲天娇, 等. 基于模型预测控制的主动配

- 电网多尺度动态优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4609-4616.
- DONG Lei, CHEN Hui, PU Tianjiao, et al. Multi-time scale dynamic optimal dispatch in active distribution network based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4609-4616.
- [7] 王健, 谢桦, 孙健. 基于约束规划的主动配电网能量优化调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 45-52.
- WANG Jian, XIE Hua, SUN Jian. Study on energy dispatch strategy of active distribution network using chance-constrained programming[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 45-52.
- [8] 肖峻, 李振生, 张跃. 基于最大供电能力的智能配电网规划与运行新思路[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(13): 8-14.
- XIAO Jun, LI Zhensheng, ZHANG Yue. Novel planning and operation mode for smart distribution networks based on total supply capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(13): 8-14.
- [9] 李振坤, 陈星莺, 刘皓明, 等. 配电网供电能力实时评估分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(6): 36-39.
- LI Zhenkun, CHEN Xingying, LIU Haoming, et al. Online assessment of distribution network loading capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(6): 36-39.
- [10] KAREN N M, HSION-DONG C. Electric distribution system load capability: problem formulation, solution algorithm, and numerical results[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 436-442.
- [11] 吴大伟. 含分布式电源的配电网供电能力研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- WU Dawei. Research on load supply capability for distribution networks with distributed generations[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [12] GNANADASS R, MANIVANNAN K G, PALANIVELU T. Assessment of available transfer capability for practical power systems with margins [C] // TENCON 2003 Conference on Convergent Technologies for Asia-Pacific Region, October 15-17, 2003, Bangalore India: 445-449.
- [13] 李国庆, 唐宝. 计及发电报价的可用输电能力的计算[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 18-22.
- LI Guoqing, TANG Bao. Available transfer capability calculation considering bidding in electricity market[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 18-22.
- [14] 张嘉堃, 韦钢, 朱兰, 等. 基于盲数模型的含分布式电源配电网供电能力评估[J]. 电力系统自动化, 2016, 43(9): 54-61.
- ZHANG Jiakun, WEI Gang, ZHU Lan, et al. Blind-number model based power supply capability evaluation of distribution networks with distribution generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 43(9): 54-61.
- [15] 国宗, 韦钢, 李明, 等. 含分布式电源的配电网供电能力评估方法[J]. 现代电力, 2015, 32(4): 56-61.
- GUO Zong, WEI Gang, LI Ming, et al. Assess of power supply capability for distribution networks with distributed generations[J]. Modern Electric Power, 2015, 32(4): 56-61.
- [16] ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, ZHANG Libo, et al. Probabilistic evaluation of available load supply capability for distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3215-3225.
- [17] 张李明, 齐先军. 考虑分布式电源随机性的配电网最大供电能力[J]. 电力建设, 2015, 36(11): 38-44.
- ZHANG Liming, QI Xianjun. Load supplying capability for distribution network considering distributed generation randomness[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(11): 38-44.
- [18] 国宗, 韦钢, 郭运城, 等. 面向供电能力提升的配电网储能功率动态优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 1-8.
- GUO Zong, WEI Gang, GUO Yuncheng, et al. Dynamic optimization of energy storage power in distribution network based on power supply capacity[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 1-8.
- [19] 鲍冠南, 陆超, 袁志昌, 等. 基于动态规划的电池储能系统削峰填谷实时优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(12): 11-16.
- BAO Guannan, LU Chao, YUAN Zhichang, et al. Load shift real-time optimization strategy of battery energy storage system based on dynamic programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(12): 11-16.
- [20] LIU J P, GAO Y J, WU Y D, et al. Real-time evaluation for power supply capacity of distribution network with distributed generation[C] // Proceedings of 2014 International Conference on Power System Technology, October 20-22, 2006, Chengdu, China: 6p.
- [21] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 主动配电网优化调度策略研究[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 177-183.
- YOU Yi, LIU Dong, ZHONG Qing, et al. Research on

- optimal schedule strategy for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 177-183.
- [22] 朱静, 高亚静, 刘建鹏, 等. 主动配电网供电能力实时评估方法[J]. 中国电力, 2015, 48(12): 96-102.
ZHU Jing, GAO Yajing, LIU Jianpeng, et al. Real-time evaluation for load capability of active distribution network[J]. Electric Power, 2015, 48(12): 96-102.
- [23] 高亚静, 朱静, 程华新, 等. 计及不确定性因素基于多场景的主动配电系统短期供电能力评估[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6076-6085.
GAO Yajing, ZHU Jing, CHENG Huaxin, et al. Evaluation on the short-term power supply capacity of active distribution system based on multiple scenarios considering uncertainties[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6076-6085.
- [24] 郭小璇, 龚仁喜, 鲍海波, 等. 含新能源电力系统机会约束经济调度的二阶锥规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 85-91.
GUO Xiaoxuan, GONG Renxi, BAO Haibo, et al. Second-order cone programming method of chance constrains economic dispatch considering renewable energy sources[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 85-91.
- [25] 胡文平, 何立夫, 陈杰军, 等. 考虑大规模电动汽车接入电网的双层优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 22-28.
HU Wenping, HE Lifu, CHEN Jiejun, et al. A bi-layer optimization based schedule considering large-scale electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 22-28.
- [26] 陈达威, 朱桂萍. 微电网负荷优化分配[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(20): 45-49.
CHEN Dawei, ZHU Guiping. An investigation on optimal load distribution of microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20): 45-49.
- [27] 潘超, 焦薇羽, 孟涛, 等. 基于混合智能粒子群算法的广义电源主动配电网优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 69-75.
PAN Chao, JIAO Yuwei, MENG Tao, et al. Optimal allocation of generalized power sources in active distribution network based on hybrid intelligent particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 69-75.
- [28] BARAN M E, WU F E. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1984, 4(2): 1401-1407.
- [29] LIU Xian. Impact of beta-distributed wind power on economic load dispatch[J]. Electric Power Components and Systems, 2011, 39(8): 768-779.
- [30] KAPLANI E, KAPLANIS S. A stochastic simulation model for reliable PV system sizing providing for solar radiation fluctuations[J]. Applied Energy, 2011, 97(1): 970-981.

收稿日期: 2017-02-03; 修回日期: 2017-03-17

作者简介:

周 玮(1981—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源并网后的电力系统调度运行;

孙 恺(1990—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电网优化运行与新能源消纳; E-mail: sunkai5288@163.com

孙 辉(1964—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统分析、新能源控制技术、DFACS 在电力系统中的应用等。

(编辑 魏小丽)