

# 基于混合整数二次锥规划方法的含分布式电源 配电网优化重构方法

汪芳宗, 王兆丰

(三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 433002)

**摘要:** 含分布式电源(DG)的配电网重构问题属于 NP 难问题, 数学规划是寻求该类问题求解方法的一个良好途径。提出了一个种含 DG 配电网优化重构的混合整数二次锥规划模型, 并使用具有多项式时间复杂性的内点算法进行求解。考虑了开关状态, 不同类型 DG 的投切、出力状态, 将其作为优化变量; 使用线性加权和法将配电网运行费用、可再生能源损失统一为综合费用, 作为规划的目标函数; 将潮流约束进行变换并合理松弛为二次锥约束, 最终建立了混合整数二次锥规划模型。最后通过算例证明了求解相同优化重构问题时该方法较已有方法得出结果更优, 以综合费用最小为目标时得出的结果同时有利于可再生能源消纳、降低网损和减少费用。

**关键词:** 分布式电源; 配电网重构; 优化调度; 二次锥规划; 运行费用最小

## An optimum reconfiguration method for distribution networks with DG based on mixed integer second-order cone programming

WANG Fangzong, WANG Zhaofeng

(School of Electrical Engineering & Renewable Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** Distribution network reconfiguration problem with distributed generation (DG) is known as a NP problem. To figure out this conundrum, mathematical programming is a good solution. A mixed integer second-order cone programming (MISOCP) model is proposed for the distribution network reconfiguration problem with DG. The model can be solved in polynomial time by using the interior point method. To build the MISOCP model, on-off states of switches and output states of DG are considered as decision variables; the linear weighted sum method is used to merge operating expenses and new energy loss into single objective; power flow constraint is transformed and slacked into second-order cone constraints, and the MISOCP model is developed. Finally, the results indicate that the performance of MISOCP method is better than that of other methods when solving the same problem. The results is benefit to the consumption of renewable energy, reduction of network loss and expenses when minimize the comprehensive cost.

**Key words:** distributed generation; distribution networks reconfiguration; optimized dispatch; second-order cone programming; operation cost minimization

## 0 引言

近年分布式电源(Distributed Generation, DG)逐渐增多, DG 对配电网电压分布有较显著影响<sup>[1]</sup>, 含 DG 配电网优化重构问题的研究有重要意义。含 DG 的配电网优化重构模型是在传统配电网重构模型的基础上增加可调节或不可调节的 DG 模型。因此与传统配电网重构的方法相似, 其可大致划分为启发式算法、智能算法和数学优化算法三类方法。启发式算法: 该类方法通过分析含 DG 配电网的特

性建立启发式规则以求解问题。文献[2]对含 DG 配电网的网损分摊问题进行了研究, 并设计启发式算法。文献[3]通过网络的近似等效变换和将 DG 简化为理想电压源设计了含 DG 配电网综合优化的启发式算法。智能算法: 该类方法主要通过参照自然规律设计算法以求解问题, 目前使用该类方法求解含 DG 配电网优化重构问题的研究较多<sup>[4-6]</sup>。数学优化算法: 该类方法通过将优化重构问题建立为特定的数学模型使用运筹学方法对问题进行求解。三类方法中, 启发式算法在求解问题时往往局限于考虑部

分信息, 难以从全网的角度进行重构和调度; 智能算法虽然对模型有较好的适应性, 但其存在计算结果不稳定、易陷于局部最优解、大规模问题求解效率较低等问题; 数学规划方法有较好的计算稳定性, 求解大规模问题的效率较高。并且因为其算法对于计算结果的最优性有严格的数学论证<sup>[7]</sup>, 所以该方法计算结果的最优性较好。因此数学规划方法较其他两类方法有更好的研究前景: 较启发式算法其能在计算过程中同时考虑全网信息, 从理论上讲其可以更加快速、可靠的达到全局最优解; 较智能算法其计算结果更加稳定, 更加善于求解大规模问题, 计算结果的全局最优性更加可靠。但是, 目前暂无研究使用数学优化算法求解含 DG 配电网优化重构问题。

数学优化算法在重构问题中应用的难点在于潮流约束属强非凸源<sup>[8]</sup>而多数已有非线性规划算法仅善于求解凸优化问题, 因此难以直接建立重构模型进行求解。文献[9]提出了一种线性的潮流计算方法, 文献[10]基于该方法建立了配电网重构的二次规划模型, 其中仅有电流约束是二次的。文献[11]提出了一种潮流计算的二次锥规划方法, 文献[12]在其基础上建立了配电网重构的混合整数二次锥规划模型, 获得了较高的求解效率。但是以上方法均未讨论配电网含 DG 的情况。

使用数学优化方法求解含 DG 配电网优化重构问题需首先对 DG 优化调度问题进行建模, 进而对网络重构模型进行拓展。目前常见的 DG 中, 石化能源发电有较好的功率调节性能, 风力发电随着双馈发电机和 PQ 解耦控制技术的发展<sup>[13-15]</sup>也具有了较好的调节性能, 而光伏发电<sup>[16-18]</sup>调节性能较差。本文根据前述 DG 功率调节性能的特点, 将调节性能较好的 DG 建立为线性规划模型, 将调节性能较差的光伏电站据无功补偿设备的不同, 建立成混合整数线性规划模型或整数线性规划模型。在比较了已有配电网重构方法后, 本文选择对有较高求解性能的混合整数二次锥规划模型进行拓展, 提出了一种含 DG 配电网优化重构的混合整数二次锥规划求解方法。本文对文献[12]模型中辐射状网络约束进行了改进, 将文献[19]提出的辐射状网络约束引入到本文模型中, 并设计了生成对偶图<sup>[19]</sup>数据的算法。考虑到在目前开放的电力市场环境下, 以网损最小为目标已难以满足配电网运行经济性的要求, 本文将以配电网运行费用最小、可再生能源 DG 发电量最大作为优化重构目标。最后, 本文先通过算例将本文方法与已有方法进行了比较, 证明了本文方法求得的结果较优。再使用线性加权和法将前述目标统一为综合费用, 以综合费用最小为目标函数

进行优化重构计算, 证明了其所得结果在保证可再生能源消纳的前提下, 不仅可以降低网络损耗而且可以较多的减少运行费用。

## 1 二次锥规划

### 1.1 二次锥规划简介

二次锥规划是一类非光滑凸规划问题, 它是在有限个二次锥的笛卡尔乘积的仿射子空间的交集上极小化或极大化一个线性函数<sup>[20]</sup>。二次锥规划问题属于凸规划问题, 所以能够保证最终得到全局最优解。目前求解二次锥规划较成熟的算法为内点算法, 由于其模型仅由线性和二次锥形式构成, 因此计算复杂度与同规模的线性规划相近。求解二次锥规划的内点算法具有多项式计算复杂性, 适于求解大规模问题。因此本文选择二次锥规划的内点算法作为模型的求解方法。

### 1.2 潮流计算的二次锥规划模型

极坐标下, 经典潮流约束为非线性规划模型, 其数学表达式为

$$P_{li} = \sum_{j \in N(i)} g_{ij} V_i^2 - V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (1)$$

$$Q_{li} = \sum_{j \in N(i)} -(b_{ij} + b_{shj}) V_i^2 + V_i V_j (b_{ij} \cos \theta_{ij} - g_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (2)$$

式中:  $P_{li}$ 、 $Q_{li}$  分别表示节点  $i$  注入的有功、无功功率;  $N(i)$  表示所有与节点  $i$  有连接关系的节点的集合;  $V_i$ 、 $V_j$  分别表示节点  $i$ 、 $j$  电压的幅值;  $\theta_{ij}$  表示节点  $i$ 、 $j$  间电压的相位差;  $g_{ij}$ 、 $b_{ij}$  表示节点  $i$ 、 $j$  间的导纳,  $b_{shj}$  为接地电容。

为将潮流约束转化为二次锥约束, 需设锥优化附加变量  $u_i$ 、 $R_{ij}$ 、 $T_{ij}$ , 令

$$u_i = V_i^2 / \sqrt{2} \quad (3)$$

$$R_{ij} = V_i V_j \cos \theta_{ij} \quad (4)$$

$$T_{ij} = V_i V_j \sin \theta_{ij} \quad (5)$$

将式(3)~(5)代入式(1)~(2)中, 可将潮流约束变化为

$$P_{li} = \sum_{j \in N(i)} \sqrt{2} g_{ij} u_i - g_{ij} R_{ij} + b_{ij} T_{ij} \quad (6)$$

$$Q_{li} = \sum_{j \in N(i)} -\sqrt{2} (b_{ij} + b_{shj}) u_i + b_{ij} R_{ij} - g_{ij} T_{ij} \quad (7)$$

$$2u_i u_j = R_{ij}^2 + T_{ij}^2 \quad (8)$$

$$R_{ij} > 0 \quad (9)$$

此时潮流约束转化为二次规划模型。将式(8)约束进行松弛, 使其转化为锥约束, 其表示式为

$$2u_i u_j \geq R_{ij}^2 + T_{ij}^2 \quad (10)$$

文献[11]通过大量计算证明了经变换、松弛后的潮流模型的计算结果与牛顿法潮流计算结果相近,因此前述松弛是合理的。至此潮流约束从非线性规划模型转化为由式(6)、(7)、(9)、(10)组成的二次锥规划模型。

## 2 含 DG 配电网优化重构的二次锥规划模型

### 2.1 目标函数

传统重构问题一般将网损最小作为目标函数,近年随着电力市场的开放,重构问题应更多考虑到配电网经济性。因此本文考虑的第一个目标函数为最小化配电网运行费用,其数学表达式为

$$\min F_a = F_1 + F_2 + F_3 \quad (11)$$

$$F_1 = TC_1 P_t \quad (12)$$

$$F_2 = TC_2 P_{DG} \quad (13)$$

$$F_3 = TC_3 \sum_{i=1}^n P_{li} \quad (14)$$

式中:  $F$  表示配电网的运行费用;  $F_1$  表示配电网向输电网购电的费用;  $F_2$  表示配电网向 DG 购电的费用;  $F_3$  表示配电网网损造成的经济损失;  $T$  表示网络运行时间;  $C_1$  表示配电网向输电网购电的电价;  $P_t$  表示输电网提供的有功功率;  $C_2$  表示 DG 的平均上网电价;  $P_{DG}$  表示 DG 发出功率的总和;  $C_3$  表示配电网的平均售电电价,  $\sum_{i=1}^n P_{li}$  表示配电网的网络损耗。

由于可再生能源 DG 的上网电价往往较高,单从配电网运行费用的角度考虑优化重构将不利于可再生能源的充分利用。为促进可再生能源的多发、满发和就近消纳,本文将最大化可再生能源 DG 的发电量作为第二个目标函数。其表达式为

$$\max F_b = \sum_{i \in E} P_{DG_i} \quad (15)$$

式中,  $E$  表示所有可再生能源 DG 的集合。通过线性加权和法可将目标函数统一为

$$\min F = \lambda_a F_a - \lambda_b F_b \quad (16)$$

式中:  $\lambda_a$ 、 $\lambda_b$  为加权系数,为使目标函数  $F$  具有实际意义取  $\lambda_a = 1$ 、 $\lambda_b = kC_2$ ,  $k$  为补偿系数。此时式(16)中  $\lambda_a F_a$  为配电网的运行费用,  $\lambda_b F_b$  为鼓励可再生能源发电的补偿费用;  $F$  为综合费用。

### 2.2 约束条件

#### 2.2.1 潮流约束

$$P_{li} = P_{DG_i} - P_{Di} = \sum_{j \in N(i)} P_{ij}, i=1, \dots, n-1 \quad (17)$$

$$Q_{li} = Q_{DG_i} - Q_{Di} = \sum_{j \in N(i)} Q_{ij}, i=1, \dots, n-1 \quad (18)$$

其中

$$P_{ij} = \sqrt{2} g_{ij} u_i^l - g_{ij} R_{ij} - b_{ij} T_{ij} \quad (19)$$

$$Q_{ij} = -\sqrt{2} (b_{ij} + b_{shij}) u_i^l + b_{ij} R_{ij} + g_{ij} T_{ij} \quad (20)$$

$$2u_i^l u_j^l \geq R_{ij}^2 + T_{ij}^2 \quad (21)$$

$$R_{ij} > 0 \quad (22)$$

式中:  $P_{DG_i}$ 、 $Q_{DG_i}$  分别表示 DG 发出的有功功率和无功功率;  $Q_{D_i}$  表示负荷的无功容量;  $P_{ij}$ 、 $Q_{ij}$  分别表示节点  $i$  流向节点  $j$  的有功功率和无功功率;  $u_i^l$ 、 $u_j^l$  表示支路  $l$  两端的电压,  $i$ 、 $j$  表示支路  $l$  两端节点对应的节点号;  $n$  表示网络的总节点数。

#### 2.2.2 线路连接状态约束

支路的端电压变量  $u_i^l$ 、 $u_j^l$  是由支路通断状态和支路端点电压共同决定的变量。当支路断开时  $u_i^l$ 、 $u_j^l$  等于 0, 当支路闭合时  $u_i^l$ 、 $u_j^l$  与相应的节点电压  $u_i$ 、 $u_j$  相等。为保证这一对应关系,需要添加如下约束

$$0 < u_i^l < x_l \frac{V_{\max}^2}{\sqrt{2}}, l=1, \dots, m \quad (23)$$

$$0 < u_j^l < x_l \frac{V_{\max}^2}{\sqrt{2}}, l=1, \dots, m \quad (24)$$

$$0 < u_i - u_i^l < (1-x_l) \frac{V_{\max}^2}{\sqrt{2}}, l=1, \dots, m \quad (25)$$

$$0 < u_j - u_j^l < (1-x_l) \frac{V_{\max}^2}{\sqrt{2}}, l=1, \dots, m \quad (26)$$

式中:  $x_l$  表示支路  $l$  的开关状态;  $V_{\max}$  表示允许的电压最大值,  $m$  表示网络的总支路数。

#### 2.2.3 辐射状网络约束

文献[19]提出了一种改进的辐射状网络约束,其较文献[12]中所使用的约束可更好的避免不可行解的产生,文献[21]将其用于配电网重构的二次规划模型中并验证了有效性。因此将该约束引入本文方法中。

$$\sum_{l=1}^n x_l = n-1 \quad (27)$$

$$\alpha_{ij} + \alpha_{ji} = x_l, l=1, \dots, m \quad (28)$$

$$\sum_{j \in N(i)} \alpha_{ij} = 1, i=1, \dots, n-1 \quad (29)$$

$$\sum_{t \in M_k} \sum_{e \in S_{kt}} \beta_{kt,e} = 1, k=1, \dots, f-1 \quad (30)$$

$$\alpha_{ij} + \alpha_{ji} + \beta_{kt,e} + \beta_{tk,e} = 1 \quad (31)$$

$$\alpha_{0j} = 0, j \in N(0) \quad (32)$$

$$0 \leq x_l \leq 1, l=1, \dots, m \quad (33)$$

式中  $\alpha_{ij}$ 、 $\alpha_{ji}$  为整数变量, 表示节点  $i$ 、 $j$  间的关系, 当  $\alpha_{ij}=1$  时  $j$  为  $i$  的父节点, 当  $\alpha_{ji}=1$  时  $i$  为  $j$  的父节点;  $\beta_{kt,e}$ 、 $\beta_{tk,e}$  为整数变量, 表示在对偶图<sup>[16]</sup>中节点  $k$ 、 $t$  间的关系,  $e$  表示节点  $k$ 、 $t$  间的第  $e$  条支路, 当  $\beta_{kt,e}=1$  时对于第  $e$  条支路  $k$  为  $t$  的父节点, 当  $\beta_{tk,e}=1$  时对于第  $e$  条支路  $t$  为  $k$  的父节点;  $M_k$  表示在对偶图中所有与节点  $k$  有连接关系的节点的集合,  $S_{kt}$  表示在对偶图中以节点  $k$ 、 $t$  为端点的所有支路的集合;  $f$  表示对偶图中节点的总数。

由于在已有的配电网数据中往往不含对偶图数据, 因此需根据已有数据生成对偶图数据。为此, 本文设计了解决方法, 其流程如图 1 所示。

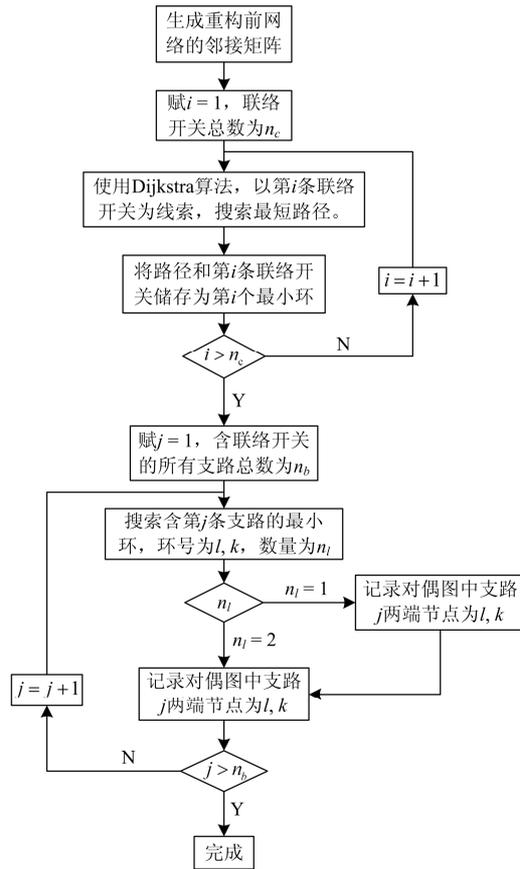


图 1 对偶图数据生成流程图

Fig. 1 Flow chart of dual graph data generating

配电网数据往往由重构前的网络和联络开关组成, 将联络开关闭合, 可得到一个含有多环的网络, 这里称其为原图。从图论角度看, 重构前网络图为原图的一个树, 此时联络开关为连枝。由图论知识可知, 在树中添加一条连枝, 即可在图中得到一个最小环。因此可根据标准数据的这一特点, 以一个联络开关为线索, 在重构前网络中使用 Dijkstra 算

法搜索联络开关两端节点间的最短路径, 所得到的最短路径和联络开关的集合即为原图的一个最小环, 分别利用每一个联络开关进行搜索可得到全部最小环。然后根据各最小环与支路间的对应关系生成对偶图数据并保存, 即可完成对偶图数据的生成。由于该算法计算复杂度较低并且仅需一次计算即可永久使用, 因此其所产生的额外计算时间可以忽略不计。

实际上, 本文所使用的辐射状网络约束条件中, 式(29)是对原图辐射状的不完全约束, 式(30)是对对偶图辐射状的不完全约束, 式(31)用以保证原图变量与对偶图变量间的对应关系。其通过两个不完全约束的共同作用, 避免了绝大多数不可行解的产生, 从而减少了计算中通过潮流无解排除不可行解所浪费的机时。

#### 2.2.4 电压幅值约束

潮流计算属于多解问题, 经过本文方法松弛后, 其解的数量将进一步增加。因此需对节点电压幅值进行约束, 一方面保证计算结果求得的电压幅值在合理范围内, 另一方面保证优化重构后网络各节点电压均不高于或低于配电网的要求。

$$V_{\min}^2 / \sqrt{2} < u_i < V_{\max}^2 / \sqrt{2} \quad (34)$$

#### 2.2.5 支路最大电流约束

在网络重构和 DG 优化调度的过程中, 都应保证各线路流过的电流不超过其最大载流量。

$$I_l^2 \leq I_{l\max}^2 \quad (35)$$

其中

$$I_l^2 = \sqrt{2} A_{ij} u_i^l + \sqrt{2} B_{ij} u_j^l - 2C_{ij} R_{ij} + 2D_{ij} T_{ij} \quad (36)$$

$$A_{ij} = g_{ij}^2 + (b_{ij} + b_{shij})^2 \quad (37)$$

$$B_{ij} = g_{ij}^2 + b_{ij}^2 \quad (38)$$

$$C_{ij} = g_{ij}^2 + b_{ij} (b_{ij} + b_{shij}) \quad (39)$$

$$D_{ij} = g_{ij} b_{shij} \quad (40)$$

式中:  $I_l$  表示流过支路  $l$  电流的幅值;  $I_{l\max}$  表示支路  $l$  允许的最大载流量。

### 2.3 DG 的数学模型

配电网中可接入的分布式电源种类繁多, 按能源形式可归纳为石化能源发电和可再生能源发电。前者包括微型燃气轮机、天然气发电等发电形式, 其本身具有较好的有功、无功调节性能。后者包括小型水力发电、光伏发电、风力发电等形式。虽然其发电情况受环境影响较大, 可控性较差, 但是近年随着相应控制技术的发展, 其中一部分也具有了一定的调节性能。因此分布式电源多数可简化为可调节的 PQ 模型进行计算。

近年光伏发电在 DG 中比重逐渐增加, 且相较于其他发电形式, 光伏发电的数学模型较特殊, 因此本文将首先针对光伏电站的数学模型进行讨论。光伏发电系统因其控制方式影响, 主要向电网发出有功功率, 且发出功率为固定值。当电网要求其参与无功调节时, 可由电站装设的无功补偿装置提供无功。首先考虑无功补偿装置采用晶闸管投切电容器的情况, 此时 DG 的数学模型为

$$P_{DG_i} = a_i P_{C_i} \quad (41)$$

$$Q_{DG_i} = b_i Q_{C_i} \quad (42)$$

式中,  $a_i$  为 0-1 整数变量, 表示 DG 的投切状态。  $P_{C_i}$  表示 DG 的有功容量。  $b_i$  为整数变量, 表示投入运行电容器的数量, 其值应小于或等于电容器的总数。  $Q_{C_i}$  表示单台电容器的无功容量。此时 DG 的数学模型为整数线性规划模型。

当考虑使用可连续调节的无功补偿装置时, 可将式(42)中  $b_i$  设为连续变量, 表示输出无功的比例系数。  $Q_{C_i}$  表示无功补偿装置的容量。此时 DG 的数学模型转化为混合整数线性规划模型。

当考虑有功、无功可连续调节的其他类型 DG 时, 可同时将式(41)、(42)中的  $a_i$ 、 $b_i$  设为连续变量, 表示有功、无功输出的比例系数。  $P_{C_i}$ 、 $Q_{C_i}$  则分别表示 DG 的有功容量和无功容量。此时 DG 的数学模型退化为线性规划模型。

### 3 算例分析

首先本文分别采用文献[4-5]所述目标函数, 使用 Matlab 建立其测试系统的混合整数二次锥规划模型, 通过 MOSEK 的二次锥规划求解器选用内点算法对模型进行计算, 并将计算结果与原文结果进行了对比。

表 1 算例 1 优化重构结果

Table 1 Optimization and reconfiguration results of test system 1

方案	断开联络开关	DG1 功率/ (MW/Mvar)	DG2 功率/ (MW/Mvar)	网损/ MW
文献[4]方法	15、17、23	9.42/2.33	10.35/0.54	0.106
本文方法	15、17、23	8.94/1.89	10.14/0.41	0.105

表 1 中, 使用本文方法与文献[4]方法得出的重构结果相同, 但 DG 调度结果不同。使用文献[4]方法求得优化重构结果的网损为 0.106 MW, 使用本文方法求得结果的网损为 0.105 MW。由此可知, 当以网损最小为目标函数时, 使用本文方法求得的结果可达到更好的降损效果。

表 2 算例 2 优化重构结果

Table 2 Optimization and reconfiguration results of test system 2

方案	断开联络开关	DG1 功率/ (kW/ kvar)	DG2 功率/ (kW/ kvar)	综合费用/ 万元
文献[5]方法	7、9、14、36、37	160/255	315/831	72.996
本文方法	7、9、14、17、37	1/363	297/929	67.060

表 2 中, 使用本文方法得出的重构结果和 DG 调度结果与文献[5]方法得出的结果均不同。使用文献[5]方法求得优化重构结果的综合费用为 72.996 万元, 使用本文方法求得结果的综合费用为 67.060 万元。由此可知, 当以综合费用为目标函数时, 本文算法得出的结果可达到较低的综合费用。

根据算例 1、2 可以知, 在选用相同测试系统采用相同目标函数的情况下, 使用本文方法进行优化重构得出的结果均较优。这证明了本文方法继承了数学规划类方法的优点, 所得结果的最优性较好。另外值得一提的是, 目前流行使用的智能算法由于其求解过程存在的不确定性, 为保证求得较优的结果常需多次重复计算, 而本文方法属于数学规划方法, 仅需一次计算即可直接得出最优解, 计算结果稳定。

随后本文采用加设了两台 DG 的 IEEE33 节点配电网络系统作为测试系统, 分别将网损最小和综合成本最小作为目标函数, 使用本文方法进行了计算。设置光伏电站 DG1 在节点 9 上, 最大有功出力为 200 kW, 装有晶闸管投切电容器 3 台, 合计无功容量为 150 kvar。设置微型燃气轮机 DG2 在节点 15 上, 最大有功出力为 1 MW, 最大无功出力为 500 kvar。取  $C_1$  为 0.4 元/kWh,  $C_2$  为 0.464 元/kWh,  $C_3$  为 0.8 元/kWh,  $k$  为 0.4,  $T$  为 8 760 h。计算结果如表 3 所示

表 3 算例 3 优化重构结果

Table 3 Optimization and reconfiguration results of test system 3

方案	断开联络开关	DG1 功率/ (kW/kvar)	DG2 功率/ (kW/kvar)	有功网损/ kW	综合费用/ 万元
1	33、34、35、36、37	200/150	1000/500	103.38	144.52
2	6、8、11、35、37	200/150	1000/500	65.68	140.44
3	6、8、11、14、37	200/150	418/496	81.82	138.98

表 3 中, 方案 1 为重构前的网络结构, 方案 2 为以网损最小为目标进行重构后的网络结构, 方案 3 为以综合费用最小为目标进行重构后的网络结

构。方案 1 的网损为 103.38 kW, 综合费用为 144.52 万元。方案 2 优化重构结果的网损为 65.68 kW, 综合费用为 140.44 万元。方案 3 优化重构结果的网损为 81.82 kW, 综合费用为 138.98 万元。方案 2 与方案 3 得出的重构结果和 DG 调度结果均不同。方案 2 结果的网损较低, 方案 3 结果的综合费用较低, 方案 2、3 的网损和综合费用均低于方案 1。

三种方案的节点电压分布情况如图 2 所示。其中方案 1 最低电压为 0.940 6 p.u., 方案 2 最低电压为 0.968 2 p.u., 方案 3 最低电压为 0.960 4 p.u.

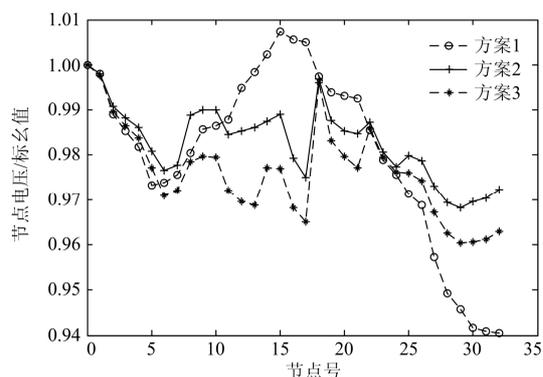


图 2 算例 3 中节点电压分布情况

Fig. 2 Distribution of node voltage of the test system 3

由图 2 可知, 方案 2 和方案 3 的电压分布情况较方案 1 均有明显改善。由表 3 可知, 方案 2 和方案 3 的网损、综合费用均低于方案 1。其中方案 3 的降损效果虽然次于方案 2, 但减少综合费用的效果较好。由此可以看出, 使用本文优化重构方法, 以多目标函数统一得到的综合费用最小为目标进行计算, 求得的结果在降低网损、改善电压分布情况、保证可再生能源消纳的同时, 可以使配电网获得较好的经济性。

#### 4 结论

本文建立了常见 DG 的简化模型, 进而对配电网重构问题的混合整数二次锥规划模型进行了改进和拓展, 将混合整数二次锥规划方法应用于求解含 DG 配电网优化重构问题。首先本文通过算例验证了本文方法的有效性, 并通过与目前流行使用的智能算法优化重构结果进行对比, 证明本文方法继承了数学规划方法的优点, 所得结果的最优性较好, 且计算结果更加稳定。其次本文从配电网运行经济性、促进可再生能源消纳两个角度出发, 在重构时综合考虑了网络损耗、购电成本和可再生能源 DG 发电量三个因素, 并通过算例证明了其所得结果在降低网损、改善电压分布、促进可再生能源消纳的

同时可以较多的减少运行费用, 有较好的经济性。

#### 参考文献

- [1] 裴玮, 盛鹏, 孔力, 等. 分布式电源对配网供电电压质量的影响与改善[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 152-157.  
PEI Wei, SHENG Kun, KONG Li, et al. Impact and improvement of distributed generation on distribution network voltage quality[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 152-157.
- [2] OLIVEIRA M E DE, OCHOA L F. Network reconfiguration and loss allocation for distribution system with distributed generation[C] // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Latin American, 2004: 206-211.
- [3] 王威, 黄大为. 含可调度分布式电源的配电网综合优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 429-433.  
WANG Wei, HUANG Dawei. The coordination optimization of distribution networks with dispatched distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 429-433.
- [4] 赵晶晶, 李新, 彭怡, 等. 基于粒子群优化算法的配电网重构和分布式电源注入功率综合优化算法[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 162-166.  
ZHAO Jingjing, LI Xin, PENG Yi, et al. A comprehensive optimization algorithm for injection power of distributed generation and distribution network reconfiguration based on particle swarm optimization[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 162-166.
- [5] 卞栋, 卫志农, 黄向前, 等. 电力市场中含分布式电源的配电网重构模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 117-123.  
BIAN Dong, WEI Zhinong, HUANG Xiangqian, et al. Distributed network reconfiguration model including distributed generation in the electricity market[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 117-123.
- [6] 高艺文, 刘俊勇, 雷成, 等. 考虑配电网结构变化的 DG 规划[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 40-46.  
GAO Yiwen, LIU Junyong, LEI Cheng, et al. DG planning considering the variation of the distribution network structure[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 40-46.
- [7] 戴彧虹, 刘新为. 线性与非线性规划算法与理论[J]. 运筹学学报, 2014, 18(1): 69-92.  
DAI Yuhong, LIU Xinwei. Advances in linear and nonlinear programming[J]. Operations Research Transactions, 2014, 18(1): 69-92.

- [8] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2575-2583.  
LIU Yibing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A mixed integer second-order cone programming based active and reactive power coordinated multi-period optimization for active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2575-2583.
- [9] MARTI J R, AHMADI H, BASHUALDO L. Linear power-flow formulation based on a voltage-dependent load model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1682-1690.
- [10] AHMADI H, MARTI J R. Distribution system optimization based on a linear power-flow formulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1): 25-33.
- [11] JABR R A. Radial distribution load flow using conic programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1458-1459.
- [12] JABR R A. Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 1106-1115.
- [13] 付文秀, 范春菊. SVG 在双馈风力发电系统电压无功控制中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 61-68.  
FU Wenxiu, FAN Chunju. Application of SVG in voltage and reactive power control of doubly-fed induction generation system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 61-68.
- [14] 李欣然, 马亚辉, 曹一家, 等. 一种双馈式风力发电系统的等效模型[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 210-217.  
LI Xinran, MA Yahui, CAO Yijia, et al. An equivalent model of doubly-fed wind generation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 210-217.
- [15] 陈家伟, 周荔丹, 姚钢, 等. 全开放式双馈风力发电实验平台的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 104-110.  
CHEN Jiawei, ZHOU Lidan, YAO Gang, et al. Study on full-open experiment platform for DFIG wind power generation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 104-110.
- [16] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-131.  
YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-131.
- [17] 黄冬冬, 吴在军, 窦晓波, 等. 光伏规模化并网的电能质量复合控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 107-112.  
HUANG Dongdong, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. A power quality composite control strategy based on large-scale grid-connected photovoltaic power generation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 107-112.
- [18] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.  
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [19] WILLIAMS J C. A linear-size zero-one programming model for the minimum spanning tree problem in planar graphs[J]. Networks, 2001, 39(1): 53-60.
- [20] 迟晓妮, 刘三阳. 二次锥规划的光滑牛顿法[J]. 应用数学, 2005, 18(S): 23-27.  
CHI Xiaoni, LIU Sanyang. A smoothing Newton method for the second-order cone program[J]. Mathematica Applicata, 2005, 18(S): 23-27.
- [21] AHMADI H, MARTI J R. Mathematical representation of radiality constraint in distribution system reconfiguration problem[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2015, 64: 293-299.

收稿日期: 2015-12-01; 修回日期: 2016-04-05

作者简介:

汪芳宗(1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统自动化、配电系统自动化等; E-mail: fzwang@ctgu.edu.cn

王兆丰(1991-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: wzfc8h@163.com

(编辑 姜新丽)