

基于双层动态时段划分的配电网重构

傅长熠, 杨镜非, 顾家辉

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 动态网络重构能有效降低配电网的网络损耗以及分布式电源的弃风弃光量, 为此提出了基于双层动态时段划分的配电网重构方法。上层优化中以网损成本与弃风弃光惩罚费用之和最小为优化目标, 决策变量为主动管理元素的出力; 下层优化中则以网损最小为目标函数来确定各时段开关状态量。为了减小模型的规模与复杂度, 提出了将割集法作为辐射状约束的表示方法。同时, 将该模型转化为混合整数二阶锥规划模型, 并结合和声搜索算法对其进行求解。通过改进 IEEE 33 节点系统进行仿真, 验证了所提方法的实用性和有效性。

关键词: 配电网; 动态重构; 二阶锥规划; 辐射状约束; 储能装置; 双层优化模型; 和声搜索算法

中图分类号: TM 761

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202203005

0 引言

配电网重构是配电网优化运行中的一种重要技术手段, 其通过对配电网线路中的分段开关和联络开关进行开合来改变网络的拓扑结构, 从而改变配电网潮流分布, 以实现降低网损、提高系统可靠性等目标。

配电网静态重构^[1-2]仅考虑单一时间断面下的优化, 而配电网动态重构则在此基础上考虑一个时间区间内参数的变化情况, 在数学上是一个高维非线性不连续的组合优化问题, 且求解过程中容易出现维数灾的问题, 难以被直接求解。因此, 如何对配电网动态重构问题进行简化和求解一直为研究的热点之一。文献[3]提出最优模糊 C 均值聚类法进行时段划分, 从而将所求解的问题转化为多个静态重构问题。文献[4]根据负荷情况进行聚类, 以此实现时段的划分来求解动态重构问题。文献[5]通过引入区间数来处理分布式电源和电动汽车的不确定性, 对各个时段进行静态重构后, 再通过比较降损情况对各个时段进行合并。文献[6]通过负荷曲线的信息熵进行时段划分, 并考虑了三相不平衡的情况。文献[7]采用微分进化算法以兼顾个体多样性与计算速度。文献[8]利用二阶锥松弛将配电网重构数学模型转化为凸规划进行求解, 并通过仅让少数开关可以被操作来降低问题的复杂度。上述研究配电网动态重构问题的主要分析方法有 2 类: 一是将动态重构问题转化为多个静态重构问题, 并利用提前划分好重构时段或是对静态重构后的相邻时段进行合并来实现动态重构, 但利用该类方法划分得到的重构时段依赖于主观参数的选取, 难以得到较好的优化结果, 且无法处理如储能装置等涉及多个时段

耦合的主动管理元素; 二是通过建立数学模型来利用最优化方法进行计算, 但动态重构问题的高复杂度使得研究学者必须对问题进行较大程度的简化才能在规定的时间内完成求解。

配电网通常采用开环运行, 因此考虑重构问题时需要建立辐射状约束的数学模型, 由于其中通常包含大量整数变量, 会较大地影响重构问题的计算效率。文献[9]提出了虚拟需求模型来表示辐射状约束, 但需要引入大量辅助变量。文献[10]提出了生成树约束并被广泛运用, 但该约束在某些场景下无法保证辐射状网络的生成。

基于此, 本文提出了将割集法作为辐射状约束的表示方法。首先建立了双层优化模型, 在利用二阶锥松弛处理非线性的潮流约束的基础上, 通过分离出涉及时段间耦合的优化变量来提高问题的求解效率, 从而实现重构时段的动态划分; 然后结合数学优化方法与和声搜索算法对模型进行迭代求解; 最后采用改进的 IEEE 33 节点系统验证了所提动态重构方法的实用性和有效性。

1 配电网辐射状约束表示方法

1.1 常用辐射状约束表示方法

目前常用的辐射状约束表示方法包括生成树约束和虚拟潮流约束。生成树约束的思路为令除了变电站节点之外的节点都有一个父节点, 其表达式如下:

$$b_{ij} + b_{ji} = 1 - a_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_{n_i \in \Omega_s, n_j \in \Gamma_i} b_{ij} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{n_i \in \Omega_s, n_j \in \Gamma_i} b_{ij} = 0 \quad (3)$$

式中: a_{ij} 为表示支路 l_{ij} 开断情况的 0-1 变量, $a_{ij} = 0$ 表示支路闭合, $a_{ij} = 1$ 表示支路断开; b_{ij} 为表示节点 n_i 与

节点 n_j 父子关系的辅助变量, $b_{ij}=1$ 表示节点 n_i 为节点 n_j 的父节点, $b_{ij}=0$ 表示节点 n_i 为节点 n_j 的子节点; Ω_s 为变电站节点的集合; Ω_n 为非变电站节点的集合; Γ_i 为与节点 n_i 相连的节点集合。

虚拟潮流约束的思路为令除了变电站节点之外的每个节点都有大小为 1 的虚拟需求, 其表达方式如下:

$$v_{ij} = -v_{ji} \quad (4)$$

$$\sum_{n_i \in \Omega_n, n_j \in \Gamma_i} v_{ji} = 1 \quad (5)$$

$$-(1-a_{ij})N \leq v_{ij} \leq (1-a_{ij})N \quad (6)$$

$$\sum_{l_{ij} \in \Lambda} (1-a_{ij}) = N - N_s \quad (7)$$

式中: Λ 为可能存在的支路 l_{ij} 构成的集合; v_{ij} 为从节点 n_i 流向节点 n_j 的虚拟潮流的大小; N 为网络中节点的数量; N_s 为网络中变电站的数量。

上述常用的辐射状约束表示方法存在以下 2 个问题: 一是会引入大量的新变量与约束; 二是约束中缺少体现各条支路间的联系的部分。上述 2 个问题都会导致求解空间的增大, 从而降低求解效率, 且其中效率较高的生成树约束并不是生成辐射状配电网的充要条件^[11]。基于此, 本文提出新的辐射状约束表示方法。

1.2 基于解环法的辐射状约束表示方法

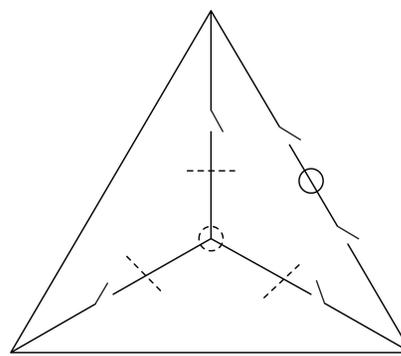
根据文献[12], 配电网辐射状约束可用如下 2 个条件进行描述: 条件 1, 网络中闭合支路的数量为 $N - N_s$; 条件 2, 该网络为连通的网络。

各类处理辐射状约束的方法基本以上述 2 个条件为基础, 其中条件 1 通常较易表示, 而条件 2 则较难表示。为了更好地用解析式来表达上述条件, 本文用如下另外 2 个条件对其进行替换: 条件 3, 网络中的所有基本环路中都有一个开关被打开, 各个基本环路中打开的开关相互独立, 且同一开关不能被多个基本环路同时打开; 条件 4, 网络中不存在孤岛, 孤岛为不与变电站节点直接或间接相连的连通区域, 将孤岛与网络主体相连的支路集合称为该孤岛所对应的割集。

条件 3 作为十进制编码方式的基础, 被广泛应用于各类采用启发式算法或智能算法求解配电网重构的问题中^[13-14]。由此可知, 满足条件 3 的网络必然满足条件 1, 且包含所有的可行解, 此处不进行证明。由于连通的网络中必定不存在孤岛, 不存在孤岛的的网络必定连通, 故条件 4 为条件 2 的等价条件。基于此, 本文提出定理 1: 同时满足条件 3 和条件 4 是网络满足辐射状约束的充要条件。

为了更好地利用数学模型表示条件 4, 将可能出现的孤岛分为如下 2 类: 第一类孤岛, 不含有度大于等于 3 的节点的孤岛; 第二类孤岛, 含有度大于等

于 3 的节点的孤岛。节点的度指该节点所连接的包含在基本回路中的支路数。2 类孤岛的示意图如图 1 所示。



○ 第一类孤岛, ⊙ 第二类孤岛
---- 第二类孤岛对应的割集

图 1 2 类孤岛的示意图

Fig.1 Schematic diagram of two kinds of islands

根据本文提出的定理 1, 可将配电网辐射状约束表示为:

$$\sum_{l_{ij} \in C_k} a_{ij} + \sum_{l_r \in C_k} b_r = 1 \quad (8)$$

$$\sum_{l_r \in \partial_n} b_r \leq 1 \quad (9)$$

$$\sum_{l_r \in \partial_n} b_r = \sum_{l_{ij} \in \partial_n} a_{ij} \quad (10)$$

$$\sum_{l_r \in \eta_m} b_r < N_{\eta_m} \quad (11)$$

式中: C_k 为第 k 个基本环路集合; ∂_n 为不同基本环路间的公共支路集合, 即 $\partial_n = C_{k1} \cap C_{k2}$; b_r 为引入的辅助变量, 每条公共支路中最多只能有 1 个开关被打开, 引入分属于不同基本回路的 b_r 来取代其中所包含的开关, 使得不同基本回路中不存在共同的变量, 从而使得条件 3 能被满足, 具体过程如图 2 所示, 并最终通过式(10)将 b_r 的状态转换回 a_{ij} 的状态; l_r 为转换后 b_r 所对应的支路; η_m 为网络中第 m 个第二类孤岛对应的割集; N_{η_m} 为第二类孤岛对应的割集中边的数量。式(8)确保满足条件 1; 式(8)——(10)确保第一类孤岛对应的割集中的开关不被全部打开; 式(11)确保第二类孤岛对应的割集中的开关不被全部打开, 且采用辅助变量 b_r 以减少重复出现的情况。为方便后续说明, 将本文方法称为割集法。

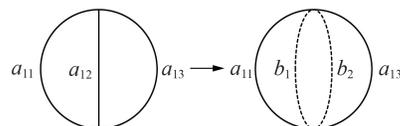


图 2 辅助变量转化过程

Fig.2 Transform process of auxiliary variable

将本文所提割集法与生成树法、虚拟需求法进行对比, 相应的变量数、约束方程数如表 1 所示^[15]。

表中: B 为支路总数; K 为基本环路数; M 为第二类孤岛对应的割集数; P 为公共支路数。考虑到配电网通常为弱环网, K 、 M 、 P 远小于 B 、 N ,因此可以认为本文模型在大部分情况下相较于其他模型拥有更少的变量数与约束方程数。

表1 不同辐射状约束方法的对比

Table 1 Comparison among different radial constraint methods

方法	变量数	约束方程数	生成树约束是否为生成辐射状网络的充要条件
本文方法	$B+2P$	$K+M+2P$	是
生成树法	$2B$	$B+N$	否
虚拟需求法	$3B$	$2B+N+1$	是

割集法中基本环路、公共支路、第二类孤岛对应的割集均需要通过事前的计算获取,这是本文模型相较于其他模型能有效减少变量数与约束方程数的原因。同时,这也使各个约束中均包含了大量线路状态间的信息,对于混合整数规划而言,该特点能有效削减搜索空间的大小。

2 配电网动态重构的二阶锥模型

2.1 约束条件

2.1.1 潮流约束

交流配电网常用的支路潮流模型为:

$$\sum_{k(i,:) \in \omega} P_{k,t} - \sum_{k(:,i) \in \omega} (P_{k,t} - I_{k,t}^2 R_k) = P_{i,t}^{\text{in}} \quad (12)$$

$$\sum_{k(i,:) \in \omega} Q_{k,t} - \sum_{k(:,i) \in \omega} (Q_{k,t} - I_{k,t}^2 X_k) = Q_{i,t}^{\text{in}} \quad (13)$$

$$U_{j,t}^2 = U_{i,t}^2 - 2(P_{k,t} R_k + Q_{k,t} X_k) + I_{k,t}^2 (R_k^2 + X_k^2) \quad k(i,j) \in \omega \quad (14)$$

$$I_{k,t}^2 U_{i,t}^2 = P_{k,t}^2 + Q_{k,t}^2 \quad k(i,j) \in \omega \quad (15)$$

$$P_{i,t}^{\text{in}} = P_{i,t}^{\text{sub}} + P_{i,t}^{\text{drg}} + P_{i,t}^{\text{dch}} - P_{i,t}^{\text{ch}} - P_{i,t}^{\text{load}} \quad (16)$$

$$Q_{i,t}^{\text{in}} = Q_{i,t}^{\text{sub}} - Q_{i,t}^{\text{load}} \quad (17)$$

式中:下标 t 表示 t 时段; $k(i,:)$ 、 $k(:,i)$ 分别表示首端为节点 i 和末端为节点 i 的支路 k ; ω 为支路集合; $P_{k,t}$ 、 $Q_{k,t}$ 和 $I_{k,t}$ 分别为支路 k 由首端节点流向末端节点的有功功率、无功功率和电流; R_k 、 X_k 分别为支路 k 的电阻和电抗; $U_{i,t}$ 为节点 i 的电压; $P_{i,t}^{\text{in}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{in}}$ 分别为节点 i 注入的有功功率和无功功率; $P_{i,t}^{\text{sub}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{sub}}$ 分别为节点 i 处变电站的有功输出功率和无功输出功率; $P_{i,t}^{\text{dch}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{ch}}$ 分别为节点 i 处储能装置的放电功率和充电功率; $P_{i,t}^{\text{drg}}$ 为节点 i 处分布式电源的有功输出功率; $P_{i,t}^{\text{load}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{load}}$ 分别为节点 i 的有功负荷和无功负荷。

2.1.2 潮流约束的二阶锥松弛

由于潮流方程为非线性方程,难以直接求解,因此通过引入中间变量对其进行转化。

用式(18)对式(12)—(15)中的相应变量进行替换,并对式(15)进行二阶锥松弛^[16]。

$$\begin{cases} \tilde{I}_{k,t} = I_{k,t}^2 \\ \tilde{U}_{i,t} = U_{i,t}^2 \end{cases} \quad (18)$$

式中: $\tilde{I}_{k,t}$ 、 $\tilde{U}_{i,t}$ 为对应的辅助变量。

则潮流方程中的式(12)—(15)可以分别转化为式(19)—(22)。

$$\sum_{k(i,:) \in \omega} P_{k,t} - \sum_{k(:,i) \in \omega} (P_{k,t} - \tilde{I}_{k,t} R_k) = P_{i,t}^{\text{in}} \quad (19)$$

$$\sum_{k(i,:) \in \omega} Q_{k,t} - \sum_{k(:,i) \in \omega} (Q_{k,t} - \tilde{I}_{k,t} X_k) = Q_{i,t}^{\text{in}} \quad (20)$$

$$\tilde{U}_{j,t} = \tilde{U}_{i,t} - 2(P_{k,t} R_k + Q_{k,t} X_k) + \tilde{I}_{k,t} (R_k^2 + X_k^2) \quad k(i,j) \in \omega \quad (21)$$

$$\left\| \begin{matrix} 2P_{k,t} \\ 2Q_{k,t} \\ \tilde{I}_{k,t} - \tilde{U}_{i,t} \end{matrix} \right\| \leq \tilde{I}_{k,t} + \tilde{U}_{i,t} \quad k(i,j) \in \omega \quad (22)$$

式(22)将对应的可行域松弛为整个二阶锥体内,成为凸可行域,使得问题能用商用求解器进行求解,且文献[16]通过分析及算例设置证明了松弛在不同目标函数下的准确性。

考虑到在配电网重构问题中,由于部分支路可能断开,式(21)不一定成立,利用大 M 法对其进行松弛,即:

$$\tilde{U}_{j,t} - \tilde{U}_{i,t} \geq -M^* a_{ij,t} - 2(P_{k,t} R_k + Q_{k,t} X_k) + \tilde{I}_{k,t} (R_k^2 + X_k^2) \quad k(i,j) \in \omega \quad (23)$$

$$\tilde{U}_{j,t} - \tilde{U}_{i,t} \leq M^* a_{ij,t} - 2(P_{k,t} R_k + Q_{k,t} X_k) + \tilde{I}_{k,t} (R_k^2 + X_k^2) \quad k(i,j) \in \omega \quad (24)$$

式中: M^* 为辅助变量,可取尽量大的正数。

松弛后的潮流方程由式(16)、(17)、(19)、(20)、(22)—(24)组成。

2.1.3 系统相关约束

此外,为保障系统的安全运行,配电网重构还需满足如下约束:

$$U_{\min}^2 \leq \tilde{U}_{j,t} \leq U_{\max}^2 \quad (25)$$

$$0 \leq \tilde{I}_{k,t} \leq I_{\max}^2 (1 - a_{ij,t}) \quad (26)$$

$$-P_{\max} (1 - a_{ij,t}) \leq P_{k,t} \leq P_{\max} (1 - a_{ij,t}) \quad (27)$$

$$-Q_{\max} (1 - a_{ij,t}) \leq Q_{k,t} \leq Q_{\max} (1 - a_{ij,t}) \quad (28)$$

式中: U_{\min} 为电压最小值; U_{\max} 、 I_{\max} 、 P_{\max} 、 Q_{\max} 分别为电压、电流、有功功率、无功功率最大值。式(25)为节点电压约束,式(26)为支路电流约束,式(27)、(28)为支路功率约束。

由于配电网通常为开环运行,需满足辐射状约束式(1)—(4)。

2.1.4 主动管理元素建模

1) 分布式电源建模。

考虑分布式电源在一定情况下能通过弃风弃光参与主动管理,且仅考虑其有功出力,则其模型如式(29)所示。

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{dg}} \leq P_{i,t}^{\text{dg,pre}} \quad (29)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{dg,pre}}$ 为节点*i*处分布式电源功率预测值。

2) 储能装置建模。

$$u_{i,t}^{\text{dch}} + u_{i,t}^{\text{ch}} \leq 1 \quad i \in B^{\text{ess}} \quad (30)$$

$$u_{i,t}^{\text{dch}} P_{i,\min}^{\text{dch}} \leq P_{i,t}^{\text{dch}} \leq u_{i,t}^{\text{dch}} P_{i,\max}^{\text{dch}} \quad (31)$$

$$u_{i,t}^{\text{ch}} P_{i,\min}^{\text{ch}} \leq P_{i,t}^{\text{ch}} \leq u_{i,t}^{\text{ch}} P_{i,\max}^{\text{ch}} \quad (32)$$

$$E_{i,t+1}^{\text{ess}} = E_{i,t}^{\text{ess}} + u_{i,t}^{\text{ch}} P_{i,t}^{\text{ch}} \Delta t - u_{i,t}^{\text{dch}} P_{i,t}^{\text{dch}} \Delta t \quad (33)$$

$$E_{\min}^{\text{ess}} \leq E_{i,t}^{\text{ess}} \leq E_{\max}^{\text{ess}} \quad (34)$$

式中: $u_{i,t}^{\text{dch}}$ 、 $u_{i,t}^{\text{ch}}$ 分别为表征节点*i*处储能装置放电、充电状态的变量; B^{ess} 为安装储能装置的节点集合; Δt 为单位时间长度; $P_{i,\max}^{\text{ch}}$ 、 $P_{i,\min}^{\text{ch}}$ 和 $P_{i,\max}^{\text{dch}}$ 、 $P_{i,\min}^{\text{dch}}$ 分别为节点*i*处储能装置充电和放电功率的最大值、最小值; $E_{i,t}^{\text{ess}}$ 为节点*i*处储能装置的电量; E_{\max}^{ess} 、 E_{\min}^{ess} 分别为储能装置电量的上、下限。

2.2 目标函数

本文模型以网损成本与弃风弃光惩罚费用之和 C 最小为目标函数,因此有:

$$\min C = \sum_{t=1}^T \Delta t C_{\text{loss}} \sum_{k \in \Omega^L} \tilde{I}_{k,t} R_k + \sum_{t=1}^T \Delta t C_{\text{dg}} \sum_{i \in \Omega^{\text{dg}}} (P_{i,t}^{\text{dg,pre}} - P_{i,t}^{\text{dg}}) \quad (35)$$

式中: T 为总时段数; C_{loss} 为网损价格; C_{dg} 为弃风弃光的惩罚价格; Ω^L 为网络中可连通的支路集合; Ω^{dg} 为网络中安装分布式电源的节点集合。

3 双层优化模型

利用数学模型求解配电网动态重构问题时,理想状态下应将各时段下的每个开关状态都定义为变量。但这样会使得每增加一个时段,整数变量的数量都会大幅增加,从而导致计算时间呈指数级上升,在实际操作中不具备可行性。为解决这一问题,本文将第2节所提模型转化为双层优化模型来进行求解。

双层优化模型以一个自然日为优化周期,以1h为单位时间将其分为24个时段。作为优化主体的上层优化将优化周期内经济性最优作为优化目标,将风、光、储能的出力状况作为决策变量;下层优化在上层优化确定出风、光、储能的出力状况的情况下,以网损最小为目标,确定进行重构的时段以及各个时段内的开关动作情况,再将各时段的拓扑结构返回至上层,以此进行迭代求解。

3.1 上层优化模型

由于开关操作将由下层优化传递而来,因而无需考虑辐射状网络约束与开关操作相关约束,上层优化模型为混合整数二阶锥规划模型。

因此,对于上层优化模型,其目标函数为式(35),需满足的约束条件为式(16)、(17)、(19)、(20)、

(22)—(34)。

3.2 下层优化模型

下层优化以时段划分的结果和各时段内的开关开断情况为变量,以各时段网络的有功网损之和 C_{down} 最小为优化目标。目标函数为:

$$\min C_{\text{down}} = \sum_{t=1}^T \Delta t \sum_{k \in \Omega^L} \tilde{I}_{k,t} R_k \quad (36)$$

下层优化中,时段划分的总次数 N_c 需满足如下最大重构次数约束:

$$N_c \leq N_{\max} \quad (37)$$

式中: N_{\max} 为最大重构次数。

除此之外,还需要满足的约束条件有式(8)—(11)、(16)、(17)、(19)、(20)、(22)—(28),即去除了主动管理元素的部分,并加入了开关操作约束与辐射状约束。

由于涉及各个重构时段间耦合的储能系统的相关变量由上层优化计算得到并传递而来,将其看作常数进行优化。因此下层优化中不涉及多个重构时段之间的耦合,故而可以得出以下结论:不同重构时段内的优化结果之间相互独立。进一步地,可以将考虑整个优化周期的优化模型拆分为不同重构时段下优化模型的组合,且单个重构时段内仅在最初时段进行开关的操作。在初始模型中,整数变量的数目为 TB ,搜索空间为 2^{TB} ,而对其进行拆分后,转变为在 N_c 个问题中各自有 B 个整数变量,搜索空间变为 $N_c 2^B$,相较于之前大幅减少。

对于拆分后得到的模型,利用和声搜索算法^[17]确定重构时段的划分状况。和声搜索算法是一种智能优化算法,它模拟了音乐演奏的原理,有寻优速度快、过程简单的特点。各个重构时段内的开关状况则类似上层优化,同样为混合整数二阶锥规划模型,求解步骤如下:

1) 设置初始参数,迭代次数 $k=1$;

2) 生成初始解;

3) 将时段划分结果进行分类,分别求解各时段内的开关状态,对已计算过的时段采取简化策略,将未计算过的时段进行正常的优化计算,将重构结果返回并进行存储;

4) 根据各时段内计算返回的结果计算适应度函数;

5) 根据和声搜索算法进化策略进行迭代并生成子代种群,设 $k=k+1$;

6) 重复步骤3)—5)直至满足迭代终止条件;

7) 输出计算结果,并且将参数传递至上层优化模型中。

具体的求解流程图见附录A图A1。

4 算例分析

4.1 算例参数说明

为了验证本文所提出的双层优化模型对于求解配电网动态重构问题的有效性,基于改进的IEEE 33节点配电系统进行仿真。该配电系统含有5条联络线和32条普通线路,在此基础上,本文分别在节点16、19处接入额定功率为1000 kW的光伏阵列 PV_1 、 PV_2 ,在节点17接入额定功率为1000 kW的风机 WT_1 ,在节点15接入额定充放电功率为200 kW的储能系统 ESS_1 。网络结构图及基本环路情况如图3所示。

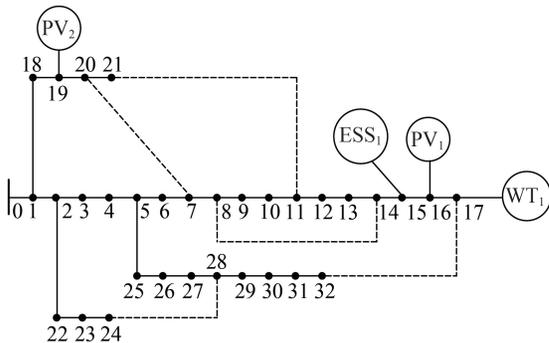


图3 改进的IEEE 33节点系统图

Fig.3 Diagram of modified IEEE 33-bus system

以1 h为一个时间单位,则一天可被分为24个时段。将负荷分为居民负荷、商业负荷和工业负荷3种,基础值为原算例值,3种负荷在各个节点的比例系数、不同负荷的日变化曲线以及风电和光伏出力预测值的日变化曲线分别见附录A图A2—A4。

由MATLAB R2019b编写算例程序,其中采用商用求解器的部分利用Yalmip调用CPLEX来进行求解。

4.2 算例仿真结果

对于本文所提出的辐射状约束表示方法,以IEEE 33节点系统、IEEE 69节点系统^[18]、IEEE 123节点系统^[19]为例,对比本文方法与生成树法、虚拟需求法在所需变量数以及约束方程数方面的差异,如表2所示。

表2 不同辐射状约束方法的对比

Table 2 Comparison among different radial constraint methods

系统	变量数/约束方程数		
	本文方法	生成树法	虚拟需求法
IEEE 33节点系统	51 / 25	74 / 60	111 / 108
IEEE 69节点系统	87 / 29	146 / 142	219 / 216
IEEE 123节点系统	132 / 10	252 / 248	378 / 376

由表2可知,本文方法具有更少的变量数与约束方程数,且约束方程数与网络中节点和支路数量关联较小,更加适应常规配电网结构的特点,有助于

提高求解配电网重构问题的计算效率。

此外,通过在IEEE 33节点系统中进行1000次辐射状网络的随机生成,对不同辐射状约束表示方法进行测试,对比结果如表3所示。并结合第2节所建立的数学模型,将目标函数设为网损最小,应用于单时段静态重构中,进行1000次测试以观察其计算效率与优化结果,并与种群数量为30、迭代次数为30的粒子群优化算法在静态重构问题中的优化结果进行对比,粒子群优化算法采用十进制编码方式对开关状态进行编码,对比结果如表4所示。

表3 不同辐射状约束方法计算效果的对比

Table 3 Comparison of calculation effects among different radial constraint methods

方法	成功生成辐射状网络的次数	配电网静态重构平均时间/s
本文方法	1000	2.23
生成树法	779	4.06
虚拟需求法	1000	6.32

表4 不同配电网重构方法计算结果的对比

Table 4 Comparison of calculation results between different distribution network reconfiguration methods

方法	配电网静态重构平均时间/s	获得全局最优解的次数
本文方法	2.23	1000
粒子群优化算法	9.15	891

由表3可知,本文方法与虚拟需求法均可确保生成辐射状网络,而根据第1节可知生成树约束并非是生成辐射状配电网的充要条件。事实上,仅当网络中不存在分布式电源且无零负荷节点时生成树法才能确保生成的网络为辐射状网络。在计算时间方面,本文方法用时最少,且仅为虚拟需求法的35.3%,与3种方法中变量以及约束方程的数量关系相符合,证明了减少辐射状约束中的变量及约束方程数有助于提高重构问题的计算效率。

由表4可知,采用二阶锥规划能稳定获得IEEE 33节点系统下静态重构的全局最优解^[20],而粒子群优化算法由于其迭代过程中的随机因素较多,无法保证收敛至固定的结果,同时计算效率较低,证明了将二阶锥松弛应用于配电网重构问题中的可行性与优越性。

对于第3节所建立的双层动态重构模型,设置最大重构时段数为4,储能装置的初始荷电状态与最终相同,取50%,储能电量上限为2000 kW·h, $C_{\text{loss}}=200$ 元/(MW·h), $C_{\text{dg}}=100$ 元/(MW·h)。和声搜索算法最大迭代次数为30,记忆库取值概率为0.7,微调概率为0.3。动态重构计算结果如表5所示,表中列出了重构前、后各个时段开关的具体动作情况,并给出了对应的目标函数值。

表5 动态重构计算结果

模式	时段	断开的开关 所在支路	目标函数值 / 元	网损 / MW
重构前	全天	7-20,11-21,24-28、 17-32,8-14	480.38	1.799
重构后	[1,6)	6-7,8-9,31-32、 8-14,24-28	256.74	1.081
	[6,14)	6-7,8-9,15-16、 27-28,11-21		
	[14,18)	6-7,7-8,8-9、 13-14,27-28		
	[18,24]	6-7,8-9,15-16、 27-28,8-14		

由表5可知,重构后整个重构区间被划分为4个时段。可以看出,重构之后配电网通过多次对开关进行动作,有效地降低了网损及弃风弃光费用,改善了配电网的运行状况,说明了本文方法能有效求解配电网动态重构问题,提高配电网运行的经济性。同时,本文方法在迭代4次后收敛,体现了良好的收敛性。

图4为分布式电源的弃风弃光功率和储能装置的充放电功率曲线。可以看出,在凌晨时段,弃风弃光情况较为明显,原因在于此时负荷较小,且储能装置有最大充电功率的限制,无法消纳剩余的清洁能源。储能装置在负荷低谷期与分布式电源出力的高峰期进行充电,在负荷高峰期进行放电,有效实现了削峰填谷的功能。此外,采用本文提出的基于双层动态时段划分的配电网重构方法后,弃风弃光的情况明显减少,证明了采用该模型对主动管理元素的优化有明显效果。

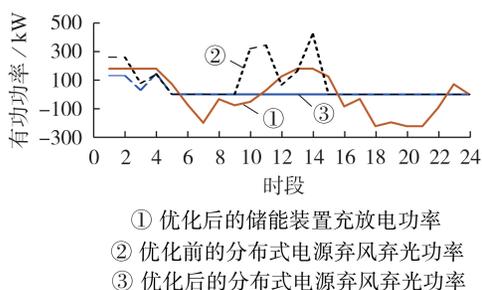


图4 分布式电源弃风弃光功率与储能装置充放电功率曲线

Fig.4 Curves of abandoned wind and photovoltaic power of distributed generation and charging and discharging power of energy storage device

此外,为了验证本文所提出的双层优化方法的合理性与优越性,在控制相关参数不变的情况下,选取了如下3种方法进行对比:文献[3]采用的C均值聚类法,根据各个时段的负荷情况利用聚类进行时段划分,再进行静态重构;文献[5]使用的合并时段法,先对各时段进行静态重构,再进行时段的合并来

生成最终的结果;不采用第3节所提出的方法,直接利用单层模型进行求解。本文方法与上述3种方法的仿真结果对比如表6所示。

表6 不同动态重构方法结果对比

方法	时段划分结果	目标函数值 / 元
本文方法	[1,6),[6,14), [14,18),[18,24]	256.74
C均值聚类法	[1,6),[6,15), [15,22),[22,24]	259.28
合并时段法	[1,12),[12,16), [16,22),[22,24]	263.62
单层优化方法	—	—

由表6可知,直接采取单层优化的方法在运行24 h之后仍无法得到结果。结合表5可以看出,除了在测试时间内无法完成求解的单层优化方法之外,其他3种方法相较于未重构,均能有效降低系统的经济成本。其中本文方法下的目标函数值最低,优化结果最佳,C均值聚类法次之,合并时段法效果最差。这是由于C均值聚类法只考虑了各个时段负荷水平的相似性,但并未考虑负荷水平相似的时段是否适合采用相同的静态重构结果,而合并时段法只能作用于相邻时段,与其他2种方法相比缺少对全局情况的考虑。同时,C均值聚类法和合并时段法也难以处理储能装置这类涉及多时段间耦合的主动管理元素,导致优化效果不佳。对于采取单层优化进行求解的策略,虽然其在理论上能够成功进行求解,但是在实际测试中由于问题复杂度过高而无法在限定时间内完成求解;而本文提出的考虑时段动态划分的双层优化方法则是充分考虑了各类变量之间的关联,在不对问题进行大幅度简化的前提下,大幅提高了优化效率,有效解决了配电网动态重构问题。

5 结论

本文提出了基于双层动态时段划分的配电网重构方法以及描述配电网辐射状约束的方法,经过算例分析,得出以下结论:

1)基于提出的描述配电网辐射状约束的方法所建立的数学模型,具有变量数及约束方程数少、模型复杂度低的特点,将其运用于配电网重构问题中后能有效提升计算效率;

2)二阶锥松弛能有效处理配电网重构模型中潮流方程内的非线性约束,简化原问题形式,提高其可解性和寻优性;

3)相比于其他方法,本文提出的双层优化方法能合理划分重构时段,有效处理如储能装置这类多时段耦合的主动管理元素,减少配电网运行成本及

弃风弃光量,在保证计算效率的同时大幅提升优化结果。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] QUEIROZ L M O, LYRA C. Adaptive hybrid genetic algorithm for technical loss reduction in distribution networks under variable demands[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 445-453.
- [2] 丁阳, 汪沅, 宾峰, 等. 基于博弈论的多目标配电网重构[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(2): 28-35.
DING Yang, WANG Feng, BIN Feng, et al. Multi-objective distribution network reconfiguration based on game theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 28-35.
- [3] BARTON J P, INFELD D G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(2): 441-448.
- [4] 高纯, 于艾清, 丁雨. 基于改进递归有序聚类的有源配电网多时段动态重构[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(2): 84-90.
GAO Chun, YU Aiqing, DING Yu. Multi-period dynamic reconfiguration of active distribution network based on improved recursive ordered clustering[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 84-90.
- [5] 李扬, 韦钢, 马钰, 等. 含电动汽车和分布式电源的主动配电网动态重构[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5): 102-110.
LI Yang, WEI Gang, MA Yu, et al. Dynamic reconfiguration of active distribution network considering electric vehicles and distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 102-110.
- [6] 董方格, 谭阳红, 罗春辉. 基于融合熵时段划分的三相配电网动态重构[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 78-84.
TONG Fangge, TAN Yanghong, LUO Chunhui. Dynamic reconstruction of three-phase distribution network based on time division of fusion entropy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 78-84.
- [7] 刘路宁, 彭春华, 温泽之, 等. 基于配电网动态重构的分布式光伏消纳策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(12): 56-62.
LIU Luning, PENG Chunhua, WEN Zezhi, et al. Distributed photovoltaic consumption strategy based on dynamic reconfiguration of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 56-62.
- [8] 李超, 苗世洪, 盛万兴, 等. 考虑动态网络重构的主动配电网优化运行策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(18): 3909-3919.
LI Chao, MIAO Shihong, SHENG Wanxing, et al. Optimization operation strategy of active distribution network considering dynamic network reconfiguration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(18): 3909-3919.
- [9] TAYLOR J A, HOVER F S. Convex models of distribution system reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1407-1413.
- [10] HONG H F, HU Z S, GUO R P, et al. Directed graph-based distribution network reconfiguration for operation mode adjustment and service restoration considering distributed generation[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(1): 142-149.
- [11] 王颖, 许寅, 和敬涵, 等. 基于断线解环思想的配电网辐射状拓扑约束建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2395-2404.
WANG Ying, XU Yin, HE Jinghan, et al. Radiality constraint modelling method in distribution network based on cutting-line and opening-loop idea[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2395-2404.
- [12] LAVORATO M, FRANCO J F, RIDER M J, et al. Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 172-180.
- [13] 麻秀范, 丁宁, 李龙. 配电网重构中网络辐射形与连通性的判断[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 289-293.
MA Xiufan, DING Ning, LI Long. Judging radial and connectivity of network in distribution networks reconfiguration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 289-293.
- [14] 陈春, 汪沅, 刘蓓, 等. 基于基本环矩阵与改进和声搜索算法的配电网重构[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 55-60.
CHEN Chun, WANG Feng, LIU Bei, et al. Network reconfiguration based on basic ring matrix and improved harmony search algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 55-60.
- [15] 徐成司, 董树锋, 朱嘉麒, 等. 基于供电回路非连通条件的配电网辐射状约束描述方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(20): 82-89.
XU Chengsi, DONG Shufeng, ZHU Jiaqi, et al. Description method of radial constraints for distribution network based on disconnection condition of power supply loop[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(20): 82-89.
- [16] 高红均, 刘俊勇, 沈晓东, 等. 主动配电网最优潮流研究及其应用实例[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1634-1645.
GAO Hongjun, LIU Junyong, SHEN Xiaodong, et al. Optimal power flow research in active distribution network and its application examples[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1634-1645.
- [17] ZONG W G, KIM J H, LOGANATHAN G V. A new heuristic optimization algorithm: harmony search[J]. Simulation, 2001, 76(2): 60-68.
- [18] SWARNKAR A, GUPTA N, NIAZI K R. A novel codification for meta-heuristic techniques used in distribution network reconfiguration[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(7): 1619-1626.
- [19] 杨明, 翟鹤峰, 马嘉翼, 等. 计及分布式电源发电不平衡度约束的三相不对称配电网动态重构[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12): 3486-3499.
YANG Ming, ZHAI Hefeng, MA Jiayi, et al. Dynamic reconfiguration of three-phase unbalanced distribution networks considering unbalanced operation constraint of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3486-3499.
- [20] DE MACEDO BRAZ H D, DE SOUZA B A. Distribution network reconfiguration using genetic algorithms with sequential encoding: subtractive and additive approaches[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 582-593.

作者简介:



傅长熠

傅长熠(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为配电网重构与拓扑分析(E-mail: 842756481@qq.com);

杨镜非(1974—),女,副教授,博士,主要研究方向为智能电网(E-mail: carayang@sztu.edu.cn);

顾家辉(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化、负荷预测(E-mail: jiahuiqu@sztu.edu.cn)。

(编辑 李玮)

(下转第52页 continued on page 52)

- of the CSEE, 2019, 39(9):2689-2702.
- [16] 崔全胜, 白晓民, 董伟杰, 等. 用户侧综合能源系统规划运行联合优化[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(17):4967-4981, 5279. CUI Quansheng, BAI Xiaomin, DONG Weijie, et al. Joint optimization of planning and operation in user-side multi-energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(17):4967-4981, 5279.
- [17] 梁易乐, 黄少伟, 张星, 等. 基于主从博弈的碳排放税制定方法[J]. 系统科学与数学, 2016, 36(8):1055-1067. LIANG Yile, HUANG Shaowei, ZHANG Xing, et al. Taxing strategies for carbon emissions based on Stackelberg game[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2016, 36(8):1055-1067.
- [18] 李鹏, 吴迪凡, 李雨薇, 等. 基于谈判博弈的多微网综合能源系统多目标联合优化配置[J]. 电网技术, 2020, 44(10):3680-3690.

LI Peng, WU Difan, LI Yuwei, et al. Multi-objective union optimal configuration strategy for multi-microgrid integrated energy system considering bargaining games[J]. Power System Technology, 2020, 44(10):3680-3690.

作者简介:



刘畅

刘畅(1996—),女,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统规划(E-mail: liuchangncepu@163.com);

刘文霞(1967—),女,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统规划与可靠性、电力系统风险评估(E-mail: liuwenxia001@163.com)。

(编辑 李玮)

Coordinative planning of distribution network and multiple integrated energy systems based on Stackelberg game

LIU Chang, LIU Wenxia, GAO Xueqian, LIU Zongqi, DENG Shiyu, LIU Gengming
(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to make full use of the potential reliability value of IES (Integrated Energy System) to delay the power grid investment and reduce the energy supply cost, a coordinative planning model of distribution system and multiple IESs based on Stackelberg game is proposed. The Stackelberg game relationship between the DSO (Distribution System Operator) and IES operators under the interaction between supply and demand is confirmed. Then, the DSO pricing model considering reliability difference is proposed by using the reward and punishment agreement. Under the effect of price mechanism, the Stackelberg game planning model is established. The upper-level leader DSO optimizes the electricity price and expansion planning strategy with the maximum profit as the goal, while the lower-level follower IES operators optimize the planning and operating strategy with the minimum cost as the goal. A case study is given to verify that the Stackelberg game planning method can improve the economic benefits of all parties and reduce the overall energy supply cost. At the same time, the influences of the variation of user reliability demand on the investment planning of all parties and the overall energy supply cost are analyzed.

Key words: Stackelberg game; integrated energy system; distribution network; reliability; coordinative planning

(上接第36页 continued from page 36)

Reconfiguration of distribution network based on bi-level dynamic time division

FU Changyi, YANG Jingfei, GU Jiahui

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Dynamic network reconfiguration can effectively reduce the network loss of distribution network and the abandoned wind power and photovoltaic output of distributed generation. Therefore, a distribution network reconfiguration method based on bi-level dynamic time division is proposed. In the upper-level optimization, taking the minimum sum of network loss cost and penalty cost of the abandoned wind power and photovoltaic as the optimization objective, and the output of active management element as the decision variable. In the lower-level optimization, taking the minimum network loss as the objective function to determine the switching state of each time period. In order to reduce the scale and complexity of the model, the cut set method is proposed to represent the radial constraints. At the same time, the above model is transformed into a mixed integer second-order cone programming model and it is solved combined with harmony search algorithm. The simulation of the improved IEEE 33-bus system is carried out to verify the practicability and effectiveness of the proposed method.

Key words: distribution network; dynamic reconfiguration; second-order cone programming; radial constraint; energy storage device; bi-level optimization model; harmony search algorithm

附录 A

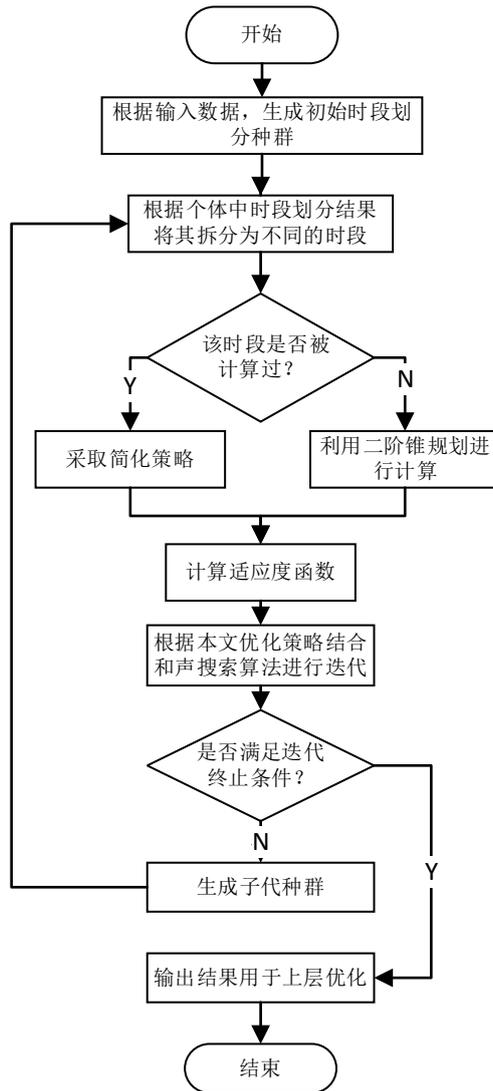


图 A1 下层优化模型求解流程

Fig.A1 Solution process of lower level optimization model

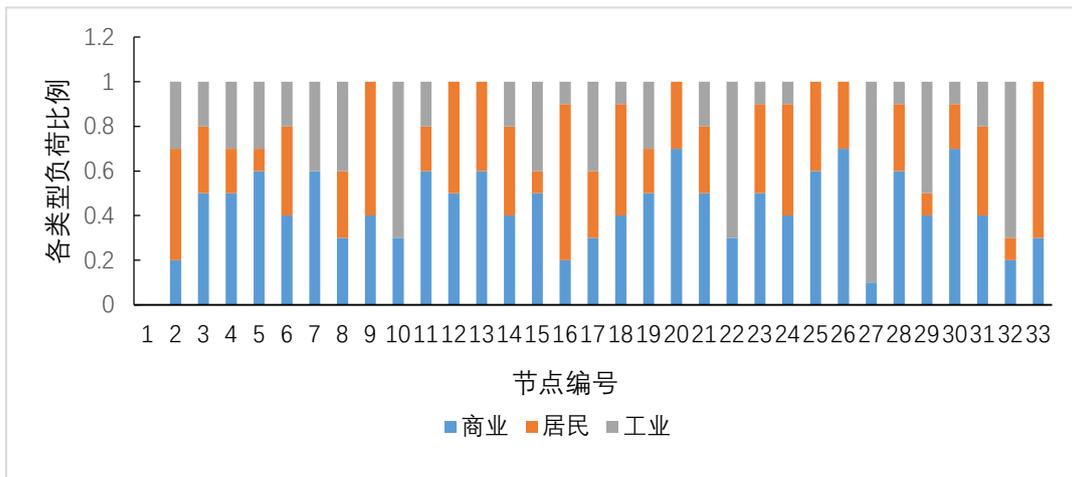


图 A2 各节点负荷比例

Fig.A2 Load ratio of each node

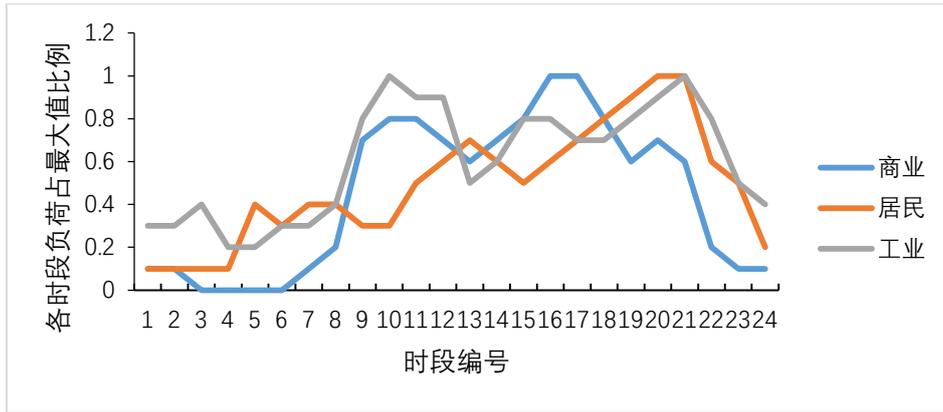


图 A3 各时段负荷比例
Fig.A3 Load ratio in each period

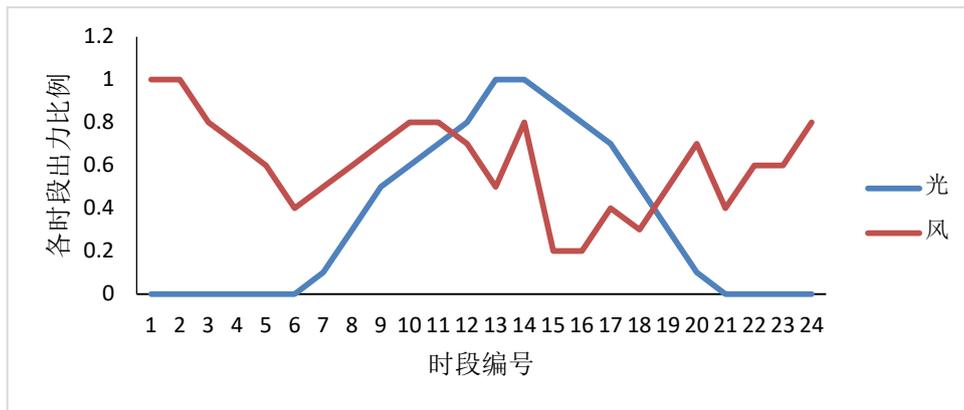


图 A4 各时段分布式电源出力比例
Fig.A4 Output ratio of distributed generation in each period