

计及源荷不确定性的主动配电网网架扩展柔性规划

蔡佳铭¹,张涛²,王承民¹,谢宁¹,朱彬若³

(1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院,上海 201100;2. 国网山西省电力公司,山西 太原 030001;
3. 国网上海市电力公司电力科学研究院,上海 200437)

摘要:在配电网源端与荷端的不确定性变量增多、主动性增强的背景下,进行适应发展需要的网架规划具有重要的研究意义。对系统中的不确定变量和主动控制变量分类建模,对经济性、可靠性和安全性技术目标做柔性处理,提出计及源荷不确定性的主动配电网网架扩展柔性规划模型;提出包含问题解耦、简化潮流和逆向搜索3个步骤的求解流程;结合19节点算例系统进行验证,算例结果表明采用提出的柔性规划模型和方法求解网架扩展规划问题具有有效性和可行性。

关键词:主动配电网;源荷不确定性;网架扩展;柔性规划

中图分类号:TM 715

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201910017

0 引言

随着可再生能源、灵活性资源^[1]在配电网中的渗透率不断提高,传统的无源配电网正逐步发展为具有自主管理和控制能力的主动配电网(ADS)。在源端与荷端的不确定性变量增多,而配电网的主动性增强^[2]的背景下,其存在的消纳困难、网架薄弱、规划滞后等问题凸显,采用传统的网架规划方法很难适应发展需求。因此,配电网网架扩展规划(DEP)应注重匹配源荷不确定性和描述配电网的主动性^[3]。

国内外学者在DEP领域采用的主流方法有随机规划(SP)^[4]、鲁棒优化(RO)^[5]和柔性规划(FP)^[6]。随机规划依赖于不确定性参数的概率分布模型,抽样生成规划场景^[7],进而总结大量试验的统计结果和分布规律。鲁棒优化和柔性规划只给出不确定变量的变化范围,在计及主动性的前提下提取出最恶劣的规划场景^[6-10],与随机规划相比所需的历史数据和场景资料更少。鲁棒优化通常只考虑不确定性变量的建模^[11-12],而柔性规划协调了不确定性与主动性变量的建模与优化。同时,柔性规划不需要计算理论最优的规划方案,而是考虑一定的裕度,使方案在总体上达到对环境变化的适应性最优^[6,13]。因此,本文中采用柔性规划处理主动配电网DEP问题。

针对系统中的不确定性变量(可再生能源功率等)和主动控制变量(灵活性资源)建模,文献[4]运用随机理论对分布式电源、储能系统、可控负荷等灵活性资源等进行数学描述。以上研究依赖于大量的

场景分析,对历史数据的完备性和计算能力提出了较高的要求。现有文献关于DEP问题柔性规划的研究较少,文献[6]将柔性规划模型用于评估系统的运行状况,文献[13]指出柔性规划在系统安全评估方面的应用。现有文献中关于DEP问题柔性规划的理论模型与计算方法还不完善。计及不确定性和潮流方程的DEP问题不易求解,文献[3]采用割平面和线性化潮流方法求解;文献[6,8]采用直流潮流,结合分支界定法等求解;文献[14-15]忽略不确定性建模,考虑非线性潮流方程求解。以上方法的计算复杂度和时间成本较大,降低了实用性和普及度。

本文为处理主动配电网DEP问题,首先建立改进的柔性规划模型,包括不确定性变量建模、主动控制变量建模、规划目标柔性处理等环节。然后,提出求解该柔性规划模型的计算方法,包括问题解耦、简化潮流和逆向搜索3个步骤。最后,以19节点系统为例求解DEP问题,结合校验指标,对提出的柔性规划流程的有效性与其可行性进行说明。

1 主动配电网DEP模型

1.1 数学模型

电力系统柔性(flexibility)是一个综合评估系统的不确定性与适应能力的概念,目前缺乏统一的定义。国际能源署(IEA)对柔性的定义是在面临大扰动时通过调整发电或负荷维持可靠性的能力,即可预见与不可预见的事件快速响应的能力。北美电力可靠性协会(NERC)认为电力系统柔性是系统资源满足需求变化的能力。本文所指的柔性是相对于刚性(确定性)而言的,是不确定性参数变化范围、波动程度及其所引起的系统响应与适应能力的定量描述。基于Halemane等学者提出的柔性理论^[16-17],本文提出的柔性规划模型如式(1)~(6)所示。

收稿日期:2018-12-11;修回日期:2019-08-26

基金项目:国家电网公司总部科技项目(17H300000437)

Project supported by the Science and Technology Project of SGCC(17H300000437)

$$\begin{aligned}
& \max \mu & (1) \\
\text{s.t. } & \max_{y \in T(\alpha)} \min_{u \in T(\beta)} \max_{k \in I} h(x, u, y, \mu) \leq 0 & (2) \\
& g(x, u, y) = 0 & (3) \\
& f(x, u, y) \leq 0 & (4) \\
& y \in T(\alpha) & (5) \\
& u \in T(\beta) & (6)
\end{aligned}$$

其中, x 为待求变量, 指描述网架规划方案; u 为主动控制变量, 指可中断负荷、可转移负荷与储能单元的功率; y 为带有预测误差的不确定性变量, 指风电功率、光伏功率和常规负荷节点的负荷; μ 为柔性指数, 且 $\mu \in [0, 1]$; $T(\alpha)$ 、 $T(\beta)$ 分别为描述不确定变量 y 和主动控制变量 u 取值范围的集合; α 、 β 为 0-1 变量, 是误差方向性参数, 取 0 时在预测值的基础上减去误差, 取 1 时则加上误差; k 为约束编号; I 为经济性、可靠性、安全性柔性约束集合。 μ 是对系统柔性的定量描述, 反映规划网架满足经济性、可靠性与安全性技术指标的适应程度。以柔性指数为目标, 指数越优, 则方案的适应性越优。

式(2)为对经济性、可靠性与安全性目标函数柔性处理后系统需满足的 3 类不等式约束, $\max_{y \in T(\alpha)}$ 表示通过调整参数来描述系统经济性、可靠性和安全性最恶劣的场景; $\min_{u \in T(\beta)}$ 表示通过尽可能少地调整主动控制变量 u 来改善系统的经济性、可靠性和安全性, 以此为前提优化规划方案 x ; $\max_{k \in I}$ 表示选取 3 类不等式约束中数值最大的一个。式(3)为供需平衡等式约束, 式(4)为其他需满足的功率上限、电压波动等不等式约束。

柔性模型的物理意义是对于任意的不确定性场景, 在尽可能调整主动控制变量的前提下, 满足经济性、可靠性、安全性的技术要求, 探究适应性最强的网架规划方案。下面分别介绍不确定变量 y 、主动控制变量 u 、柔性约束 $h(x, u, y, \mu)$ 和其他约束的建模方法。

1.2 不确定变量建模

记 Φ_w 为接入风电机组节点集合, Φ_s 为接入光伏机组节点集合, Φ_n 为常规负荷节点集合。已知 y 的预测值, 需修正预测误差。以常规负荷节点为例, 对于节点 $i (i \in \Phi_n)$ 有:

$$P_N^i(t) = P_N^{i, \text{pre}}(t) + \Delta P_N^i(t) \quad (7)$$

$$\Delta P_N^i(t) = -\Delta P_{N_{\max}}^i(1 - \alpha) + \Delta P_{N_{\max}}^i \alpha \quad (8)$$

其中, $P_N^i(t)$ 为 t 时刻节点 i 的修正负荷; $P_N^{i, \text{pre}}(t)$ 为 t 时刻节点 i 的负荷预测值; $\Delta P_N^i(t)$ 为 t 时刻节点 i 的预测误差修正值; $\Delta P_{N_{\max}}^i$ 为最大预测误差。

使 $P_N^i(t)$ 的取值在 $[P_N^{i, \text{pre}}(t) - \Delta P_{N_{\max}}^i, P_N^{i, \text{pre}}(t) +$

$\Delta P_{N_{\max}}^i]$ 的范围内, 将不确定参数可能的取值构成的集合记为 $T(\alpha)$ 。无需遍历所有的场景组合, 通过 $\max_{y \in T(\alpha)}$ 寻找最恶劣的情况, 计算出的规划方案最具适应性。

1.3 主动控制变量建模

记 Φ_{IL} 为可中断负荷节点集合, Φ_{TL} 为可转移负荷节点集合, Φ_{ES} 为储能单元节点集合。已知实时电价预测曲线 $C(t)$ 和负荷预测值^[7], 则有:

$$P_{\text{IL}}^i(t) = \begin{cases} 0 & C(t) > C_{\text{IL}}; i \in \Phi_{\text{IL}} \\ P_{\text{IL}}^{i, \text{pre}}(t) + \Delta P_{\text{IL}}^i(t) & C(t) \leq C_{\text{IL}}; i \in \Phi_{\text{IL}} \end{cases} \quad (9)$$

$$P_{\text{TL}}^i(t) = \alpha_{\text{TL}}(t) P_{\text{TL}}^{i, \text{pre}}(t) (k(t) - 1) + \Delta P_{\text{TL}}^i(t) \quad i \in \Phi_{\text{TL}} \quad (10)$$

$$P_{\text{ES}}^i(t) = \begin{cases} a_{\text{ES, dis}}^i C(t) + b_{\text{ES, dis}}^i & t \in T_{\text{dis}}; i \in \Phi_{\text{ES}} \\ a_{\text{ES, ch}}^i C(t) + b_{\text{ES, ch}}^i & t \in T_{\text{ch}}; i \in \Phi_{\text{ES}} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{IL}}^i(t) = -\Delta P_{\text{IL}_{\max}}^i(1 - \beta) + \Delta P_{\text{IL}_{\max}}^i \beta \\ \Delta P_{\text{TL}}^i(t) = -\Delta P_{\text{TL}_{\max}}^i(1 - \beta) + \Delta P_{\text{TL}_{\max}}^i \beta \end{cases} \quad (12)$$

$$k(t) = \left(\frac{C(t)}{C_{\text{TL}}} \right)^{C_0} \quad (13)$$

其中, $P_{\text{IL}}^i(t)$ 、 $P_{\text{TL}}^i(t)$ 、 $P_{\text{ES}}^i(t)$ 分别为 t 时刻节点 i 的可中断负荷、可转移负荷和储能单元有功功率, $P_{\text{ES}}^i(t)$ 取正时储能单元处于充电状态, 取负时则处于放电状态; $P_{\text{IL}}^{i, \text{pre}}(t)$ 、 $P_{\text{TL}}^{i, \text{pre}}(t)$ 分别为 t 时刻节点 i 的可中断负荷、可转移负荷预测值; $\Delta P_{\text{IL}}^i(t)$ 、 $\Delta P_{\text{TL}}^i(t)$ 分别为 t 时刻节点 i 的可中断负荷、可转移负荷预测误差修正值; $C(t)$ 为 t 时刻的电价; C_{IL} 为负荷中断阈值电价; $\alpha_{\text{TL}}(t)$ 为 t 时刻的负荷转移率, 认为其服从一定的概率分布; $k(t)$ 为 t 时刻的电价影响系数; T_{dis} 、 T_{ch} 分别为放电、充电时段集合; $a_{\text{ES, dis}}^i$ 、 $a_{\text{ES, ch}}^i$ 、 $b_{\text{ES, dis}}^i$ 、 $b_{\text{ES, ch}}^i$ 为储能单元处于放(充)电状态时的功率关系系数; C_{TL} 为负荷转移阈值电价; C_0 为弹性系数, 一般取小于 -1 的值。在计算最恶劣的场景组合时, 也应计入主动控制变量的预测误差。引入误差方向参数 β , $\Delta P_{\text{IL}}^i(t)$ 、 $\Delta P_{\text{TL}}^i(t)$ 的修正方法与 1.2 节相同, 不再赘述。

通过调节主动控制变量, 配合 $\min_{u \in T(\beta)}$ 在最恶劣的场景下尽可能改善系统的经济性、可靠性和安全性。

1.4 规划目标柔性处理

本文处理的 DEP 问题是基于远景廊道规划, 为适应负荷发展与电源接入情况, 确定不同阶段各廊道上的线路建设方案。各廊道上可建设一条或者多条电力线路。待求变量 $x_{s,l}^j$ 描述的是在阶段 $s (s = 1, 2, \dots, S)$ 廊道 $l (l = 1, 2, \dots, N_s)$ 上是否建设线路 $j (j = 1, 2, \dots, n_{s,l})$, 其取 1 时表示建设, 取 0 时表示不建设。 $X_{s,l} = \sum_{j=1}^{n_{s,l}} x_{s,l}^j$ 计算的是在阶段 s 廊道 l 上规划建设

设的线路条数。以经济性、可靠性和安全性为技术目标,通过对目标函数做柔性处理,将其转化为不等式约束的形式。

(1)经济性。

网架投资费用如下:

$$f_E = \sum_{s=1}^S (1+r)^{-s} \sum_{l=1}^{N_S} c_l d \Delta X_{s,l} \quad (14)$$

$$\Delta X_{s,l} = X_{s,l} - X_{s-1,l} \quad (15)$$

其中, r 为贴现率; c_l 为廊道 l 处的单位长度线路建设成本; d 为对应的线路长度; $X_{0,l}=0$ 。

考虑投资费用的上限 $f_{E,\max}$ 和理想的最优投资费用 $f_{E,\text{opt}}$,使 f_E 的计算结果在柔性区间 $[f_{E,\max}, f_{E,\text{opt}}]$ 内。引入经济性柔性指数 μ_E ($\mu_E \in [0, 1]$),对式(14)做柔性化处理,将目标改写为柔性约束式如下:

$$f_E + \mu_E (f_{E,\max} - f_{E,\text{opt}}) - f_{E,\max} \leq 0 \quad (16)$$

其中, $f_{E,\max}$ 为投资总费用的上限; $f_{E,\text{opt}}$ 为理想的总投资费用。

由式(16)可见,柔性指数越大,投资费用越接近理论的最优值;柔性指数越小,投资费用越接近上限。式(16)将原问题转化为在满足柔性约束的前提下最大化柔性指数的问题。对于可靠性和安全性目标的柔性化处理方式类似,经柔性化处理,不仅使原多目标优化问题可解,也避免了3类目标量纲不一致的问题。

(2)可靠性。

通过电力不足期望值(EDNS)指标定量计算网架的可靠性^[18]如下:

$$f_{R,s} = \text{EDNS}_0 + \sum_{l=1}^{N_S} \frac{\partial f_{R,s}}{\partial P_{l,\max}} [P_{l,\max} (X_{s,l} - n_l)] \quad (17)$$

$$\frac{\partial f_{R,s}}{\partial P_{l,\max}} = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} [\Pi(-P_{l,\max}(t)) - \Pi(P_{l,\max}(t))] \quad (18)$$

其中, EDNS_0 为初始网络的电力不足期望值; $P_{l,\max}$ 为廊道 l 上单位线路允许通过的功率上限; n_l 为初始网络廊道 l 上的线路条数; $\Pi(P_{l,\max}(t))$ 、 $\Pi(-P_{l,\max}(t))$ 为线路功率约束的对偶变量^[18]。

可靠性柔性约束如下:

$$f_{R,s} + \mu_{R,s} (f_{R,\text{smax}} - f_{R,\text{sopt}}) - f_{R,\text{smax}} \leq 0 \quad (19)$$

其中, $f_{R,\text{smax}}$ 为阶段 s 允许的缺供电力上限; $f_{R,\text{sopt}}$ 为理想的缺供电力; $\mu_{R,s}$ 为阶段 s 的可靠性柔性指数。

(3)安全性。

安全性柔性约束如下:

$$|P_{s,l}^j(t)| + \mu_{Ss,l}(t) (P_{l,\text{smax}} - P_{l,\text{sopt}}) - P_{l,\text{smax}} \leq 0 \quad (20)$$

其中, $P_{l,\text{smax}}$ 为在阶段 s 廊道 l 处线路允许流过的功率上限; $P_{l,\text{sopt}}$ 为理想的线路功率; $P_{s,l}^j(t)$ 、 $\mu_{Ss,l}(t)$ 分别为 t 时刻在阶段 s 廊道 l 处线路 j 上流过的功率和对应的安全性柔性指数。

$$\text{令 } \mu = \mu_E + \left(\mu_{R,s} + \sum_{t=1}^{24} \sum_{l=1}^{N_S} \mu_{Ss,l}(t) \right)^{[19]}, \text{ 问题转化为式}$$

(1)~(6)所示的单目标优化问题。引入柔性指数后,规划方案由理论的经济最优转化为兼顾可靠性和安全性,在牺牲一定的经济性的情况下更具适应性,是一种计及不确定性因素和更加贴近实际的解。理论上,柔性指数越大(接近于1),计算结果越接近理论的经济最优,同时对系统发展的匹配程度和适应性越强。

1.5 其他约束

规划模型还需满足以下的约束。

(1)供需平衡约束。

$$P_G^i(t) + P_W^i(t) + P_S^i(t) - P_{\text{IL}}^i(t) - P_{\text{TL}}^i(t) - P_{\text{ES}}^i(t) = U_i \sum_{j \in \Phi} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (21)$$

$$Q_G^i(t) + Q_W^i(t) + Q_S^i(t) - Q_{\text{IL}}^i(t) - Q_{\text{TL}}^i(t) - Q_{\text{ES}}^i(t) = U_i \sum_{j \in \Phi} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (22)$$

其中, Φ 为系统节点集合; U 、 θ 分别为节点电压、角角; G 、 B 为支路导纳参数; $Q_{\text{IL}}^i(t)$ 、 $Q_{\text{TL}}^i(t)$ 、 $Q_{\text{ES}}^i(t)$ 分别为 t 时刻节点 i 的可中断负荷、可转移负荷、储能单元无功功率; $P_G^i(t)$ 和 $Q_G^i(t)$ 、 $P_W^i(t)$ 和 $Q_W^i(t)$ 、 $P_S^i(t)$ 和 $Q_S^i(t)$ 分别为 t 时刻节点 i 所连发电机或连接上级网络的功率传输线上、节点 i 处风电机组、节点 i 处光伏阵列的有功和无功功率。

(2)功率上限约束。

$$P_G^i(t) \leq P_{G\max}^i \quad (23)$$

其中, $P_{G\max}^i$ 为发电机组或功率注入节点的功率上限。

(3)可转移负荷约束。

周期内的可转移负荷总量恒定,即:

$$\sum_{t=1}^T P_{\text{TL}}^i(t) = \sum_{t=1}^T P_{\text{TL}}^{i,\text{pre}}(t) \quad i \in \Phi_{\text{TL}} \quad (24)$$

(4)储能单元约束。

$$q_{\text{ESmin}}^i \leq q_{\text{ES}}^i(t) \leq q_{\text{ESmax}}^i \quad (25)$$

其中, $q_{\text{ES}}^i(t)$ 为 t 时刻节点 i 储能单元的电量,如式(26)所示; q_{ESmin}^i 、 q_{ESmax}^i 分别为节点 i 处储能单元的电量下限和上限。

$$q_{\text{ES}}^i(t) = q_{\text{ES}}^i(t-1) + P_{\text{ES}}^i(t) \eta_{\text{ES}}^i \Delta t \quad (26)$$

其中, η_{ES}^i 为节点 i 储能单元的充/放电效率。

$$|P_{\text{ES}}^i(t)| \leq P_{\text{ESmax}}^i \quad (27)$$

周期内的充放电电量相等,即:

$$\sum_{t=1}^T P_{\text{ES,dis}}^i(t) \Delta t = \sum_{t=1}^T P_{\text{ES,ch}}^i(t) \Delta t \quad (28)$$

其中, $P_{\text{ES,dis}}^i(t)$ 为储能单元处于放电状态时的功率; $P_{\text{ES,ch}}^i(t)$ 为储能单元处于充电状态时的功率。

(5)电压约束。

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (29)$$

其中, $U_{i,\min}$ 、 $U_{i,\max}$ 分别为节点 i 的电压下限、上限。

2 柔性模型求解与规划流程

2.1 模型求解

柔性规划模型求解的主要困难在于计算公式中包含的 max-min-max 问题, 约束中的潮流方程组和待求解的阶段、变量较多。针对以上问题, 本文提出简化计算的求解流程。流程分为三部分对 max-min-max 问题解耦^[4]: 将原问题转化为单层优化问题, 通过线性化处理简化潮流方程组的计算公式, 采用逆向搜索方法决策规划方案。

(1) max-min-max 问题解耦。

步骤 1: 确定最恶劣情况下的预测误差方向参数 α 、 β 。选用现状网架、功率预测参数, 且柔性指数取 0, 求解 0-1 整数规划问题如下:

$$\min_{\substack{y \in T(\alpha) \\ u \in T(\beta) \\ \{\alpha, \beta\}}} \max_{k \in I} h(u, y) \quad (30)$$

步骤 2: 假设不确定性参数 y 、控制变量 u 分别包含 a 个参数 α 、 b 个参数 β , 将式 (30) 所示模型中待求解变量的 2^{a+b} 种取值组合按照二进制编码规划排序。设置 $\max_{k \in I} h(u, y)$ 初值为 f_0 。

步骤 3: 采用改进隐枚举法求解。计算在当前组合 $\{\alpha, \beta\}$ 下, $\max_{k \in I} h(u, y) \leq f_0$ 是否成立。若不成立, 按次序更换下一组 $\{\alpha, \beta\}$ (例如 $\alpha_1 = 0$ 不成立, 则所有包含 $\alpha_1 = 0$ 的组合都不再计算) 并重复步骤 3; 若成立, 则转至步骤 4。

步骤 4: 检验当前组合 $\{\alpha, \beta\}$ 下 $g(u, y) = 0$ 与其他约束是否成立, 若不成立, 按次序更换下一组 $\{\alpha, \beta\}$ 重复步骤 3; 若成立, 则将当前 $\max_{k \in I} h(u, y)$ 的计算值赋给 f_0 , 重复步骤 3。遍历完所有的 $\{\alpha, \beta\}$ 序列后, 转至步骤 5。

步骤 5: 令最后一组满足以上步骤的 $\{\alpha, \beta\}$ 序列为要求的最优解, 构成最恶劣场景组合。在各阶段提取出的场景下, 原问题转化为:

$$\begin{aligned} & \max \mu \\ \text{s.t. } & \min_{\substack{y, u \\ \{x\}}} \max_{k \in I} h(x, u, y, \mu) \leq 0 \\ & g(x, u, y) = 0 \end{aligned} \quad (31)$$

(2) 规划方案决策。

综上, 式 (30) 所示的模型已经被求解, 针对求解阶段和变量较多的问题, 本文提出一种提高计算速度的逆向搜索方法。

步骤 1: 取远景规划网架 (所有规划线路全部建设) 为初始网架, 假设在第一阶段建成全部线路。计算对应的柔性指数初值 μ_0 (或取 0)。

步骤 2: 对于某一规划阶段, 在已有的网架基础上, 选定规划廊道, 研究删去该廊道一条规划线路的

网架, 计算目标柔性指数 μ 。

步骤 3: 若 $\mu \geq \mu_0$ 且 $\mu - \mu_0 \geq 10\% \mu_0$, 令 $\mu_0 = \mu$, 记录网架并继续在该廊道删去规划线路; 若 $\mu \geq \mu_0$ 但 $\mu - \mu_0 < 10\% \mu_0$, 令 $\mu_0 = \mu$, 记录网架并选定下一廊道; 若 $\mu < \mu_0$, 则不记录网架并选定下一廊道。然后转至步骤 2, 直至遍历所有廊道。

步骤 4: 得到该规划阶段的网架, 更新规划阶段至前一阶段。然后转至步骤 2, 直至遍历所有规划阶段。

模型求解流程图如附录中图 A1 所示。

2.2 规划流程

步骤 1: 依据历史预测误差资料或模型, 引入误差方向参数, 对源端的风电、光伏出力和荷端的常规负荷、灵活性资源等不确定变量建模。

步骤 2: 依据电价实时波动曲线和供求关系, 对可中断负荷、可转移负荷和储能单元等主动控制变量的特性建模。

步骤 3: 引入柔性指数, 对系统需满足的经济性、可靠性和安全性目标做柔性处理, 构成规划的柔性约束不等式, 并列其他约束。

步骤 4: 选定规划阶段和各规划阶段的规划周期。通常以划分 24 个时刻的典型日为基本周期。依据远景廊道和模型参数, 列出柔性规划模型的表达式。

步骤 5: 基于隐枚举法提取出各规划阶段的最恶劣场景。

步骤 6: 基于逆向搜索方法求解各规划阶段基本周期内最恶劣场景下的规划结果, 并得到规划方案。

步骤 7: 从柔性指数的规律性、规划方案的可行性和柔性规划的有效性三方面对方案的合理性和方法的有效性进行检验分析。

3 算例分析

3.1 系统简介与参数设置

算例选用某市局部的配电网系统与历史台账数据。系统参数和接线示意图分别如附录中表 A1 和表 A2、附录中图 A2 所示。现状网架 (实线) 包含 19 个节点、29 条线路。预计到远景年规划新增 10 条廊道、19 条线路 (虚线)。分未来 5、10、15、20 a 共 4 个规划阶段, 本文用柔性规划模型确定各阶段的网架规划方案。

选取各阶段内规划的基本周期为包含 24 个时刻的典型日。不同阶段的风电、光伏、系统总负荷与电价 $C(t)$ 的预测结果分别如附录中图 A3—A5 所示。系统中有风电接入节点 1 个、光伏接入节点 1 个、灵活性资源接入节点 3 个以及常规负荷节点 11 个。设置 13 个 α 值、3 个 β 值作为误差方向参数。廊

道单位长度线路建设成本 $c_l=100\,000$ 元/km, 贴现率 $r=10\%$; 上级电网至节点 1 处传输线所允许的有功、无功功率上限均为 10.0 p.u., $U_{i,\min}=0.95$ p.u., $U_{i,\max}=1.05$ p.u.。根据历史预测数据, 风电、光伏与负荷的最大预测误差分别取为历史均值的 12%、4.7% 和 2.3%。 $\alpha_{TL}(t)$ 服从期望为 0.5、标准差为 0.2 的正态分布。可中断负荷、可转移负荷的电价阈值取日电价均值。取 $a_{ES,\text{dis}}^i=1.59$ 、 $b_{ES,\text{dis}}^i=0$ 、 $a_{ES,\text{ch}}^i=-0.833$ 、 $b_{ES,\text{ch}}^i=0.626$ 、 $\eta_{ES}^i=0.85^{[7]}$ 、 $f_{E,\text{max}}=1\,000$ 万元、 $f_{E,\text{opt}}=500$ 万元; 各阶段 $f_{R,\text{max}}$ 均取 0.8 p.u., $f_{R,\text{opt}}=0.4$ p.u.; 除与节点 1 相连主要功率传输线外, 各条线路的 $P_{l,\text{opt}}$ 取极限输送功率的 45%。计算边界如附录中图 A3—A5 所示。

3.2 柔性指数的规律性

为探究柔性指数计算结果的分布规律, 令 $\mu_s(t) = \min\{\mu_E, \mu_{R,s}, \mu_{ES,i}(t)\}^{[19]}$ 。用插值的方法补充相邻阶段和相邻时刻内部的柔性指数, 得到计算结果如图 1 所示。

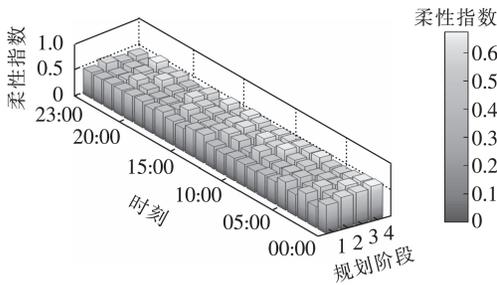


图 1 柔性指数计算结果

Fig.1 Calculative results of flexible index

由图 1 可见, 在不同阶段计算得到的柔性指数分布在 0.4~0.65; 从阶段 1 至阶段 4, 柔性指数呈上升趋势; 不同时刻下各阶段的柔性指数在一定数值水平附近小幅波动。

3.3 规划方案的可行性验证

柔性规划方案如附录中表 A3 所示。依据各阶段的场景组合和规划网架, 计算得到经济性、可靠性、安全性三方面的技术指标如表 1 所示。表中,

表 1 规划网架指标评估结果

Table 1 Evaluation results of planning network

指标	评估结果			
	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4
建设成本/万元	415.454 5	8.071 977	48.964	71.578 22
EDNS	0.533	0.523	0.471	0.446
电压偏移率/%	3.158	3.046	3.045	3.05
负荷需求	11.638 14	13.942 75	16.229 77	26.186 83
网损功率	0.92	1.097	1.099	1.197
风电出力	0.254 611	0.184 682	0.251 97	0.708 072
光伏出力	0.175 801	0.193 221	0.216 916	0.252 121
可再生能源发电占比/%	3.70	2.71	2.89	3.67

EDNS、负荷需求、网损功率、风电出力、光伏出力均为标么值。

选取在不同阶段部分线路的潮流计算结果, 对比示意图如附录中图 A6 所示。从建设成本上看, 网架建设集中在阶段 1, 考虑贴现率, 整个规划阶段的建设成本约为 544 万元。从供电可靠性上看, 不同阶段的 EDNS 指标呈下降趋势, 从阶段 1 至阶段 4, EDNS 指标降低了 16.3%, 理论可靠性有所提升; 电压偏移率小幅下降。随着负荷需求提升和网架建设, 网损功率相应增加, 但网损功率所占的比例由 8.0% 降低为 4.6%, 这表明系统网架的规划趋于合理。由在不同阶段线路的潮流计算结果可以看出, 随着网架建设不断推进, 线路的潮流分布状况趋于合理。其中, 线路 14—16 的潮流阻塞情况改观显著, 由阶段 1 至阶段 4, 线路上流过的有功潮流平均水平降低了 97.4%。少量线路上流过的潮流有所增加, 如线路 4—11、18—19 等。进一步地, 将柔性规划方案与确定性规划方案进行对比。将柔性约束改写为常规的不等式约束。确定性规划方案如附录中表 A3 所示。从经济性、可靠性和安全性 3 项技术目标比较柔性规划方案与确定性规划方案, 结果如表 2 和附录中图 A7 所示。表中, 可靠性目标为标么值。

表 2 柔性规划与确定性规划方案对比

Table 2 Comparison of flexible planning and deterministic planning

阶段	经济性目标/万元		可靠性目标	
	柔性规划	确定性规划	柔性规划	确定性规划
1	415.45	379.09	0.53	0.79
2	8.07	46.57	0.52	0.66
3	48.96	0	0.47	0.66
4	71.58	74.69	0.45	0.52

表 2 为柔性规划与确定性规划方案经济性和可靠性比较结果。由表 2 可见, 确定性规划以经济性最优为规划目标, 可靠性与安全性只满足不越限的要求, 确定性规划方案的新建线路条数少于柔性规划方案, 经济成本减少了 8.04%。相应地, 各阶段理论的平均缺供电力上升了 32.9%。附录中图 A7 为采用柔性规划方案和确定性规划方案规划完成后各廊道线路潮流均值和极限输送容量的示意图。从阶段 1 至阶段 4, 确定性规划在廊道 17 (节点 11 至节点 18) 共新建 3 条线路, 潮流 (廊道 17) 较柔性规划方案有明显改善, 其余线路的潮流普遍高于柔性规划方案。以廊道 1 为例, 确定性规划方案中该廊道线路上的潮流均值较极限容量仅有 2.23% 的裕度, 对于系统实际运行中可能出现的因负荷波动等引起的潮流上升等不确定情况的适应性不足。柔性规划考虑潮流向 45% 负载率的最优方向匹配, 较确定性规划的安全裕度更优。由此可见, 本例中柔性规划以牺

性一定的经济性为代价,给出可靠性与安全性适应性更优的方案。确定性规划给出的方案线路负载率较高,未来成为重载线路(如廊道1、廊道15)的风险较柔性规划更大。

3.4 柔性规划的有效性验证

为进一步说明柔性规划的有效性,将各阶段的风电、光伏和负荷实际功率曲线(如附录中图A8所示,与预测曲线基本吻合,局部点处的预测误差较大)作为场景边界对2种方法的规划方案进行验证。结果表明柔性规划方案在实际运行时均满足潮流不越限的要求,而确定性规划方案中某些线路、某些时刻潮流发生越限。以廊道16(节点9至节点10)单条线路为例,采用2种方法时各阶段线路通过的潮流如附录中图A9所示。从成因方面分析,柔性规划方案中规划建设的线路数量更多,如要求建设线路8-9,而确定性规划中无此要求。从方法本身的层面而言,柔性规划计算结果并非经济性最优,而是考虑并适应不确定性特征,计算得到一种更加贴近实际情况的综合“次优解”。

在实际规划中,输入边界是预测曲线,存在预测误差不可避免。综合优化经济性、安全性、可靠性,留有裕度的规划方案更能适应可再生能源机组等以一定规模接入的需求。以上分析表明,采用柔性规划降低了对输入边界预测精度的依赖程度,对不确定性造成的实际运行场景与规划场景偏差的适应性更好;如果某些时刻实际情况与规划所用的预测结果偏差较大,采用确定性规划则易于给出不满足实际运行要求的结果。

4 结论

本文针对不确定性和主动性变量日益增多背景下的DEP问题,通过对不确定性变量和主动控制变量建模,计及经济性、可靠性和安全性技术的要求,提出柔性规划模型用于确定网架规划方案。此外,本文提出简化计算的求解流程,使模型具有实际应用价值。得到以下的主要结论。

(1)柔性规划结果较理论最优解留有一定的裕度,能够给出贴合实际情况、更加合理的规划方案。柔性规划方法是一种对输入边界的不确定性特征(预测误差等)稳定性较好的规划方法,在源荷不确定性较强的主动配电网中,应用柔性规划模型具有必要性和指导作用。

(2)所提模型的柔性指数计算结果能够给出方案适应性水平的定量评估结果。随着规划阶段向后推移,规划方案的适应性提高,柔性指数水平相应提升。柔性指数为网架总体水平评估提供了参考。

(3)所提柔性规划模型求解流程包括问题解耦、简化潮流和逆向搜索3个步骤,通过算例说明了所

提方法的计算效率和实用性。

在可再生能源渗透率更高、配电网主动性更强的规划场合,如何合理修正模型的建模和求解过程,同时进一步说明柔性规划的有效性,将是笔者下一步的研究内容。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 肖定堃,王承民,曾平良,等. 考虑短时灵活性需求及资源调用成本的灵活性资源优化调度[J]. 华东电力,2014,42(5):809-815.
XIAO Dingyao,WANG Chengmin,ZENG Pingliang,et al. Flexible resource optimization scheduling considering the short-term flexibility requirements and resource call costs[J]. East China Electric Power,2014,42(5):809-815.
- [2] 徐芮,刘俊勇,刘友波,等. 考虑负荷聚类分区与分布式发电接入的配电网主次网架规划方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):48-55.
XU Rui,LIU Junyong,LIU Youbo,et al. Primary and secondary grid planning method for distribution network considering load clustering partition and distributed generation access[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):48-55.
- [3] 康重庆,姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化,2017,41(9):2-11.
KANG Chongqing,YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(9):2-11.
- [4] 张刘冬,袁宇波,孙大雁. 基于两阶段鲁棒区间优化的风储联合运行调度模型[J]. 电力自动化设备,2018,38(12):65-72.
ZHANG Liudong,YUAN Yubo,SUN Dayan. Wind-storage joint operation scheduling model based on two-stage robust interval optimization[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(12):65-72.
- [5] BIRGE J R,LOUVEAUX F. Introduction to stochastic programming[M]. New York,USA:Springer,1997:12-35.
- [6] 王婷婷,白晓清,李佩杰. 计及可再生资源不确定性的配电网鲁棒最优潮流[J]. 电力自动化设备,2018,38(12):59-66.
WANG Tingting,BAI Xiaqing,LI Peijie. Robust optimal power flow of distribution network considering uncertainty of renewable power sources[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(12):59-66.
- [7] 孙伟卿. 智能电网规划与运行控制的柔性评价及分析方法[D]. 上海:上海交通大学,2013.
SUN Weiqing. Flexible evaluation and analysis method for smart grid planning and operation control[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University,2013.
- [8] MONTOYA-BUENO S,MUNOZ J I,CONTRERAS J. A stochastic investment model for renewable generation in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2015,6(4):1466-1474.
- [9] MUNOZ-DELGADO G,CONTRERAS J,ARROYO J M. Investment generation and network expansion planning in distribution systems considering uncertainty and reliability[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2016,31(5):3715-3728.
- [10] ABAPOUR S,ZARE K,MOHAMMADI-IVATLOO B. Dynamic planning of distributed generation units in active distribution network[J]. IET Generation,Transmission & Distribution,2015,9(12):1455-1463.

- [11] 张旭东,王昊婧,武庚,等. 考虑电价不确定性的主动配电网网损成本鲁棒优化模型[J]. 电力自动化设备,2017,37(9):131-138.
ZHANG Xudong,WANG Haojing,WU Wei,et al. Robust optimization model for network loss cost of active distribution network considering uncertainty of electricity price [J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(9):131-138.
- [12] YUAN W,WANG J,QIU F,et al. Robust optimization-based resilient distribution network planning against natural disasters [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2016,7(6):1-10.
- [13] WANG Z,CHEN B,WANG J,et al. Robust optimization based optimal DG placement in microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2014,5(5):2173-2182.
- [14] 程浩忠,范宏,翟海保. 输电网柔性规划研究综述[J]. 电力系统及其自动化学报,2007,19(1):21-27.
CHENG Haozhong,FAN Hong,ZHAI Haibao. Review of transmission network flexible planning[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2007,19(1):21-27.
- [15] AHMADIGORJI M,AMJADY N,DEHGHAN S. A novel two-stage evolutionary optimization method for multiyear expansion planning of distribution systems in presence of distributed generation[J]. Applied Soft Computing,2017,52:1098-1115.
- [16] AHMADIGORJI M,AMJADY N. Optimal dynamic expansion planning of distribution systems considering non-renewable distributed generation using a new heuristic double-stage optimization solution approach[J]. Applied Energy,2015,156:655-665.
- [17] HALEMANE K P,GROSSMANN I E. Optimal process design under uncertainty[J]. AIChE Journal,1983,29(3):425-433.
- [18] 程浩忠,陈章潮,傅正财,等. 城市电网规划与改造[M]. 北京:中国电力出版社,2015:48-49.
- [19] 张晓花,赵晋泉,陈星莺. 节能减排多目标机组组合问题的模糊建模及优化[J]. 中国电机工程学报,2010,30(22):71-76.
ZHANG Xiaohua,ZHAO Jinquan,CHEN Xingying. Fuzzy modeling and optimization of multi-objective unit combination problem for energy saving and emission reduction[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(22):71-76.

作者简介:



蔡佳铭

蔡佳铭(1994—),男,江苏盐城人,硕士,主要研究方向为高占比可再生能源消纳(E-mail:1026618188@sjtu.edu.cn);

张涛(1970—),男,山西太原人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统经济运行(E-mail:zhuguan104@163.com);

王承民(1970—),男,辽宁大连人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统规划与经济运行(E-mail:wangchengmin@sjtu.edu.cn)。

Flexible planning of active distribution network expansion considering source and load uncertainty

CAI Jiaming¹,ZHANG Tao²,WANG Chengmin¹,XIE Ning¹,ZHU Binruo³

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering,Shanghai Jiao Tong University,Shanghai 201100,China;

2. State Grid Shanxi Electric Power Company,Taiyuan 030001,China;

3. State Grid Shanghai Electric Power Company Electric Power Research Institute,Shanghai 200437,China)

Abstract:In the background of uncertain variables and initiative at source and load ends increasing in distribution network,thus the research of grid planning adapted to the development is of great significance. The uncertain variables and active control variables in the system are modeled respectively,the flexible methods dealing with the technical goals of economy,reliability and security are applied,and the flexible planning model of active distribution network expansion taking the source and load uncertainty into account is proposed. The solution flowchart that contains problem decoupling,simplifying flow and reverse searching is proposed. Taking the 19-bus system as an example,the results demonstrate the proposed flexible planning model and method are effective and feasible to solve the network expansion planning problem.

Key words:active distribution network;source and load uncertainty;network expansion;flexible planning

附录

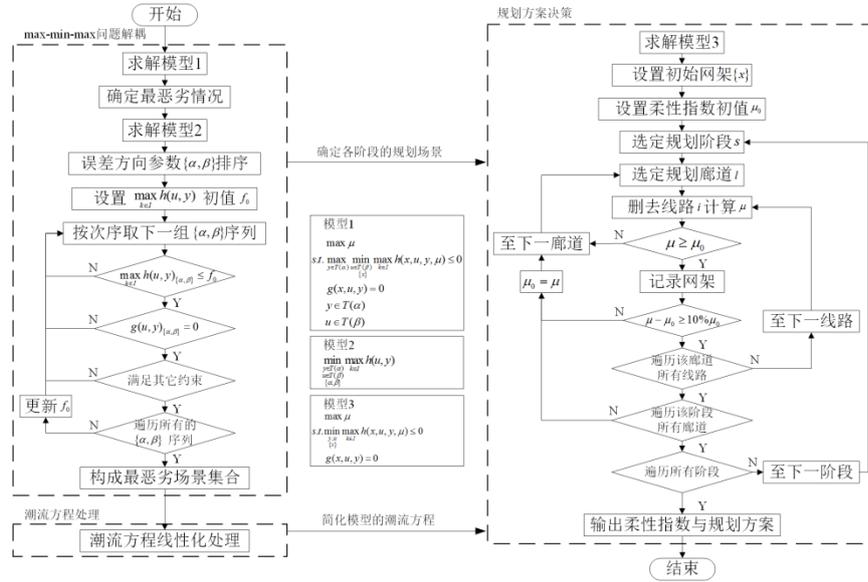


图 A1 柔性模型求解流程

Fig.A1 Flexible model solution process

表 A1 系统廊道与线路参数

Table A1 System corridor and line parameters

编号	起节点	终节点	线路长度/km	线路截面	极限输送容量/MW
1	4	9	2.6	YJV22-400	15.31
2	4	7	3.4	JKLYJ-185	7.85
3	4	10	3.3	JKJYL-240	7.85
4	4	11	5.7	JKJYL-240	8.13
5	4	12	4.4	YJV22-400	23.47
6	4	14	4.5	YJV22-400	23.47
7	4	15	4.8	JKJYL-240	7.85
8	4	5	8.7	JKJYL-240	10.31
9	5	16	1.3	JKJYL-240	4.51
10	5	17	4.3	JKJYL-240	7.85
11	5	18	2.3	JKJYL-240	5.41
12	6	7	6.2	JKLYJ-185	9.93
13	7	8	6.2	JKLYJ-185	9.93
14	8	9	4.3	JKLYJ-185	9.93
15	8	10	4.4	YJV22-400	23.47
16	9	10	8.4	LGJ-150	6.76
17	11	18	15.6	LGJ-150	10.31
18	12	13	6.4	YJV22-400	26.53
19	12	14	5.6	JKLYJ-185	9.93
20	14	15	4.5	LGJ-150	5.64
21	14	16	4.3	LGJ-150	5.64
22	18	19	2.3	YJV22-400	23.31
23	14	18	10	JKJYL-240	8.51

表 A2 系统电源与负荷参数
Table A2 Source and load parameters

接入位置	接入类型	接入容量/MW			
		阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4
节点 2	光伏	74.90	78.65	86.51	129.76
节点 3	风电	110.30	115.82	127.40	191.09
节点 8	可中断负荷	19.96	20.96	23.05	46.11
节点 13	可转移负荷	7.08	7.43	8.18	16.35
节点 19	储能单元	19.10	20.06	22.06	44.12

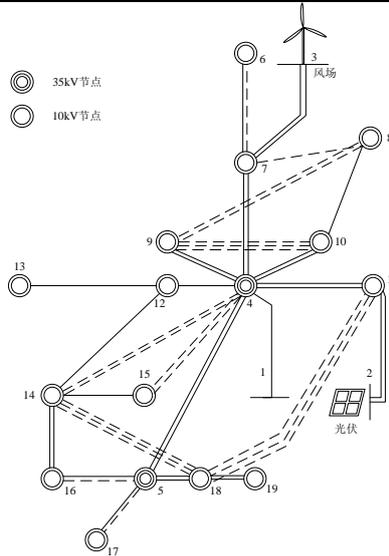


图 A2 系统结构与廊道规划示意

Fig.A2 System structure and corridor planning

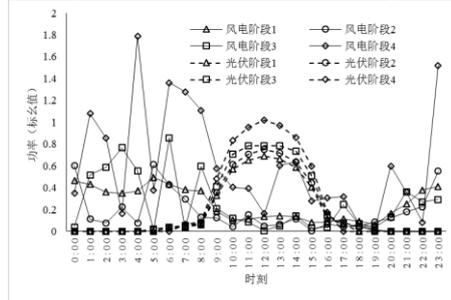


图 A3 风电、光伏出力预测结果

Fig.A3 Forecast power of wind and PV

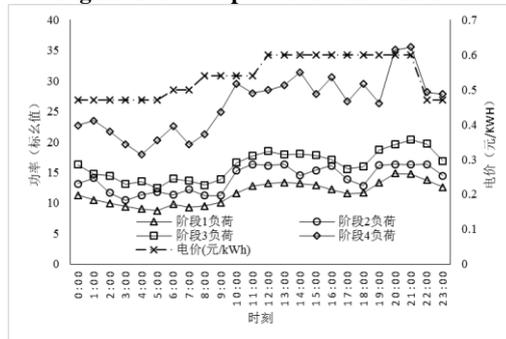


图 A4 负荷、电价预测结果

Fig.A4 Forecast price of load and electricity

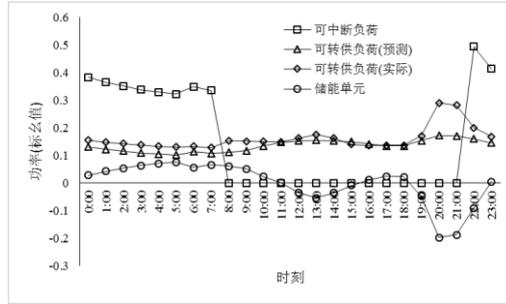


图 A5 部分节点出力计算结果示意

Fig.A5 Output power calculation results of partial lines

表 A3 柔性规划与确定性规划方案

Table A3 Flexible planning and deterministic planning scheme

规划阶段	柔性规划
阶段 1	节点 4-节点 14、节点 4-节点 15、节点 6-节点 7、节点 7-节点 8、节点 9-节点 10、节点 11-节点 18 线路
阶段 2	节点 5-节点 16 线路
阶段 3	节点 5-节点 17、节点 9-节点 10 线路
阶段 4	节点 8-节点 9、节点 11-节点 18、节点 14-节点 18 线路
规划阶段	确定性规划
阶段 1	节点 4-节点 14、节点 4-节点 15、节点 9-节点 10、节点 9-节点 10 线路、节点 11-节点 18 线路
阶段 2	节点 5-节点 16 线路、节点 7-节点 8
阶段 3	/
阶段 4	节点 11-节点 18、节点 11-节点 18

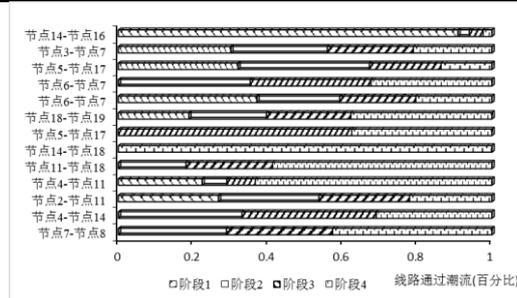


图 A6 部分线路的潮流分布

Fig.A6 Power flow distribution of partial lines

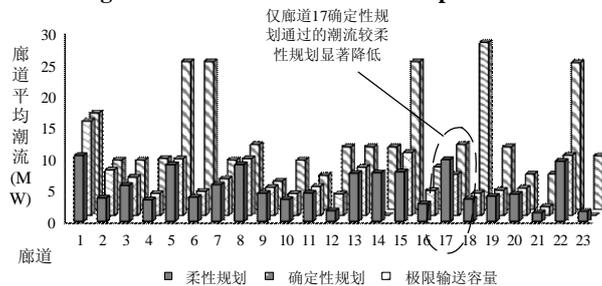
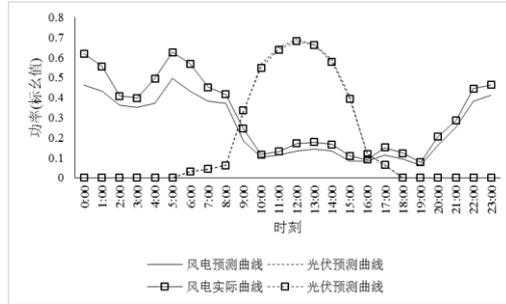
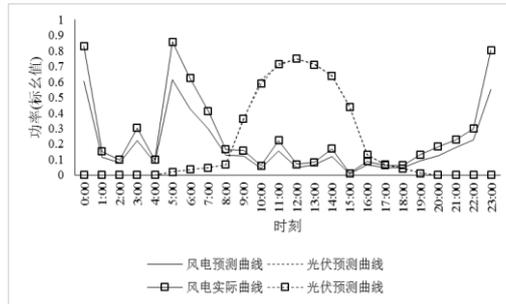


图 A7 廊道线路潮流均值与极限容量示意

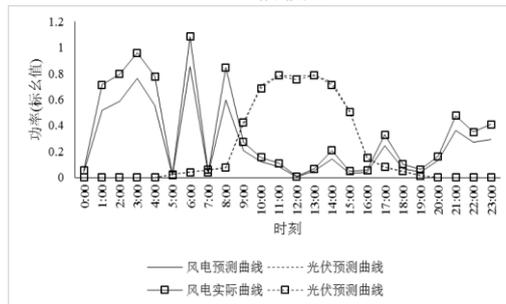
Fig.A7 Average value and limit capacity of corridor line flow



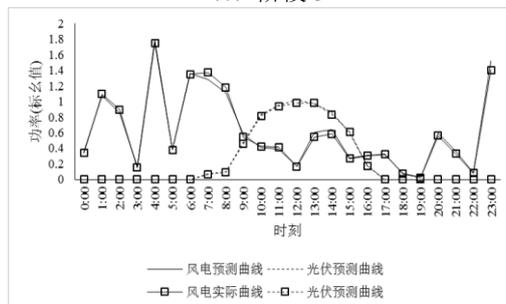
(a) 阶段 1



(b) 阶段 2

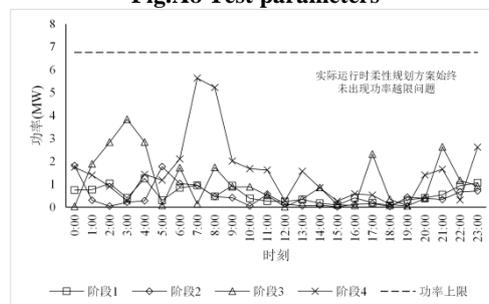


(c) 阶段 3

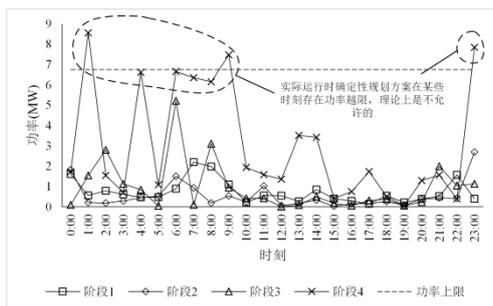


(d) 阶段 4

图 A8 检验参数
Fig.A8 Test parameters



(a) 柔性规划



(b) 确定性规划

图 A9 廊道 16 单条线路通过潮流计算结果
Fig.A9 Power flow of single line in Corridor 16