

三相不平衡有源配电网鲁棒动态重构

吴在军¹, 成 晟¹, 朱承治², 徐俊俊¹, 窦晓波¹, 顾 伟¹

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏省南京市 210096; 2. 国网浙江省电力有限公司, 浙江省杭州市 310007)

摘要: 考虑配电网的三相不平衡运行和注入功率不确定性可以提高网络重构方案的优化效果和应用价值。首先, 对考虑不确定性的分布式电源和负荷注入功率进行仿射数建模, 划分重构时段, 以有功网损最优为目标函数, 基于三相 Distflow 潮流方程建立含不确定性预算的配电网两阶段鲁棒动态重构数学模型。为高效求解该模型, 引入最佳等距分段线性逼近法对模型进行精度可控的线性松弛, 并使用列约束生产算法迭代求解。采用标准化配电测试系统验证所提鲁棒动态重构模型的可行性和有效性, 通过控制不确定性预算可进一步调节重构方案的保守性和鲁棒性。

关键词: 三相不平衡; 分布式电源; 不确定性预算; 鲁棒动态重构; 列约束生产算法

0 引言

随着可再生能源技术的快速发展, 以风电和光伏为主的大量分布式电源 (distributed generator, DG) 接入配电网, 可有效提高配电网的供电可靠性^[1-3]。但其灵活接入特点及其出力间歇性和波动性将大大增加配电网运行的不确定性, 传统配电网重构技术面临巨大挑战^[4-5]。为此, 需要在对配电网合理建模的基础上考虑 DG 和负荷注入功率的不确定性对重构的影响, 从而提高配电网运行的安全性与经济性。

中低压配电网普遍存在三相线路参数不对称、负荷不平衡的现象, 并且线路电阻与电抗数值相近, 传统的有功无功解耦模型难以应用, 因此有必要建立三相潮流模型进行配电网重构等优化问题研究^[6-7]。文献[8]提出了一种基于叠加原理求解少环配电网三相潮流的方法, 将少环配电网分解后分别用回推前推法和回路电流法计算三相潮流, 叠加并迭代求解配电网三相潮流。文献[9]基于 π 型等效电路建立了三相不平衡配电网节点注入功率数学模型, 以网损最优和 DG 运行费用最低为目标函数求解最优重构方案。文献[10]采用一种两步迭代的阶梯方法计算三相不平衡配电网的节点电压和注入电流, 并提出电压不平衡率指标。文献[11]基于

Distflow 潮流方程建立三相不平衡配电网数学模型, 以网损最优和电压偏差最小为目标函数, 利用线性规划求解三相不平衡配电网重构问题。

目前, 考虑不确定性因素的配电网重构模型主要分为概率模型^[12]、模糊模型^[13-14]和鲁棒模型^[15-16]。文献[12]建立了以系统网损最小为目标, 以机会约束描述节点电压和支路潮流约束的配电网重构随机优化模型, 并采用基于拉丁超立方采样的蒙特卡洛法随机潮流进行检验, 使用并行遗传算法求解。文献[13]建立了考虑负荷不确定性的模糊重构模型, 将等式约束转化为模糊表达式, 并根据可信性测度建立负荷的隶属度函数。文献[14]采用梯形模糊参数表示节点负荷接入量, 将确定性的约束条件改为模糊参数下的机会约束, 引入模糊量化负荷的不确定性, 建立配电网恢复重构数学模型。相比于概率和模糊模型, 鲁棒模型无需获得参数的先验具体分布情况和隶属度函数, 只需获得不确定变量的上下界信息即可, 故工程应用价值更大^[17]。文献[15]建立了三相平衡配电网静态鲁棒重构模型, 并使用分段线性化对二次项进行线性松弛, 在此基础上采用主问题、子问题分解迭代求解重构方案。文献[16]针对辐射状配电网中负荷不确定性建立了两阶段鲁棒重构模型并转化为二阶锥规划模型, 采用列约束生产算法分解求解。以上鲁棒重构模型均能取得预想效果, 但未考虑有源配电网三相不平衡运行, 此外没有考虑 DG 的波动性和负荷的时变性, 属于静态重构。

本文在已有工作的线性化模型^[11]基础上, 主要

收稿日期: 2018-04-27; 修回日期: 2018-07-05。

上网日期: 2018-12-10。

国家自然科学基金资助项目(51677025); 国家电网公司科技项目(52110417000A)。

考虑含不确定性的三相不平衡运行配电网重构问题。以有功网损最优为目标函数,考虑 DG 和负荷注入功率的不确定性并进行仿射数建模,对一天内的时段进行合理划分,基于三相 Distflow 潮流方程建立含不确定性预算的配电网两阶段鲁棒动态重构模型。为提高求解效率,引入最佳等距思想的分段线性逼近法将模型松弛为精度可控的线性可解形式,利用列约束生产算法转化两阶段鲁棒问题并进行迭代求解,使用标准化配电测试系统验证了鲁棒动态重构模型的有效性,并通过控制不确定性预算调整鲁棒动态重构方案的保守性和鲁棒性。

1 考虑不确定性的功率建模

1.1 风力发电系统

风电机组一天内出力的间歇性主要由当地风速变化造成,通过对风速进行合理预测,可以得到风电机组有功功率 P_w 的预测值与风速之间的函数关系如下^[18]:

$$\bar{P}_w = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_i \text{ 或 } v_o \leq v \\ P_w \frac{v - v_i}{v_r - v_i} & v_i < v \leq v_r \\ P_r & v_r < v < v_o \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_r 为风力发电机组的额定输出功率; \bar{P}_w 为基于风速模型的有功功率预测值; v, v_i, v_r, v_o 分别为风速预测值、切入风速、额定风速和切出风速。

考虑风电机组出力的不确定性后,有功功率值仿射数形式^[19]可表示如下:

$$\tilde{P}_w = \bar{P}_w + \hat{P}_w \epsilon_w \quad (2)$$

式中: \tilde{P}_w 为考虑不确定性的风电机组有功功率值; \hat{P}_w 为风电波动系数,即相对预测值的最大偏差; ϵ_w 为风电波动程度,反映有功功率偏离预测值的程度。

1.2 光伏发电系统

光伏发电系统有功出力易受当地光照强度影响,根据光照强度预测值可以得到光伏发电系统的有功功率预测值 \bar{P}_{pv} 为^[20]:

$$\bar{P}_{pv} = e \sum_{m=1}^M A_m \eta_m = eA\eta \quad (3)$$

式中: e 为时段内的光照强度预测值; M 为光伏电池板总数; A_m 和 η_m 分别为第 m 个电池板的面积和光电转换效率。

同样考虑光伏发电功率的不确定性,有功功率值的仿射数表达形式为:

$$\tilde{P}_{pv} = \bar{P}_{pv} + \hat{P}_{pv} \epsilon_{pv} \quad (4)$$

式中: \tilde{P}_{pv} 为考虑不确定性的光伏系统有功功率值;

\bar{P}_{pv} 为基于光照模型的有功功率预测值; \hat{P}_{pv} 为光伏波动系数,即相对预测值的最大偏差; ϵ_{pv} 为光伏波动程度,反映有功功率偏离预测值的程度。

目前,配电网稳态分析过程中 DG 大多采用 PQ 控制方式^[21],即根据给定的功率因数和有功功率即可相应计算出风电机组以及光伏发电的无功功率。

1.3 常规负荷

采用 IEEE-RTS 的夏日负荷需求曲线进行标么化处理,得到本文配电网负荷预测的标么化曲线,选择标准配电系统给定的负荷值作为基准值,得到系统的日负荷曲线,考虑节点负荷需求不确定性后,仿射数表达形式如下:

$$\tilde{P}_L = \bar{P}_L + \hat{P}_L \epsilon_L \quad (5)$$

式中: \tilde{P}_L 为考虑不确定性的负荷有功功率值; \bar{P}_L 为负荷有功功率预测值; \hat{P}_L 为负荷波动系数,即相对预测值的最大偏差; ϵ_L 为负荷波动程度,反映有功功率偏离预测值的程度。

2 配电网鲁棒动态重构模型与求解

2.1 重构时段划分

本文综合考虑一天内的 DG 和负荷的变化情况,采用文献^[22]的时段划分方法,将每天 24 个时刻划分为 24 个时段,各时段负荷和 DG 出力的取值为时段起始时刻数值,重构频率为每 6 个时段一次,即每天最多重构 4 次。通过在日前对下一日的有功网损优化计算得到最优的开关动作方案,具体决策步骤如图 1 所示。

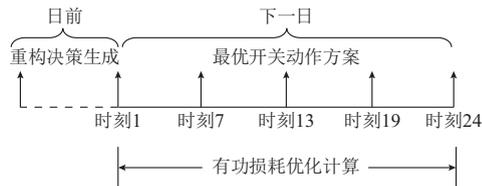


图 1 动态重构决策示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dynamic reconstruction decision

2.2 鲁棒动态重构数学模型

实际工程中为了保护整定和减小短路电流,一般要求配电网尽量呈辐射状运行,因此需要选择适用于辐射状配电网计算的潮流方程。本文基于具有递归特性的 Distflow 支路潮流方程组^[23]来描述辐射状网络中的潮流。为考虑注入功率的不确定性,对于辐射状运行的三相不平衡配电网,其改进的 Distflow 支路潮流方程形式如下。

对于时段 t 线路中的节点 j ,有

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{i \in m(j)} \left[P_{ij}^{\phi,t} - r_{ij}^{\phi} \frac{(P_{ij}^{\phi,t})^2 + (Q_{ij}^{\phi,t})^2}{(V_i^{\phi,t})^2} \right] &= \sum_{k \in n(j)} P_{jk}^{\phi,t} + P_j^{\phi,t} \\ \sum_{i \in m(j)} \left[Q_{ij}^{\phi,t} - x_{ij}^{\phi} \frac{(P_{ij}^{\phi,t})^2 + (Q_{ij}^{\phi,t})^2}{(V_i^{\phi,t})^2} \right] &= \sum_{k \in n(j)} Q_{jk}^{\phi,t} + Q_j^{\phi,t} \\ P_j^{\phi,t} &= \tilde{P}_{j,DG}^{\phi,t} - \tilde{P}_{j,L}^{\phi,t} \\ Q_j^{\phi,t} &= \tilde{Q}_{j,DG}^{\phi,t} - \tilde{Q}_{j,L}^{\phi,t} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

对于时段 t 支路 ij , 有

$$(V_i^{\phi,t})^2 - (V_j^{\phi,t})^2 = 2(P_{ij}^{\phi,t} r_{ij}^{\phi} + Q_{ij}^{\phi,t} x_{ij}^{\phi}) - [(r_{ij}^{\phi})^2 + (x_{ij}^{\phi})^2] \frac{(P_{ij}^{\phi,t})^2 + (Q_{ij}^{\phi,t})^2}{(V_i^{\phi,t})^2} \quad (7)$$

式中: $\phi \in \{A, B, C\}$; $P_{ij}^{\phi,t}$ 和 $Q_{ij}^{\phi,t}$ 分别为支路 ij 首端的 ϕ 相有功功率和无功功率; $m(j)$ 为配电网中以节点 j 为末端节点的支路的首端节点集合; $n(j)$ 为配电网中以 j 为首端节点的支路的末端节点集合; $V_i^{\phi,t}$ 为节点电压幅值; $P_j^{\phi,t}$ 和 $Q_j^{\phi,t}$ 分别为节点 j 的有功功率和无功功率净注入量; $\tilde{P}_{j,DG}^{\phi,t}$ 和 $\tilde{Q}_{j,DG}^{\phi,t}$ 分别为式(2)和式(4)形式的 DG 有功和无功功率值; $\tilde{P}_{j,L}^{\phi,t}$ 和 $\tilde{Q}_{j,L}^{\phi,t}$ 分别为式(5)形式的负荷有功和无功功率值; r_{ij}^{ϕ} 和 x_{ij}^{ϕ} 分别为考虑配电网 ϕ 相线路自阻抗和互阻抗的支路电阻和电抗。

基于以上 Distflow 支路潮流方程, 选择网损最优作为目标函数建立考虑 DG 和负荷不确定性的三相不平衡动态重构数学模型, 目标函数如下:

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{\phi} \sum_{ij \in N_{NL}} r_{ij}^{\phi} \frac{(P_{ij}^{\phi,t})^2 + (Q_{ij}^{\phi,t})^2}{(V_i^{\phi,t})^2} \Delta d_t \quad (8)$$

式中: T 为时段数; N_{NL} 为网络支路集合; Δd_t 为第 t 个时段长度。

各时段具体的约束条件如下。

1) 节点有功功率和无功功率注入平衡约束, 见式(6)。

2) 支路潮流电压方程约束条件, 见式(7)。

3) 配电网安全运行节点电压上下限约束条件:

$$V_i^{\phi,L,t} \leq V_i^{\phi,t} \leq V_i^{\phi,U,t} \quad (9)$$

式中: $V_i^{\phi,L,t}$ 和 $V_i^{\phi,U,t}$ 分别为时段 t 节点 i 电压下限和上限取值。

4) 配电网安全运行支路功率上下限约束条件:

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha_{ij}^t P_{ij}^{\phi,L,t} &\leq P_{ij}^{\phi,t} \leq \alpha_{ij}^t P_{ij}^{\phi,U,t} \\ \alpha_{ij}^t Q_{ij}^{\phi,L,t} &\leq Q_{ij}^{\phi,t} \leq \alpha_{ij}^t Q_{ij}^{\phi,U,t} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

式中: $P_{ij}^{\phi,L,t}$ 和 $P_{ij}^{\phi,U,t}$ 分别为时段 t 支路 ij 有功功率

下限和上限取值; $Q_{ij}^{\phi,L,t}$ 和 $Q_{ij}^{\phi,U,t}$ 分别为时段 t 支路 ij 无功功率下限和上限取值; α_{ij}^t 为线路开关状态量。

5) 考虑不确定性预算的功率波动约束:

$$\left\{ \begin{aligned} \tilde{P}_{j,DG}^{\phi,t} &\in [\bar{P}_{j,DG}^{\phi,t} - \hat{P}_{j,DG}^{\phi,t}, \bar{P}_{j,DG}^{\phi,t} + \hat{P}_{j,DG}^{\phi,t}] \\ \tilde{Q}_{j,DG}^{\phi,t} &\in [\bar{Q}_{j,DG}^{\phi,t} - \hat{Q}_{j,DG}^{\phi,t}, \bar{Q}_{j,DG}^{\phi,t} + \hat{Q}_{j,DG}^{\phi,t}] \\ \tilde{P}_{j,L}^{\phi,t} &\in [\bar{P}_{j,L}^{\phi,t} - \hat{P}_{j,L}^{\phi,t}, \bar{P}_{j,L}^{\phi,t} + \hat{P}_{j,L}^{\phi,t}] \\ \tilde{Q}_{j,L}^{\phi,t} &\in [\bar{Q}_{j,L}^{\phi,t} - \hat{Q}_{j,L}^{\phi,t}, \bar{Q}_{j,L}^{\phi,t} + \hat{Q}_{j,L}^{\phi,t}] \\ \sum_{k \in n(j)} |\epsilon_{j,DG}^{\phi,t}| &\leq \Gamma_{DG} \sqrt{N_{DG}} \\ \sum_{k \in n(j)} |\epsilon_{j,L}^{\phi,t}| &\leq \Gamma_L \sqrt{N_L} \end{aligned} \right. \quad (11)$$

式中: 上标“ $-$ ”和“ $+$ ”分别表示预测量和波动量; $\epsilon_{j,DG}^{\phi,t}$ 和 $\epsilon_{j,L}^{\phi,t}$ 分别为 DG 和负荷的波动程度; Γ_{DG} 和 Γ_L 分别为 DG 和负荷功率不确定性预算控制参数, $\Gamma_{DG}, \Gamma_L \in [0, 1]$; N_{DG} 为 DG 接入节点数量; N_L 为负荷接入节点数量。

不确定性预算是一种通过定量方式描述并控制优化过程中不确定因素波动程度以调整保守性的参数, 最后两个不等式约束分别为所有波动 DG 和负荷功率偏离预测值程度之和的预算上限约束^[24], 用于定量控制各时段 DG 和负荷功率的总体最大偏差程度。若 $\Gamma_{DG} = \Gamma_L = 0$, 则 DG 和负荷功率值等于预测值, 为确定值; 随着预算控制参数的增大, 则功率波动增加, 不确定集合扩大。

6) 开关操作次数约束:

$$\sum_{t=2}^T \sum_{ij \in N_{NL}} (\alpha_{ij}^t - \alpha_{ij}^{t-1})^2 \leq N_s \quad (12)$$

式中: N_s 为总开关操作次数上限。

7) 网络辐射状运行约束条件。辐射状配电网络与生成树具有十分相似的特性^[25], 结合该特性建立如下辐射状网络约束:

$$\beta_{ij}^t + \beta_{ji}^t = \alpha_{ij}^t \quad i=1, 2, \dots, n; j \in N(i) \quad (13)$$

$$\sum_{j \in N(i)} \beta_{ij}^t = 1 \quad i=2, 3, \dots, n \quad (14)$$

$$\beta_{1j}^t = 0 \quad j \in N(1) \quad (15)$$

$$\beta_{ij}^t \in \{0, 1\} \quad i=1, 2, \dots, n; j \in N(i) \quad (16)$$

$$0 \leq \alpha_{ij}^t \leq 1 \quad (17)$$

式中: β_{ij}^t 为生成树的父子节点关系变量, 当节点 j 是节点 i 的父节点时 $\beta_{ij}^t = 1$, 反之 $\beta_{ij}^t = 0$; $N(i)$ 为跟节点 i 具有支路连接关系的节点集合。

式(13)表明当支路 ij 连接时, 必有一个节点是另一个节点的父节点; 式(14)则表明节点 i 只存在一个父节点; 式(15)表明源节点 1 不是任何节点的

父节点。

2.3 模型线性化

由于重构模型中存在二次项,因此是混合整数非凸非线性优化问题,尽管可用非线性规划工具包进行求解,但难以保证其全局最优性。为提高重构模型的求解效果,同时能够进一步确保线性化后模型的精确性,本文对所提重构模型采用文献[11]的最佳等距分段线性逼近法等进行等效线性化处理,将目标函数中的支路有功和无功功率线性表示为分段一次函数相加的形式,具体原理见附录 A。需要注意的是,分段线性化变量被限制为非负,而实际中当系统潮流与假定潮流正方向相反时,潮流值为负值,与设定不符。本文引入非负辅助变量^[11]处理该反向潮流问题。

至此,本文建立的三相不平衡配电网动态重构模型转化为混合整数线性规划模型,约束条件也均为线性条件,决策变量为配电网各开关状态。目标函数如下:

$$\min F = \sum_{t=1}^T \sum_{\phi} \sum_{ij \in N_{NL}} r_{ij}^{\phi} \left(\sum_{u \in \Omega_u} a_{ij}^{u, \phi, t} P_{ij}^{u, \phi, t} + \sum_{v \in \Omega_v} b_{ij}^{v, \phi, t} Q_{ij}^{v, \phi, t} \right) \Delta d_t \quad (18)$$

式中: a 和 b 分别为有功功率和无功功率分段函数各个断面上线性函数的斜率; u 和 v 分别为 $(P_{ij}^{\phi, t})^2$ 和 $(Q_{ij}^{\phi, t})^2$ 各断面数编号, Ω_u 和 Ω_v 为对应的分段后的断面数集合。

观察上述线性重构模型可以发现,式(11)的不确定集是一个多面体有界集合,不确定变量在该有界集合内任意变化时,需要始终保证优化重构方案的可行性。因此,本文选择鲁棒优化方法处理上述考虑不确定性的配电网动态重构模型,将上述重构模型写成两阶段鲁棒模型的形式,如式(19)所示。

$$\min \left(\max_{\epsilon_w, \epsilon_{pv}, \epsilon_L \in \Theta} \left(\min_{a_{ij}^{\phi, t}, \beta_{ij}^{\phi, t} \in \Delta} F \right) \right) \quad (19)$$

式中: Δ 为满足辐射状约束的拓扑解集; Θ 为不确定集; Π 为满足潮流和节点注入等运行约束的状态变量解集。

2.4 鲁棒问题转化与求解

根据建立的两阶段鲁棒优化模型可知,外层决策变量是线路开关状态,为离散变量;内层决策变量为 DG 和负荷的波动程度,为连续变量。从数学形式上分析可知,鲁棒重构模型为大规模组合优化问题,一般可采用分解算法求解。当网络拓扑一定时,该问题可以转化为求解含 DG 和负荷不确定性的最优潮流问题。原不确定性鲁棒问题可转化为两个部分,第一部分为基于当前拓扑结构计算不确定情况

下波动最恶劣时的最优网损,第二部分为获得上述所有拓扑结构下的最小网损拓扑结构。本文采用计算效率和求解性能均较优的列约束生产(C&CG)算法^[26]进行交替迭代求解,将式(19)所述的鲁棒重构问题分解为主问题和子问题。

主问题:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \eta \\ \text{s. t.} \quad \eta \geq \sum_{t=1}^T \sum_{\phi} \sum_{ij \in N_{NL}} r_{ij}^{\phi} \left(\sum_{u \in \Omega_u} a_{ij}^{u, \phi, t} P_{ij}^{u, \phi, t} + \sum_{v \in \Omega_v} b_{ij}^{v, \phi, t} Q_{ij}^{v, \phi, t} \right) \Delta d_t \\ \sum_{i \in m(j)} P_{ij}^{\phi, t} = \sum_{k \in n(j)} P_{jk}^{\phi, t} + P_{j, DG}^{\phi, t, S} - P_{j, L}^{\phi, t, S} \\ \sum_{i \in m(j)} Q_{ij}^{\phi, t} = \sum_{k \in n(j)} Q_{jk}^{\phi, t} + Q_{j, DG}^{\phi, t, S} - Q_{j, L}^{\phi, t, S} \end{array} \right. \quad \text{式(7)、式(9)、式(10)、式(12)一式(17)} \quad (20)$$

式中: $P_{j, DG}^{\phi, t, S}, Q_{j, DG}^{\phi, t, S}, P_{j, L}^{\phi, t, S}, Q_{j, L}^{\phi, t, S}$ 分别为由子问题求解获得的最恶劣波动情况下的 DG 和负荷的有功功率和无功功率。

主问题是在满足电压潮流方程、支路电压容量极值、开关次数以及辐射状运行等约束条件下决策出网络中所有开关的状态以最小化网络运行损耗,通过枚举出各个节点注入功率不确定性集合中有限个可能的波动场景,使得主问题的约束条件中不确定集合用部分枚举场景替代,由此可知主问题即为单一优化目标形式的混合整数线性规划问题。

子问题:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max \left(\min \sum_{t=1}^T \sum_{\phi} \sum_{ij \in N_{NL}} r_{ij}^{\phi} \left(\sum_{u \in \Omega_u} a_{ij}^{u, \phi, t} P_{ij}^{u, \phi, t} + \sum_{v \in \Omega_v} b_{ij}^{v, \phi, t} Q_{ij}^{v, \phi, t} \right) \Delta d_t \right) \\ \text{s. t.} \quad \text{式(6)、式(7)、式(9)一式(11)} \end{array} \right. \quad (21)$$

上式中,存在的开关变量在该问题求解时为已知变量,由主问题确定。

子问题用于生成新的枚举场景,并以约束条件的形式添加到主问题中。对于任何给定的网络开关状态,子问题都能求解出相应的最优解,生成针对某个网络开关状态的最恶劣波动场景,因此子问题为获取目标函数最大值的混合整数线性规划问题。

需要提及的是,子问题目标函数包含 max 和 min 双层目标,较难直接求解。由于子问题为线性问题,满足强对偶条件,因此可以通过增加 KKT 条件将内层 min 问题转化为 max 问题,从而获得单一 max 问题,并增加相应的对偶约束和互补松弛约束^[26]。转化后的子问题目标函数如下:

$$\max \sum_{t=1}^T \sum_{\phi} \sum_{ij \in N_{NL}} r_{ij}^{\phi} \left(\sum_{u \in \Omega_u} a_{ij}^{u, \phi, t} P_{ij}^{u, \phi, t} + \sum_{v \in \Omega_v} b_{ij}^{v, \phi, t} Q_{ij}^{v, \phi, t} \right) \Delta d_t \quad (22)$$

C&CG 算法通过对主、子问题进行迭代求解,由此可不断生成新的列约束条件添加到主问题中再次进行迭代求解,通过给定算法收敛精度 δ ,直至上下限均收敛到最优解。基于 C&CG 算法的三相不平衡配电网鲁棒动态重构模型的求解流程图如图 2。

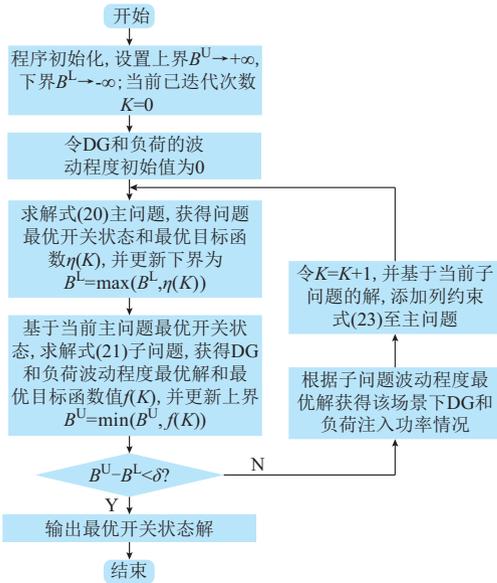


图 2 基于 C&CG 算法的鲁棒动态重构模型求解流程
Fig. 2 Solving process of robust dynamic reconfiguration model based on C&CG algorithm

由第 K 次迭代后子问题求解出新的 DG 和负荷功率最恶劣波动情况,作为第 $K+1$ 次迭代主问题优化的已知输入参数,因此主问题需要添加关于支路功率和节点注入功率的列约束如下:

$$\begin{cases} \alpha_{ij}^t P_{ij}^{\phi, L, t} \leq P_{ij, K}^{\phi, t} \leq \alpha_{ij}^t P_{ij}^{\phi, U, t} \\ \alpha_{ij}^t Q_{ij}^{\phi, L, t} \leq Q_{ij, K}^{\phi, t} \leq \alpha_{ij}^t Q_{ij}^{\phi, U, t} \\ \sum_{i \in m(j)} P_{ij, K}^{\phi, t} = \sum_{k \in n(j)} P_{jk, K}^{\phi, t} + \tilde{P}_{j, DG, K}^{\phi, t} - \tilde{P}_{j, L, K}^{\phi, t} \\ \sum_{i \in m(j)} Q_{ij, K}^{\phi, t} = \sum_{k \in n(j)} Q_{jk, K}^{\phi, t} + \tilde{Q}_{j, DG, K}^{\phi, t} - \tilde{Q}_{j, L, K}^{\phi, t} \end{cases} \quad (23)$$

3 算例仿真分析

3.1 算例介绍

为验证本文鲁棒动态重构模型的有效性,利用 MATLAB-YALMIP 平台开发上述鲁棒优化程序,并使用 Gurobi 商业求解器对优化模型进行求解。测试环境为主频 3.5 GHz、内存 16 GB 装有

MATLAB R2017a 的计算机。

本文采用的测试系统是改进的 IEEE 33 节点三相不平衡配电网^[8],具体结构如附录 B 图 B1 所示,该系统包含 33 个节点、37 条支路,系统额定电压为 12.66 kV,基准容量为 10 MVA。支路参数和负荷采用文献[8]的数据,并以各节点负荷功率作为功率基准,基于 1.3 节的日负荷标么化曲线建立系统负荷曲线,总的有功功率和无功功率分别为 3.635 MW 和 2.265 Mvar。变电站节点电压标么值为 1。考虑到目前中低压电网中光伏和风电是主要的 DG 接入形式,本文亦选择光伏和风电作为并网 DG,根据文献[20]的风速和光照数据,采用 1.1 节与 1.2 节的数学模型得到功率预测值,具体接入情况如附录 B 表 B1 所示。

支路功率和节点电压均归算至标么值,其最佳等距线性化方法的最大逼近误差设置为 $\epsilon = 0.001$ (标么值),根据文献[11]计算得到最小分段数为 112。

3.2 鲁棒动态重构结果分析

为分析本文所提配电网鲁棒动态重构与传统动态重构的差异,对上述 IEEE 33 节点配电网分别进行鲁棒和确定性动态重构仿真,结果如表 1 所示。为体现 DG 和负荷功率的不确定性,本文设置并网的光伏和风电输出功率相对预测值的最大波动为预测值的 30%,负荷功率的最大波动为预测值的 40%。其中确定性重构模型中所有节点的注入功率均设定为预测值,鲁棒重构模型中每个时段的各相 DG 和负荷注入功率不确定性预算控制参数 Γ_{DG} 和 Γ_L 均设置为 1。

表 1 改进 IEEE 33 节点配电网重构结果
Table 1 Reconfiguration results of modified IEEE 33-bus distribution network

重构时段	重构模型	断开支路	网损/(kW·h)
1 至 6	确定性	7-8,9-10,14-15, 28-29,31-32	82
	鲁棒	7-8,9-10,14-15, 28-29,32-33	173
7 至 12	确定性	7-8,9-10,14-15, 32-33,25-29	160
	鲁棒	6-7,9-10,14-15, 32-33,25-29	347
13 至 18	确定性	7-8,10-11,14-15, 32-33,25-29	174
	鲁棒	7-8,9-10,14-15, 32-33,25-29	384
19 至 24	确定性	7-8,9-10,14-15, 28-29,31-32	162
	鲁棒	7-8,9-10,14-15, 28-29,32-33	339

由表 1 中数据可知,确定性重构模型与鲁棒重构模型在一天内均进行了 4 次重构。由于确定性模型考虑节点注入功率均为预测值,配电网运行状况为理想工况,而鲁棒重构需要考虑配电网在最恶劣功率情况下的运行情况最优,得到的网损结果是节点注入功率最恶劣情况下的网络有功损耗,因此各重构时段确定性模型重构后的网损结果均优于鲁棒重构模型结果。为了降低最终给出的网络重构方案受节点注入功率任意波动的敏感性,鲁棒重构模型需要以牺牲一定的优化结果为代价,导致在某些温和的系统工况下,确定性重构方案较鲁棒重构方案更优,这与文献[15]的结论相符。此外,一天内鲁棒重构方案开关动作次数为 4 次,而确定性重构方案为 6 次,因此鲁棒方案具有更低的开关损耗,减少了动态重构对配电网运行的冲击。

随着配电网节点注入功率波动程度的变化,鲁棒重构方案的优势将逐渐体现。本文选择系统第 18 个时段的运行状况进行分析,通过设置 DG 和负荷不同的功率波动系数,比较鲁棒重构和确定性重构开关方案对于同一功率波动的网损情况。为方便比较,仅考虑单一不确定因素的波动,即当负荷产生高于预测值 10%~40%的正向波动时,DG 功率为预测值,而 DG 功率产生高于预测值 10%~60%的正向波动时,负荷功率为预测值。结果如表 2 所示。

表 2 不同波动程度下重构方案对比
Table 2 Comparison of reconfiguration schemes under different fluctuation degrees

不确定性因素	波动系数/%	鲁棒重构网损/(kW·h)	确定性重构网损/(kW·h)	网损差/(kW·h)
负荷功率不确定性	10	46.33	46.61	-0.28
	20	55.79	56.28	-0.49
	30	66.16	66.89	-0.73
	40	77.45	78.55	-1.10
DG 功率不确定性	10	35.51	35.40	0.11
	20	35.17	34.98	0.19
	30	34.69	34.35	0.34
	40	34.22	33.65	0.57
	60	33.71	32.96	0.75

根据表 2 的数据可知,当负荷注入功率存在正向波动时,鲁棒重构方案的网损均优于确定性重构开关方案,随着波动系数的增大,两方案的网损差距增加,鲁棒重构方案的网损更优,体现鲁棒优化在功率波动极端场景下的优势。而当系统中只考虑 DG 注入功率不确定性条件下,在 DG 正向波动时,确定性重构方案具有更小的网损值,这是由于 DG 注入功率符号与负荷相反,接入的 DG 会被附近负荷消纳,对网损有减小作用,因此 DG 注入功率正向波动

方向与恶劣场景变化方向相反,可以认为随着 DG 注入功率的反向波动,鲁棒重构方案必然会优于确定性重构方案。

由上述分析可知,系统注入功率的极端场景为节点负荷功率正向波动且 DG 注入功率反向波动,因此本文选取负荷正向波动高于预测值 40%与 DG 反向波动低于预测值 30%的极端运行状况分析一天内的 A 相网损动态变化情况,如图 3 所示。

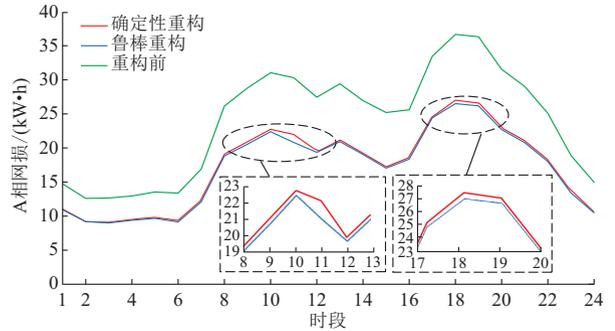


图 3 两种重构方案 A 相网损对比
Fig. 3 Comparison of phase A network loss of two reconfiguration schemes

根据网损结果,确定性重构方案与鲁棒重构方案较重构前网损均明显降低,且各时段鲁棒重构方案网损优化效果更好,对于负荷较重的第 11 个时段和第 18 个时段,鲁棒重构方案的网损优化更明显,表明鲁棒重构方案对于恶劣工况的适应性更好。

为进一步分析验证鲁棒重构方案的优势,更为直观地对比分析两种重构方案的效果,选取第 18 个时段断面的运行状况进行蒙特卡洛仿真分析。设置两种仿真场景,分别设置不同波动系数与波动方向,每种测试场景随机产生 1 000 个确定的波动场景,通过潮流计算获得每种波动场景下的网损情况,并进行统计分析。测试场景 1:设置负荷偏离预测值 30%的波动,DG 功率偏离预测值 20%的波动。测试场景 2:设置负荷高于预测值 20%~40%的正向波动,DG 功率产生低于预测值 30%~50%的反向波动。统计结果如图 4 所示。

根据统计结果,测试场景 1 中波动较温和,确定性重构方案的网损平均值为 65.37 kW·h,标准差为 4.73,鲁棒重构方案网损平均值为 64.69 kW·h,标准差为 4.58,总体来说,鲁棒重构方案的网损和均衡负荷较优,对 DG 和负荷功率不确定性的敏感程度较低。测试场景 2 中波动较为剧烈,两种重构方案的差异尤为明显,确定性重构方案网损平均值为 89.04 kW·h,标准差为 4.62,鲁棒重构方案网损平均值为 79.50 kW·h,标准差为

4.21。因此,可以认为鲁棒重构可以有效降低重构方案对系统负荷和 DG 功率波动的敏感性,提高系统安全经济运行能力。

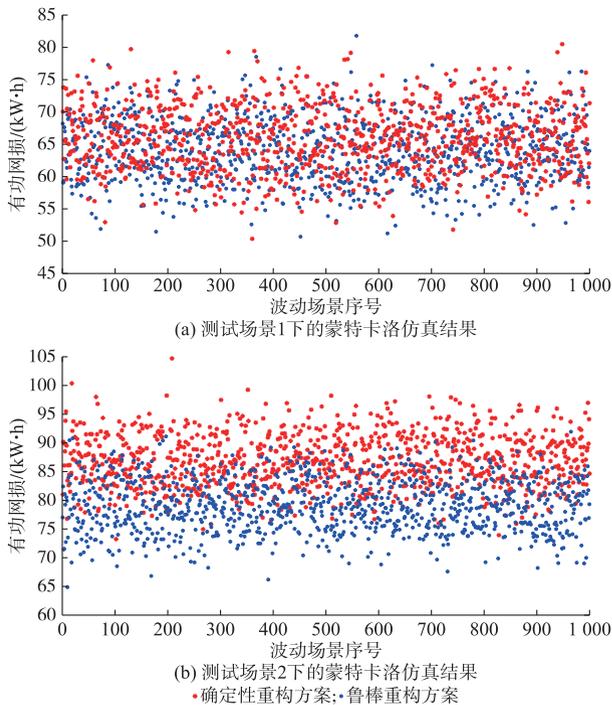


图4 蒙特卡洛仿真网损结果对比

Fig. 4 Comparison for network losses based on Monte Carlo simulation

3.3 不确定性预算

根据前面注入功率不确定集的建模过程可知,通过控制 DG 和负荷注入功率的不确定性预算,可以调节动态鲁棒重构模型的保守性。本文设计了两种不同的不确定预算方案进行鲁棒动态重构算例测试。方案 1 鲁棒重构模型中每个时段的各相 DG 和负荷注入功率不确定性预算控制参数 Γ_{DG} 和 Γ_L 均设置为 0.7。方案 2 不确定性预算控制参数 Γ_{DG} 和 Γ_L 均设置为 0.4。其余仿真参数同 3.1 节,两种不确定性预算方案下配电网的鲁棒动态重构结果如表 3 所示。

由表 3 可以看到,由于方案 1 的不确定性预算较高,不确定集的范围也就越大,产生的波动场景越恶劣,最终使得重构方案对于注入功率的不确定场景具有较强的鲁棒性,但保守性较高。而方案 2 不确定性预算较低,减小了不确定集范围,得到的重构网损结果更接近于确定性重构方案,减弱了重构方案对于功率不确定场景的鲁棒性,但降低了重构方案的保守性。实际应用时,随着配电网中电力电子功率调控装置和量测装置的布置和改进,功率波动的程度也会相应减弱,不确定性预算参数要相应减

小;此外,电价体系和相关需求侧政策也会影响负荷和 DG 的波动情况,不确定性预算参数也要相应改变。因此,根据实际配电网情况选择不确定性预算的大小,可以较好地权衡配电网动态重构方案的鲁棒性和保守性。

表 3 两种不确定性预算方案下的重构结果
Table 3 Reconfiguration results of two uncertainty budget schemes

重构时段	预算方案	断开支路	网损/(kW·h)
1 至 6	方案 1	7-8,9-10,14-15, 28-29,32-33	173
	方案 2	7-8,9-10,14-15, 28-29,31-32	82
7 至 12	方案 1	7-8,9-10,14-15, 31-32,25-29	310
	方案 2	7-8,9-10,14-15, 32-33,25-29	232
13 至 18	方案 1	7-8,11-12,14-15, 32-33,25-29	335
	方案 2	7-8,9-10,14-15, 18-33,25-29	221
19 至 24	方案 1	7-8,9-10,14-15, 6-26,32-33	290
	方案 2	7-8,9-10,14-15, 32-33,25-29	194

4 结语

DG 的接入会对传统配电网的潮流分布和调度运行产生影响。如何在配电网实际三相模型基础上研究动态变化的 DG 和负荷对配电网重构的影响并分析鲁棒优化方案的保守性,是本文鲁棒动态重构的意义所在。

1) 本文基于不确定性预算对 DG 和负荷节点注入功率进行仿射数建模,在此基础上建立了三相不平衡配电网鲁棒动态重构模型,基于最佳等距思想的分段线性逼近方法对目标函数进行精度可控的高效线性化,最后通过 C&CG 方法对鲁棒重构模型进行分解迭代求解。

2) 基于扩展的 IEEE 33 节点系统验证了本文鲁棒动态重构模型在不同运行工况下的重构效果,表明鲁棒重构方案较确定性方案对于恶劣工况的适应性更好。通过蒙特卡洛仿真直观体现了优化方案对于极端运行场景的鲁棒性,有效降低了重构方案对系统负荷和 DG 功率波动的敏感性。通过改变不确定性预算,可以灵活权衡重构方案的鲁棒性与保守性。

配电网中 DG 渗透率越来越高,如何合理划分动态重构时段有待进一步研究。此外,今后可在本

文重构方法基础上定量分析不确定性预算的选择方法,以合理缩放不确定集,调控鲁棒重构保守性。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 刘传铨,张焰. 计及分布式电源的配电网供电可靠性[J]. 电力系统自动化,2007,31(22):46-49.
LIU Chuanquan, ZHANG Yan. Distribution network reliability considering distribution generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(22): 46-49.
- [2] 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.
- [3] 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,2016,40(8):64-70.
ZHANG Jiakun, WEI Gang, ZHU Lan, et al. Blind-number model based power supply capability evaluation of distribution networks with distributed generators [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 64-70.
- [4] 陶顺,陈鹏伟,肖湘宁,等. 智能配电网不确定性建模与供电特征优化技术综述[J]. 电工技术学报,2017,32(10):77-91.
TAO Shun, CHEN Pengwei, XIAO Xiangning, et al. Review on uncertainty modeling and power supply characteristics optimization technology in smart distribution network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 77-91.
- [5] ZHANG Peng, LI Wenyuan, WANG Shouxiang. Reliability-oriented distribution network reconfiguration considering uncertainties of data by interval analysis [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 34(1): 138-144.
- [6] BRUNO S, LAMONACA S, ROTONDO G, et al. Unbalanced three-phase optimal power flow for smart grids [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(10): 4504-4513.
- [7] 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. DOI: 10.7500/AEPS20170926006.
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. DOI: 10.7500/AEPS20170926006.
- [8] 车仁飞,李仁俊. 一种少环配电网三相潮流计算新方法[J]. 中国电机工程学报,2003,23(1):74-79.
CHE Renfei, LI Renjun. A new three-phase power flow method for weakly meshed distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 74-79.
- [9] DING Fei, LOPARO K A. Feeder reconfiguration for unbalanced distribution systems with distributed generation: a hierarchical decentralized approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1633-1642.
- [10] SOSIC D, STEFANOV P. Reconfiguration of the three phase unbalanced distribution network [C]// Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion, November 6-9, 2016, Belgrade, Serbia: 8p.
- [11] 吴在军,成晟,朱承治. 基于线性近似模型的三相不平衡有源配电网重构[J]. 电力系统自动化,2018,42(12):134-141. DOI: 10.7500/AEPS20180108004.
WU Zaijun, CHENG Sheng, ZHU Chengzhi. Reconfiguration of unbalanced active distribution network based on linear approximation model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(12): 134-141. DOI: 10.7500/AEPS20180108004.
- [12] 黄红程,顾洁,方陈. 基于无向生成树的并行遗传算法在配电网重构中的应用[J]. 电力系统自动化,2015,39(14):89-96.
HUANG Hongcheng, GU Jie, FANG Chen. Application of undirected spanning tree-based parallel genetic algorithm in distributed network reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 89-96.
- [13] POPOVIC D S, POPOVIC Z N. A risk management procedure for supply restoration in distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1): 221-228.
- [14] 陈彬,王洪涛,曹曦. 计及负荷模糊不确定性的网架重构后期负荷恢复优化[J]. 电力系统自动化,2016,40(20):6-12.
CHEN Bin, WANG Hongtao, CAO Xi. Load restoration optimization during the last stage of network reconfiguration considering load fuzzy uncertainty[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 6-12.
- [15] HAGHIGHAT H, ZENG Bo. Distribution system reconfiguration under uncertain load and renewable generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2666-2675.
- [16] LEE C, LIU Cong, MEHROTRA S, et al. Robust distribution network reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 836-842.
- [17] 丁涛,郭庆来,柏瑞,等. 考虑风电不确定性的区间经济调度模型及空间分支定界法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(22):3707-3714.
DING Tao, GUO Qinglai, BAI Rui, et al. Interval economic dispatch model with uncertain wind power injection and spatial branch and bound method[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3707-3714.
- [18] 赵俊华,文福拴,薛禹胜,等. 计及电动汽车和风电出力不确定性的随机经济调度[J]. 电力系统自动化,2010,34(20):22-29.
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Power

- system stochastic economic dispatch considering uncertain outputs from plug-in electric vehicles and wind generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20): 22-29.
- [19] 王守相, 韩亮. DG 出力不确定性对配电网影响力分析的复仿射数学方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5507-5515. WANG Shouxiang, HAN Liang. Complex affine arithmetic based method for the analyses of DG's uncertainty influence on distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5507-5515.
- [20] 易海川, 张彼德, 王海颖, 等. 提高 DG 接纳能力的配电网动态重构方法[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1431-1436. YI Haichuan, ZHANG Bide, WANG Haiying, et al. Distribution network dynamic reconfiguration method for improving distribution network's ability of accepting DG[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1431-1436.
- [21] 徐俊俊, 戴桂木, 吴在军, 等. 计及电动汽车和光伏不确定性的主动配电网量测优化配置[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 57-64. DOI: 10.7500/AEPS20160425009. XU Junjun, DAI Guimu, WU Zaijun, et al. Optimal meter placement for active distribution network considering uncertainties of plug-in electric vehicles and photovoltaic systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1): 57-64. DOI: 10.7500/AEPS20160425009.
- [22] 朱俊澎, 顾伟, 张韩且, 等. 考虑网络动态重构的分布式电源选址定容优化方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5): 111-119. DOI: 10.7500/AEPS20170605016. ZHU Junpeng, GU Wei, ZHANG Handan, et al. Optimal siting and sizing of distributed generators considering dynamic network reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 111-119. DOI: 10.7500/AEPS20170605016.
- [23] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [24] LORCA Á, SUN X A. Adaptive robust optimization with dynamic uncertainty sets for multi-period economic dispatch under significant wind[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 1702-1713.
- [25] TAYLOR J A, HOVER F S. Convex models of distribution system reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1407-1413.
- [26] ZENG Bo, ZHAO Long. Solving two-stage robust optimization problems using a column-and-constraint generation method[J]. Operations Research Letters, 2013, 41(5): 457-461.
- 吴在军(1975—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 变电站自动化、分布式发电与微网、电能质量分析与控制。E-mail: zjwu@seu.edu.cn
- 成 晟(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 配电网运行与优化。E-mail: cs0819q@163.com
- 朱承治(1977—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 电力经济信息化与电力系统稳定。E-mail: 530981742@qq.com

(编辑 蔡静雯)

Robust Dynamic Reconfiguration of Three-phase Unbalanced Active Distribution Network

WU Zaijun¹, CHENG Sheng¹, ZHU Chengzhi², XU Junjun¹, DOU Xiaobo¹, GU Wei¹

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Co. Ltd., Hangzhou 310007, China)

Abstract: The optimization effect and application value of network reconfiguration scheme can be improved considering the three-phase unbalanced operation of distribution network and the uncertainty of injection power. Firstly, the uncertainty of distributed generators and load injection power is modeled by the affine number, and the reconfiguration period is divided. The two-stage robust dynamic reconfiguration model of distribution network with uncertainty budget is established based on the three-phase Distflow power flow equation, which takes optimal active power of network loss as objective function. In order to efficiently solve the model, an optimal equidistant piecewise linear approximation algorithm is adopted for the precision-controlled linear relaxation of the model, and the column-and-constraint generation method is used to solve it iteratively. A standardized distribution test system is used to verify the feasibility and effectiveness of the proposed model, which shows that the conservatism and robustness of the reconfiguration scheme can be further adjusted by controlling the uncertainty budget.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51677025) and State Grid Corporation of China (No. 52110417000A).

Key words: three-phase unbalance; distributed generator; uncertainty budget; robust dynamic reconfiguration; column-and-constraint generation method