

# 基于可靠性的多级配网和分布式电源联合扩容规划

杨威,程晓磊,王鹏,王渊

(内蒙古电力经济技术研究院,内蒙古 呼和浩特 010090)

**摘要:**对配网系统和分布式发电(分布式电源)的联合多级扩容规划中配网的可靠性进行了建模。在配网层面,由于网架可靠性弱而产生的网架强加成本非常高。因此在所提出的模型中,配电网运营商(distribution network operator, DNO)在规划问题中考虑了与负荷中断相关的成本。采用联合多级配网扩容规划(multi-stage distribution network expansion planning, MDNEP),对包括馈线、变电站、变压器以及分布式电源在内的网络资产的网络的可靠性评价进行了综合建模,最后利用GAME软件对MDNEP联合规划中电能不足期望(expected energy not served, EENS)的可靠性指标进行计算得出计及分布式电源接入的配电网扩容规划拓扑。

**关键词:**配电网;多级联合;可靠性;分布式电源;扩容规划

**中图分类号:**TM46;TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed22766

## Joint Capacity Expansion Planning for Reliability-based Multi-stage Distribution Networks and Distributed Power Supplier

YANG Wei, CHENG Xiaolei, WANG Peng, WANG Yuan

(Inner Mongolia Electric Power Economic Technology Research Institute, Hohhot 010090, Nei Mongol, China)

**Abstract:** The reliability of the distribution network was modeled in the planning of a joint multi-level expansion of the distribution system and distributed generation (DG). At the distribution level, the cost of grid imposition due to weak grid reliability was high. Therefore, in the proposed model, the costs associated with load disruptions in the planning problem was considered by the distribution network operator (DNO). The reliability evaluation of the network assets including feeders, substations, transformers, and DG was comprehensively modeled using the joint multi-stage distribution network expansion planning (MDNEP), and finally the reliability index of expected energy not served (EENS) for the joint MDNEP planning was calculated using the GAME software to arrive at a distribution network expansion planning topology which was taken into account distributed power access.

**Key words:** distribution network; joint multistage; reliability; distributed generations (DG); expansion planning

在配电系统中大部分的停电事件都是由于配电网设备的故障造成的,同时由于系统对供电可靠性水平的要求不断提高,使得可靠性水平成为配电网建设规划的重要因素。因此在配电网规划问题中考虑配电网的可靠性是电网规划人员不可避免的问题<sup>[1]</sup>。

目前对于多级配网联合扩建规划(multi-stage distribution network expansion planning, MDNEP)问题的研究已经取得了一定的成果,文献[2-3]指出

随着分布式能源接入配电网技术的成熟,在考虑配电网可靠性规划时,需要同时考虑传统配电网的设备以及分布式电源接入对可靠性产生的影响,对风电出力及预测的模型进行了综述,指出预测误差可能受到其他相关因素的影响。对此类影响的忽视则可能降低模型的精确性。文献[4]从投资成本的角度对配电网拓扑结构进行了优化,然后对所选拓扑结构进行了可靠性评估。文献[5]通过使用时序蒙特卡洛模拟分析了一个辐

**基金项目:**内蒙古电力科技项目(2019-62)

**作者简介:**杨威(1968—),男,硕士,副高级工程师, Email:823206253@qq.com

射型城市配电网,扩展了传统的可靠性评估,分析了备用电源或重新配置电源方案对不同网络功能的影响,但是忽略了设备扩展规划对可靠性的影响。文献[6]中介绍了通过评估用户决策对可靠性造成的风险来进行配网规划。在该方法中,利用NSGA-II考虑客户可靠性需求的不确定性来进行规划。在该模型中,没有对网络的可靠性进行评估。文献[7]在MDNEP问题中考虑了不确定性和可靠性,作者使用迭代算法选择了一组在总投资和运行成本方面最优的候选方案。然后计算候选方案的可靠性指标,并对其进行评估得到最优解。文献[8]中提出了一个微电网优化设计的迭代算法。利用图论的方法对主动配电网中的微电网拓扑结构进行优化设计,但是在投资决策问题中没有考虑可靠性评估,这导致解决方案的最优性不能得到保证。

综上所述,现有研究多集中于解决传统配电网可靠性规划问题,对含分布式能源资源的配电网可靠性规划研究较少。在本文中,为了将可靠性成本以一种综合的方式纳入联合MDNEP问题,应用电量不足期望(expected energy not served, EENS)的可靠性指标,从经济性和可靠性的角度通过建立计及可靠性成本的优化目标函数,得到包含配电网资产(包括线路、变电站和变压器)和分布式电源(包括风力机和光伏等)的最优协同规划方案。

## 1 研究方法

随着有源配电网中分布式电源的渗透率不断提高,含分布式电源的配电网联合扩容规划模型中,将可靠性成本作为一个重要因素纳入其中,作为规划问题的关键因素进行研究。由配电网运营商来决定网络设备和分布式电源的联合投资计划。分布式电源的选址就是找出在配电网中接入的最佳位置,能够使得整个系统网损达到最低。因此可以通过建立联合的MDNEP规划模型进行分析。配电网运营商通过分析馈线、变电站和变压器等配电网设备不同的安装时间和安装位置,满足规划期内不断增长的负荷的可靠性水平。

因此在考虑配电网的可靠性的MDNEP联合规划问题中以所有时间阶段的负荷中断成本,以及投资、维护和运营成本最小作为目标函数。在配电网系统中电能不足期望EENS与可靠性指数成正比。因此,应在MDNEP问题中计算EENS来作为评估网络可靠性的指标之一。

一般来说,某一时刻的负荷中断成本EENS可以按照下式计算得到<sup>[9]</sup>:

$$EENS_t = \sum_{i \in \Psi_L} \sum_{ll \in LL} \Delta_{ll} \times n_i \delta_i D_{i,t,ll} \quad \forall t \in T \quad (1)$$

式中: $\Psi_L$ 为负荷节点的集合; $\Delta_{ll}$ 为某一负荷水平的持续时间; $n_i, \delta_i$ 分别为负载点*i*的年平均停电次数和持续时间; $D_{i,t,ll}$ 为系统在不同阶段不同负荷水平下的需求; $LL$ 为负荷等级; $T$ 为规划问题所处的时间阶段。

在所提出的模型中,网络拓扑结构为辐射型电网并处于正常运行状态,即在正常情况下(即网络设备没有故障),该网络是不允许孤岛运行的。此时所有分布式电源都有一个对应的变电站节点。而在网络出现故障的条件下,电网可以在孤岛状态下运行,同时分布式电源能够为其孤岛内负荷供电。

## 2 数学模型

本节介绍了所提出模型的数学模型。优化目标函数中包含所提出的MDNEP联合可靠性成本。对配电网设备可靠性和分布式电源接入进行综合考虑并计算出相应的可靠性指标EENS。由于网络拓扑结构和分布式电源在网络中的位置都是未知的,在规划问题中计算EENS使问题成为非线性的。因此为了保持问题的线性,这里需要对EENS表达式进行线性化处理。

### 2.1 配电网运营商成本最小目标函数

配电网运营商需要将系统总成本的净现值最小化,净现值如下式所示:

$$TC = \sum_{i \in T} NPF_i \times ic_i + \sum_{i \in T} \frac{1}{(1+i)^i} (mc_i + oc_i + uc_i) \quad (2)$$

$$NPF_i = [1/i(1+i)^i] \times i(1+i)^k / [(1+i)^k - 1] \quad (3)$$

式中: $NPF_i$ 为投资成本的净现值系数; $ic_i, mc_i, oc_i, uc_i$ 分别为投资成本、维护成本、运行成本、负荷中断成本; $k$ 为每项设备的寿命。

假定每台设备在其寿命期结束后被相同的设备所替代。系统总成本包括投资、维护、运行和负荷中断成本。

投资成本如下式所示:

$$ic_i = \sum_{l \in \{AF, NRF\}} \sum_{a \in A^l} \sum_{(ij) \in \mu^l} IC_{a,l}^l l_{ij} x_{ij,a,t}^l + \sum_{i \in \Psi_s} IC_i^S x_{i,t}^S + \sum_{a \in A^r} \sum_{i \in \Psi_s} IC_{a,tr}^{Tr} x_{i,a,t}^{Tr} + \sum_{g \in G} \sum_{a \in A^g} \sum_{i \in \Psi_c} IC_{a,g}^G S_{a,g} x_{i,a,t}^g \quad \forall t \in T \quad (4)$$

式中: $AF, NRF$ 分别为新增加的线路和新替换的线路; $\Psi_G, \Psi_S$ 分别为计划安装分布式电源的节点和变电站节点的集合; $A^l, A^r, A^g$ 分别为对线路、变压器、发电机的投资的集合; $IC_{a,l}^L, IC_i^S, IC_{a,tr}^{Tr}, IC_{a,g}^G$ 分别为线路、变电站、变压器和发电机组的投资成本; $x_{ij,a,t}^l, x_{i,t}^S, x_{i,a,t}^{tr}, x_{i,a,t}^g$ 分别为线路、变电站、变压器和发电机组的投资状态的(0,1)变量; $S_{a,g}$ 为发电机组最大出力; $l_{i,j}$ 为节点*i, j*之间的线路。

每个规划时间阶段的投资成本应限于配电网运营商在相关时间阶段的投资预算。

维护成本如下式所示:

$$mc_t = \sum_{l \in L} \sum_{a \in A^l} \sum_{(ij) \in \mu^l} MC_{a,l}^L (u_{ij,a,t}^l + u_{ji,a,t}^l) + \sum_{tr \in TR} \sum_{a \in A^r} \sum_{i \in \Psi_S} MC_{a,tr}^{Tr} u_{i,a,t}^{tr} + \sum_{g \in G} \sum_{a \in A^g} \sum_{i \in \Psi_S} MC_{a,g}^G u_{i,a,t}^g \quad \forall t \in T \quad (5)$$

式中: $MC_{a,l}^L, MC_{a,tr}^{Tr}, MC_{a,g}^G$ 分别为线路、变压器、发电机的维护成本; $u_{ij,a,t}^l, u_{i,a,t}^{tr}, u_{i,a,t}^g$ 分别为线路、变压器和发电机利用状态的(0,1)变量。

已使用的资产给配电网运营商带来了维护成本。

运营成本如下式所示:

$$oc_t = \sum_{ll \in LL} \Delta_{ll} \left( \sum_{tr \in TR} \sum_{a \in A^r} \sum_{i \in \Psi_S} OC_{ll}^S p_{i,a,t,ll}^{tr} + \sum_{g \in G} \sum_{a \in A^g} \sum_{i \in \Psi_S} OC_{a,g}^G p_{i,a,t,ll}^g \right) \quad \forall t \in T \quad (6)$$

式中: $OC_{ll}^S, OC_{a,g}^G$ 分别为由上层电网和DG提供电能的成本; $p_{i,a,t,ll}^{tr}, p_{i,a,t,ll}^g$ 分别为变压器和分布式电源的注入功率。

式(6)表示配电网运营商的运营成本与上级电网和分布式电源的购电成本有关。

负荷中断成本如下式所示,通过计算EENS和失负荷量(value of lost load, VOLL)的乘积来确定:

$$uc_t = VOLL \times \left( \sum_{i \in \Psi_l, ll \in LL} \Delta_{ll} \times n_i \delta_i D_{i, ll} \right) \quad \forall t \in T \quad (7)$$

## 2.2 MDNEP联合规划的约束条件

在整个规划范围内,有且只有一种候选方案,约束条件如下:

$$\sum_{t \in T} \sum_{a \in A^r} x_{i,a,t}^{tr} \leq 1 \quad \forall g \in G, i \in \Psi_G \quad (8)$$

该约束条件不仅适用于分布式电源,还可以适用在联合扩容规划中的其他设备。

除了上述约束条件外,还应该考虑变压器的附加条件,即只有在相关的变电站已经建成或扩

建的情况下才能设置变压器约束条件如下所示:

$$x_{i,a,t}^{tr} \leq \sum_{\tau=1}^t x_{i,a,\tau}^S \quad \forall i \in \Psi_S, a \in A^r, t \in T \quad (9)$$

馈线的利用率由下3式确定:

$$\begin{cases} u_{ij,a,t}^l + u_{ji,a,t}^l \leq 1 \\ \forall l \in L, (ij) \in \mu^l, a \in A^l, t \in T \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} u_{ij,a,t}^l + u_{ji,a,t}^l \leq \sum_{\tau=1}^t x_{ij,a,\tau}^l \\ \forall l \in \{AF, NRF\}, (ij) \in \mu^l, a \in A^l, t \in T \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} u_{ij,a,t}^l + u_{ji,a,t}^l \leq 1 - \sum_{\tau=1}^t \sum_{a \in A^l} x_{ij,a,\tau}^l \\ \forall l \in RF, (ij) \in \mu^l, a \in A^l, t \in T \end{cases} \quad (12)$$

式中: $RF$ 为可被替换的线路。

变压器和分布式电源的利用率分别由下2个约束条件来确定:

$$u_{i,a,t}^{tr} \leq \sum_{\tau=1}^t x_{i,a,\tau}^{tr} \quad \forall n \in \Psi_S, a \in A^r, t \in T \quad (13)$$

$$u_{i,a,t}^g \leq \sum_{\tau=1}^t x_{i,a,\tau}^g \quad \forall g \in G, i \in \Psi_G, a \in A^g, t \in T \quad (14)$$

## 2.3 分布式电源运行约束

下式约束条件用来确保发电量被限制在最小的可用风能和额定容量范围内:

$$\begin{cases} 0 \leq p_{i,a,t,ll}^g \leq u_{i,a,t}^g \min \{ S_{i,a,t,ll}^w, S_{a,g} \} \\ \forall g \in w, i \in \Psi_w, a \in A^g, t \in T, ll \in LL \end{cases} \quad (15)$$

式中: $S_{i,a,t,ll}^w, S_{a,g}$ 分别为可利用的风电出力和最大风电出力; $\Psi_w$ 为风速的集合; $w$ 为风电机组变量。

分布式电源的渗透率约束由下式所示:

$$\begin{cases} \sum_{g \in G} \sum_{a \in A^g} \sum_{i \in \Psi_S} p_{i,a,t,ll}^g \leq PL \times \sum_{i \in \Psi_l} F_{ll} D_{n,t} \\ \forall t \in T, ll \in LL \end{cases} \quad (16)$$

式中: $PL$ 为分布式电源渗透率水平; $F_{ll}$ 为系统中不同负荷水平的馈线。

## 2.4 网络拓扑结构和运行约束

本文通过两组约束条件来模拟配网运行。

第一组约束条件描述了网络的运行限制,包括功率平衡、潮流计算以及潮流和电压约束:

$$\sum_{l \in L} \sum_{a \in A^l} \sum_{j \in \gamma_l} (f_{ij,a,t,ll}^l - f_{ji,a,t,ll}^l) = \sum_{tr \in TR} \sum_{a \in A^r} p_{i,a,t,ll}^{tr} + \sum_{g \in G} \sum_{a \in A^g} p_{i,a,t,ll}^g - D_{n,t, ll} \quad \forall i \in I, t \in T, ll \in LL \quad (17)$$

式中: $f_{ij,a,t,ll}^l$ 为线路上的潮流。

$$\begin{cases} u_{ij,a,t}^l \times [Z_a^l l_{ij} f_{ij,a,t,ll}^l - (v_{i,t, ll} - v_{j,t, ll})] = 0 \\ \forall l \in L, i \in \gamma_j^l, j \in I, a \in A^l, t \in T, ll \in LL \end{cases} \quad (18)$$

式中: $Z_a^l$ 为线路阻抗; $v_{i,t, ll}$ 为节点电压。

$$-M(1 - u_{i,j,a,t}^l) \leq Z_{a,l}^l f_{i,j,a,t,ll}^l - (v_{i,ll} - v_{j,ll}) \leq M(1 - u_{i,j,a,t}^l) \quad (19)$$

$$0 \leq f_{i,j,a,t,ll}^l \leq u_{i,j,a,t}^l S_{a,l} \quad (20)$$

$$0 \leq p_{i,a,t,ll}^r \leq u_{i,a,t}^r S_{a,tr} \quad (21)$$

式中: $M$ 为一个足够大数, $S_{a,l}$ 为线路上的最大电流; $S_{a,tr}$ 为变压器上的最大电流。

$$V_{i,\min} \leq v_{i,ll} \leq V_{i,\max} \quad (22)$$

式中: $V_{i,\max}$ , $V_{i,\min}$ 分别为节点电压的最大、最小值。

系统中各母线处的功率平衡由约束条件(17)维持。母线电压由公式(18)计算出各支路的电流大小。其中 $u$ 表示的馈线投入运行与否的状态,以此来确保该支路的电流为零,同时这也使得优化问题成为非线性的。为了使优化问题变成线性问题,需要对该方程进行线性化<sup>[10]</sup>如式(19)所示,其中 $M$ 为无穷大数。通过约束条件(20)、约束条件(21)实现馈线和变压器的潮流低于其额定容量,此外,母线的电压幅值应约束在允许范围内,如约束条件(22)所示。在正常运行条件下,网络不允许孤岛运行,此时所有的负荷和转移节点都应该连接到变电站节点。但为了评估网络在故障条件下的可靠性,如第1节所述允许网络以孤岛模式运行,同时分布式电源能够为其负荷供电。

第二组约束为网络拓扑约束:

$$\alpha_{i,j,t}^l = \sum_{a \in A^l} u_{i,j,a,t}^l + u_{j,i,a,t}^l = \beta_{i,j,t}^l + \beta_{j,i,t}^l \quad (23)$$

$$\beta_{i,j,t}^l = 0 \quad \forall i \in \Psi_s, t \in T \quad (24)$$

$$\sum_{j \in \gamma_i} \beta_{i,j,t}^l = 1 \quad \forall i \in \Psi_L, t \in T \quad (25)$$

$$T_{i,t} \geq \alpha_{i,j,t}^l \quad \forall (i,j) \in \mu^l, i \in \Psi_T, t \in T \quad (26)$$

$$\sum_{(i,j) \in \mu^l} \alpha_{i,j,t}^l \geq 2T_{i,t} \quad \forall i \in \Psi_T, t \in T \quad (27)$$

$$\sum_{(i,j) \in \mu^l} \alpha_{i,j,t}^l = |\Psi_s| - \sum_{i \in \Psi_T} (1 - T_{i,t}) \quad \forall t \in T \quad (28)$$

式中: $\alpha_{i,j,t}^l$ , $\beta_{j,i,t}^l$ , $T_{i,t}$ 分别为线路、电源节点、变压器节点在生成树中的(0,1)状态变量; $\Psi_T$ 为变压器节点的集合。

本文采用了两种约束,包括生成树约束<sup>[11]</sup>和与转移节点相关约束来保证系统的正常运行。转移节点没有电源和负荷,它们仅起到连接网络内其他节点的作用。约束条件(23)~约束条件(26)表示无论潮流方向如何,配电网都对应于连接到对应的主变电站的生成树。通过约束条件(27)、约束条件(28)来确保转移节点的网络以辐射网络方式运行。

## 2.5 考虑EENS的MDNEP优化

根据上面的描述,为了计算出规划问题中的可靠性指标EENS,我们需要对以下问题做出假设:假设每条馈线都有断路器,在馈线发生故障时将其与网络相隔离。式(1)中的EENS可以用馈线的潮流来表示,当某一馈线发生故障时,该馈线断路器动作,使下一级的网络从馈线连接的变电站节点隔离。如果下一级网络中没有分布式电源,则中断的负荷等于故障馈线上的潮流。反之,如果下一级网络中至少接入了一台分布式电源,那么与变电站节点隔离的网络就形成了一个孤岛,可以由接入的分布式电源供电。在这种情况下,如果故障馈线的潮流是流入变电站节点,则意味着该孤岛的负荷可以由分布式电源就地供电,此时中断负荷为零。反之,如果故障馈线中的电能潮流是流向下一级网络,则失负荷量等于馈线上的潮流。因此,式(1)中的EENS可以由以下公式得到:

$$EENS_t = \sum_{(i,j) \in \mu^l} \sum_{l \in L} \sum_{a \in A^l} \sum_{ll \in LL} \Delta_{ll} \times \lambda_{i,j,a}^l r_{i,j,a}^l \hat{f}_{i,j,t,ll}^l \quad (29)$$

式中: $\lambda_{i,j,a}^l$ 和 $r_{i,j,a}^l$ 为故障率和维修时间馈线; $\hat{f}_{i,j,t,ll}^l$ 为一个正变量,表示从上一级节点到其连接的下一级节点的相关馈线的潮流。

在生成树中,上级节点在电气上更接近根节点。为了确定上级和下级节点,这里应用网路约束中的二进制变量 $\beta_{j,i,t}^l$ 。这个二进制变量表明节点 $j$ 在生成树中处于节点 $i$ 的上一级,同时表明节点 $j$ 在电气上更接近于生成树中的根节点。如前所述,为了计算EENS,只需考虑从上级节点到下级节点的正向潮流即可:

$$\hat{f}_{i,j,t,ll}^l \leq \beta_{j,i,t,ll}^l S_l \quad (30)$$

$$\beta_{j,i,t,ll}^l (\hat{f}_{i,j,t,ll}^l - f_{i,j,t,ll}^l) = 0 \quad (31)$$

式中: $S_l$ 为线路上的最大电流,由于二进制变量 $\beta_{j,i,t,ll}^l$ 的出现使得该优化问题变成非线性问题,因此为了保持所提出模型的线性,应使用以下公式的线性化形式,其中, $M$ 取值足够大。

$$-M(1 - \beta_{j,i,t,ll}^l) \leq \hat{f}_{i,j,t,ll}^l - f_{i,j,t,ll}^l \leq M(1 - \beta_{j,i,t,ll}^l) \quad (32)$$

## 3 算例分析

本文采用的13.8 kV 18母线标准算例具体模型参数见文献[3]。该模型所提出的模式适用于三年的规划期。其中定义了3个时间阶段。此外,对于每个时间段根据网络负荷曲线确定三个阶段负荷水平。

该网络有16个负荷节点和2个变电站节点,在第一和第二时间阶段中,一些节点的负荷等于零,这些节点在网络拓扑中作为传输节点的使用。

在网络拓扑结构的基础上,发挥转移节点的作用。网络有8个馈线,其中3个是固定的,其他馈线是在规划期内可替换的。此外,有16个馈线是作为候选添加的。接入分布式电源的候选节点是第4~16节点。变电站提供的电量成本分别等于600,420和350元/(MW·h)。失负荷量假定为3000元/(MW·h)。电压的上、下限极限分别为1.05(标么值)和0.95(标么值)。

为了评估网络可靠性对加入MDNEP的影响,我们定义了三种场景。在场景1中,不考虑负荷的中断成本,配电网运营商共同决定分布式电源以及网络设备的投资计划。为了证明可靠性的效果,在场景2中,目标函数中考虑了负荷中断成本。在场景3中,分布式电源不在规划方案之列(即网络以被动模式运行),以研究分布式电源对系统总成本和可靠性指标EENS的影响。表1列出了三个场景中的在规划问题中考虑EENS指标的相关成本。

表1 规划项目成本和EENS指标

Tab.1 Planing problem cost and EENS

	规划项目/百万元					EENS/(MW·h)		
	投资成本	维护费用	业务费用	负荷中断费用	系统费用总额	阶段1	阶段2	阶段3
场景1	6.223	0.094	6.1124	2.895	20.311	36.242	59.258	62.431
场景2	6.749	0.098	5.1139	2.143	20.129	31.785	57.546	59.487
场景3	3.125	0.074	2.15287	3.542	22.028	42.743	63.284	64.725

通过比较场景1和场景2可以得出结论,场景2的投资成本更高。这是因为,在场景2中MDNEP规划考虑了配电网的可靠性,配电网运营商加大对网络扩展的投入,来提高可靠性的水平,从而降低相关的负荷中断成本。虽然投资成本增加了,但是负荷中断成本大大降低了,与场景1相比,场景2的系统总成本更低。同时通过对比场景1和场景2可知,通过在联合MDNEP中涉及负荷中断成本来考虑网络的可靠性,可以得到具有最小系统总成本的规划方案。为了研究分布式电源的影响,场景3的结果表明虽然投资成本显著降低,但配电网运营商要承担更高的运行和负荷中断成本,导致系统总成本增加。

表2给出了分布式电源渗透率对EENS的影

响。可以看出,在含分布式电源接入的配电网中,馈线故障停电后,分布式电源可以为故障后以孤岛状态运行的电网中的负荷供电,因此增加渗透率可以改善EENS指标。

表2 考虑分布式电源渗透率对EENS的影响

Tab.2 Considering the Impact of distributed power penetration on EENS

渗透率/%	EENS/(MW·h)
20	59.487
40	57.126
60	56.276
80	55.876

场景2与场景3的最终网络拓扑结构如图1a、图1b所示。

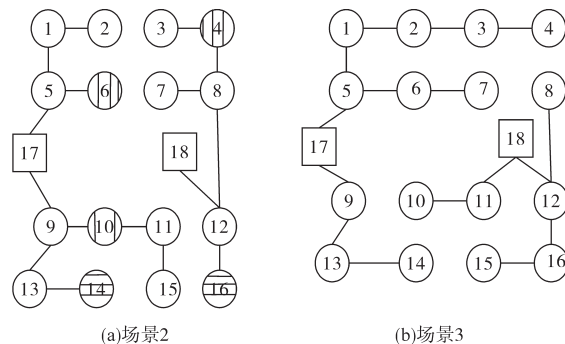


图1 场景2和场景3中的含分布式电源的网络拓扑结构

Fig.1 Network topology with distributed power in case 2 and case 3

### 4 结论

本文提出了一种综合考虑配电网可靠性的多级配网联合扩建规划模型。通过计算可靠性指标EENS,将负荷中断成本作为配电网运营商成本最小的目标函数中的一项,从而得到最优的网络拓扑结构和分布式电源的接入位置,提高了可靠性水平。

以18母线系统作为算例系统进行仿真,验证了将可靠性纳入多级配网联合扩建规划模型的正确性,研究表明,配电网运营商加大对网络扩展的投入,可以提高可靠性的水平,虽然投资成本增加了,但是负荷中断成本大幅降低,最终得到最小系统总成本的规划方案。

### 参考文献

[1] 南钺,宋瑞卿,陈鹏,等.基于改进熵权-灰色关联法的配电网可靠性影响因素分析[J].电力系统保护与控制,2019,47(24):109-115.

Nan Y, Song R Q, Chen P, et al. Study on the factors influen-

- cing the reliability analysis in distribution network based on improved entropy weight gray correlation analysis algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 109-115.
- [2] 吴鸣,徐斌,季宇,等.输配协同分布式电源最大接入容量计算方法[J].电网技术,2019,43(11):3883-3890.  
Wu M, Xu B, Ji Y, *et al.* Transmission-distribution-network-coordinated calculation method of maximum integration capacity of distributed generations[J]. Power grid technology, 2019, 43(11):3883-3890.
- [3] Munoz-Delgado G, Contreras J, Arroyo J M. Multistage generation and network expansion planning in distribution systems considering uncertainty and reliability[J]. IEEE Trans. Power Syst., 2016, 31(5): 3715 - 3728.
- [4] 阮闯,江道灼,朱乃璇,等.蜂巢状有源配电网拓扑及其可靠性评估[J].电力建设,2019,40(3):77-84.  
Ruan C, Jiang D Z, Zhu N X, *et al.* Topology and reliability evaluation of honeycomb active distribution network[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(3):77-84.
- [5] 郑海峰,黄泽琦,刘洪,等.考虑负荷时序特性的含主变配电网可靠性评估[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(4):148-154.  
Zheng H F, Huang Z Q, Liu H, *et al.* Reliability evaluation of distribution network with main transformer considering load timing characteristics[J]. Journal of Electric Power Systems and Automation, 2018, 30(4):148-154.
- [6] Mazhari SM, Monsef H, Romero R. A multi-objective distribution system expansion planning incorporating customer choices on reliability[J]. IEEE Trans. Power Syst., 2016, 31(2): 1330-1340.
- [7] 孙雨潇,朱俊澎,袁越.基于动态孤岛混合整数线性规划模型的主动配电网可靠性分析[J].电力建设,2019,40(5):94-101.  
Sun Y X, Zhu J P, Yuan Y. Reliability analysis of active distribution network based on dynamic islanding mixed integer linear programming model[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(5):94-101.
- [8] 刘洋,李逐云,雷霞,等.一种求解配电网多阶段规划的改进遗传膜算法[J].电测与仪表,2017,54(21):17-25.  
Liu Y, Li Z Y, Lei X, *et al.* An improved genetic film algorithm for multi-stage planning of distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(21):17-25.
- [9] Billinton R, Allan R N. Reliability evaluation of power systems [C]// New York, NY, USA: Springer Science & Business Media, 2013.
- [10] 范志成,朱俊澎,袁越,等.基于改进型直流潮流算法的主动配电网分布式电源规划模型及其线性化方法[J].电网技术,2019,43(2):170-179.  
Fan Z C, Zhu J P, Yuan Y, *et al.* Distributed power planning model for active distribution network based on improved DC power flow algorithm and its linearization method[J]. Power Grid Technology, 2019, 43(2):170-179.
- [11] 徐成司,董树锋,朱嘉麒,等.基于供电环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 C S, Dong S F, Zhu J Q, *et al.* Description method of radial constraints for distribution network based on disconnection condition of power supply loop[J]. Power System Automation, 2019, 43(20):82-89.

收稿日期:2020-12-03

修改稿日期:2020-12-27