

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191611

基于生存性评估的含微电网的保底电网网架构建方法

岑海凤¹, 杨翔宇², 王雨潼³, 陈坤¹, 许苑¹, 李涛¹, 李梦阳¹, 欧阳金鑫²

(1. 广州供电局有限公司, 广东 广州 510620; 2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室
(重庆大学), 重庆 400044; 3. 华北电力大学, 北京 102206)

摘要: 微电网具有较强的灵活性、可靠性和可控性, 将微电网应用于保底电网能够增强城市核心区域的安全供电、抵抗灾害和快速复电能力。但是, 由于组成元件和运行目标的不同, 现有规划方法无法适用于含微电网的保底电网。为此, 提出了一种基于生存性评估的含微电网的保底电网网架构建方法。计及了微电网对保底电网运行的影响, 提出了配电网支路和节点的重要性评估指标。构建了兼顾抵抗性、安全性和恢复性的含微电网的保底电网生存性指标体系, 建立了含微电网的保底电网网架搜索模型。算例分析表明, 所提方法能够保证在严重自然灾害下重要负荷的持续供电和保底电网的安全运行以及提高保底电网的快速复电能力。

关键词: 保底电网; 微电网; 生存性指标; 网架规划; 自然灾害

A planning method for secure power networks with microgrids based on survivability evaluation

CEN Haifeng¹, YANG Xiangyu², WANG Yutong³, CHEN Kun¹, XU Yuan¹, LI Tao¹, LI Mengyang¹, OUYANG Jinxin²

(1. Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510620, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing 400044, China;
3. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Microgrids have strong flexibility, reliability, and controllability. The application of microgrids to secure power networks can enhance the safety of power supply, the ability to resist disasters and quickly restore power in the urban cores. However, because of the different components and operating objectives, the existing planning methods cannot be applied to secure power networks with microgrids. Therefore, a planning method for secure power networks with microgrids based on survivability evaluation is proposed in this paper. The impacts of microgrids on the operation of the secure power networks are considered, and the importance indices of branches and nodes of the distribution network are proposed. A survivability index system for a secure power network with microgrids considering resistance, safety, and recovery is constructed, and the search model for secure power networks with microgrids is established. The examples show that the continuous power supply of important loads under severe natural disasters, and the safe operation as well as the ability of fast-recovered power of the secure power network can be ensured with this method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877018).

Key words: secure power networks; microgrid; survivability index; network planning; natural disaster

0 引言

电能是现代生活赖以生存的主要能源形式, 供电可靠对社会安全与经济发展有着举足轻重的作用^[1-2]。近年来, 极端恶劣天气和罕见自然灾害影响电网安全运行和正常供电的事件在世界范围内频繁发生, 造成了巨大的经济损失和严重的社会影响^[3-5]。为此, 南方电网公司提出通过差异化规划形成保底

电网, 并对相关的电力设施进行加强和改造, 进而减少自然灾害对电网安全稳定不利影响^[6]。

保底电网是指电网针对严重自然灾害, 以提高城市核心区域和重要电力用户供电安全、提高电网快速复电能力为目标, 选取电网的重要节点、关键线路和保障电源进行差异化建设所形成的最小规模网架, 保证重要负荷供电以及重要电源的可靠送出, 避免发生全停事故^[7]。保底电网是保底负荷与抗灾保障电源基本平衡的城市电网, 严重自然灾害情况下可按局部电网独立运行。保底电网主要采用同步

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(51877018)

发电机组作为保障电源，同步发电机组具有集中式接入、功率控制不灵活、响应速度慢等特点，使得保底电网的效率有限。

微电网作为可再生能源和分布式电源机制创新的重要方向，具有较强的灵活性、可靠性和可控性，对推进节能减排和实现能源可持续发展具有重要意义^[8]。微电网中的分布式电源和储能在严重自然灾害情况下具有应急支撑能力^[9]，能够减少对保底电网中抗灾保障电源的需求，提高供电可靠性和电能质量，为保底电网提供应急支撑。此外，在严重自然灾害情况下，可通过对微电网中的非重要负荷进行切负荷操作，以增大微电网对保底电网的应急支撑能力^[10-11]。因此，含微电网的保底电网相比于传统保底电网具有更经济、更可靠和更安全的特点，且具有更强的应急支撑能力。

目前已有关于保底电网的网架构建方法的研究^[12-15]。但是，现有研究都是基于传统配电网的差异化规划方法，未考虑含微电网的保底电网网架构建方法。然而，微电网的接入数量、方式和位置以及应急支撑能力等因素都会对保底电网的经济性、可靠性和安全性产生影响。随着微电网的不断发展，传统保底电网规划不再适应可再生能源和分布式电源快速发展的需要，亟需寻找适应含微电网的保底电网网架的构建方法。

含微电网的保底电网的构建方法是对整个城市的配电网建设进行清洁能源发电、能量优化管理、经济运行及电网应急电源支持的全新探索。因此，本文提出了一种含微电网的保底电网网架构建方法。首先，计及微电网对保底电网网架构建的影响，对配电网中的支路和节点进行了重要性评估；其次，构建了兼顾抵抗性、安全性和恢复性的保底电网生存性指标体系；接着，基于保底电网的基本定义，分析了含微电网的保底电网网架构建的主要问题，提出了本文的技术路线；然后，分析了结合生存性综合指标和网架大小，建立了含微电网的保底电网网架构建的搜索模型；最后，通过算例验证了所提方法的有效性。

1 元件重要性评估

1.1 元件重要性评估基本思想

含微电网的保底电网网架构建的关键是得到重要电源、负荷、微电网以及支路的理想组合。组成保底电网网架的元件主要为支路和节点，通过对网架中节点和支路的重要性进行评估，根据重要性进行筛选，并对重要支路和节点进行网架结构的加强，进而实现保底电网网架的构建。因此，支路和

节点重要性评估是构建保底电网网架的基础^[18-20]。

图 1 所示为含微电网的保底电网元件重要性评估的基本思想。首先，采用风险理论对支路重要度进行评估；接着，基于支路重要性评估结果，对节点关键度进行评估，并结合节点关键度和节点接近度对节点重要度进行评估；然后，考虑到微电网的优越性，对微电网所在节点的重要度进行修正，进而得到节点重要性评估结果。

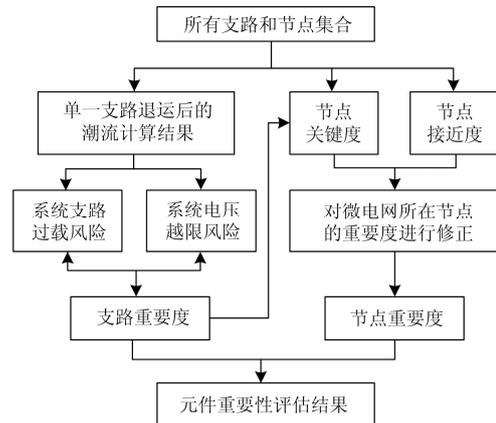


图 1 元件重要性评估的基本思想

Fig. 1 Basic idea of component importance evaluation

支路退运可能给系统带来支路过载、电压越限等危害，通过计算支路退运后的风险，可直观地反映系统所遭受的危害程度。因此，可通过支路退运后的潮流计算，得到系统相关状态变量的结果，并结合风险评估原理计算系统支路、电压越限的风险指标，进而得到支路重要度。节点重要度不仅取决于节点在网架中的位置，还取决于与其相连的支路重要度。因此，对节点进行重要性评估时，应充分考虑节点关键度和节点接近度的影响。支路/节点重要度越大，说明该支路/节点越重要。

1.2 支路重要性评估

系统风险是衡量系统不确定性因素的可能性和严重性的综合指标^[21-23]，即风险 $Risk(X)$ 包含事件发生的概率及其造成的后果这两部分，数学定义式为

$$Risk(X) = P(E) \cdot S(E) \quad (1)$$

式中： X 为当前电力系统的状态； E 为系统的某个不确定因素； $P(E)$ 、 $S(E)$ 分别为该不确定因素发生的概率和其引起的后果。

本文根据支路退运后的系统支路过载风险和电压越限风险对支路进行重要性评估，并建立支路重要度指标 D_i 。已知节点的注入功率 P 、 Q ，可求得正常条件下所有支路的有功潮流 P 和所有节点电压的幅值 V 。假设支路 i 退运，则所有支路的有功潮流 P_{i} 和所有节点的模糊电压幅值 V_{i} 分别为

$$\begin{cases} \mathbf{P}_{l,i} = \mathbf{P} + \Delta\mathbf{P}_{l,i} \\ \mathbf{V}_{l,i} = \mathbf{V} + \Delta\mathbf{V}_{l,i} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\Delta\mathbf{P}_{l,i}$ 、 $\Delta\mathbf{V}_{l,i}$ 分别为各支路有功功率增量和各节点电压幅值增量。

支路 i 退运引起的支路 j 过载损失值 $\omega(l_{j,i})$ 可表示为^[16]

$$\omega(l_{j,i}) = \begin{cases} l_{j,i} - 0.9, & l_{j,i} > 0.9 \\ 0, & 0 \leq l_{j,i} < 0.9 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $l_{j,i}$ 为支路 i 退运情况下支路 j 的有功潮流与支路 j 所能承受的极限功率之比。

支路 i 退运引起的节点 a 的电压越限损失值 $\omega(u_{a,i})$ 可表示为^[17]

$$\omega(u_{a,i}) = \begin{cases} u_{a,i} - 1.05, & u_{a,i} > 1.05 \\ 0.95 - u_{a,i}, & u_{a,i} < 0.95 \\ 0, & 0.95 \leq u_{a,i} \leq 1.05 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $u_{a,i}$ 为支路 i 退运情况下节点 a 的电压幅值与节点 a 的额定电压之比。

因此, 支路 i 的重要度 $D_{l,i}$ 可按照式(5)计算。

$$D_{l,i} = Risk_{l,i} = p_{l,i} \cdot \left[\sum_{j=1}^{N_l} \omega(l_{j,i}) + \sum_{a=1}^{N_n} \omega(u_{a,i}) \right] \quad (5)$$

式中: $j=1,2,\dots,N_l$, $a=1,2,\dots,N_n$, N_l 、 N_n 分别为原始网架中支路和节点数量; $Risk_{l,i}$ 为支路 i 退运的风险指标; $p_{l,i}$ 为支路 i 的退运概率; 则原始网架中的支路重要度指标 $\mathbf{D}_l = [D_{l,1} \ D_{l,2} \ \dots \ D_{l,i} \ \dots \ D_{l,N_l}]$ 。

1.3 考虑微电网的节点重要性评估

若网络中起点为节点 a , 终点为节点 b 的最短路径包含边的数目为 $n_l(a, b)$, 则对节点 a 而言, 定义其接近度 C_a 为

$$C_a = 1 / \sum_{b=1}^{N_n} n_l(a, b) \quad (6)$$

基于支路重要度指标 \mathbf{D}_l , 定义节点关键度 K_a 为与节点 a 相连的所有支路的重要度之和, 即

$$K_a = \sum_{c=1}^{N_{n,a}} D_{l,a-c} \quad (7)$$

式中: $N_{n,a}$ 为原始网架中与节点 a 相连的所有支路的数目; $D_{l,a-c}$ 为连接节点 a 和 c 的支路的重要度。

节点接近度描述了节点居于网络中心的状况。节点接近度 C_a 越大, 节点越靠近网络中心, 则其在全局网络中相对更重要。节点关键度 K_a 越大, 则其相连支路重要度越高, 表明节点在其所在的邻域内越重要, 即从整个网架的角度考虑, 该节点重要度越大。

将节点的重要度定义为节点接近度和节点关

键度的综合效应, 如式(8)所示。

$$D'_a = C_a \times K_a = \sum_{c=1}^{N_{n,a}} D_{l,a-c} / \sum_{b=1}^{N_n} n_l(a, b) \quad (8)$$

式中: D'_a 表示不考虑微电网特殊性时, 节点 a 的重要度; 此时原始网架中的节点重要度指标 $\mathbf{D}' = [D'_1 \ D'_2 \ \dots \ D'_a \ \dots \ D'_{N_{n,a}}]$ 。

由于微电网具有运行方式灵活、可靠性强、可控性强的特点, 因此在构建保底电网时, 应尽量使更多的保底电网保留下来。因此, 对于含微电网的保底电网来说, 应对上述节点重要度 \mathbf{D}' 进行修正, 即将于微电网所连节点的重要度修正为所有电源节点重要度的最大值, 得到考虑微电网的节点重要度 $\mathbf{D} = [D_1 \ D_2 \ \dots \ D_a \ \dots \ D_{N_{n,a}}]$, 其中, D_a 为修正后节点 a 的重要度。

由上述分析可知, 节点接近度和关键度分别从网络拓扑结构以及节点邻域内支路重要性的角度反映节点重要度。支路重要性体现了网架的电气特性, 因此, 本文定义的节点重要度兼顾了电网的拓扑结构特性与电气特性。

2 保底电网的生存性指标体系

电网生存性是指在遭受严重自然灾害情况下, 电网能依托高设计标准的保底电网来保证对重要负荷的供电, 并依靠保底电网逐步恢复对其余负荷供电。考虑到含微电网的保底电网与传统保底电网的不同, 迫切需要建立一种新的电网生存性评估指标及方法使其满足差异化规划的客观需求。

如图2所示, 含微电网的保底电网的生存性指标体系共包括三级指标: 一级指标为生存性综合指标 $Surv$; 二级指标包括抵抗性指标、安全性指标和恢复性指标; 各二级指标的细化指标为三级指标。其中, 第 $n(n=1,2)$ 级指标可由第 $n+1$ 级指标按以下原则进行计算。

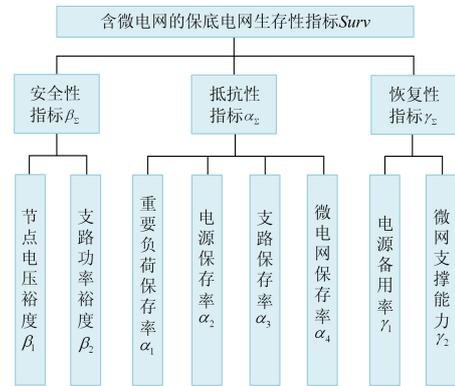


图2 含微电网的保底电网生存性指标体系

Fig. 2 Survivability index system for the secure power network with microgrids

设向量 $\mathbf{R} = (R_1, R_2, \dots, R_k)^T$ 为代表生存性 n 级指标的单项风险指标向量, k 为其下级($n+1$ 级)指标的总数, 则能定义 n 级生存性指标为

$$R_n = a_1 \times \frac{1}{k} \|\mathbf{R}\|_1 + b_1 \times \|\mathbf{R}\|_\infty \quad (9)$$

式中: a_1 、 b_1 为权重系数, 且 $a_1 + b_1 = 1$; $\|\mathbf{R}\|_1$ 和 $\|\mathbf{R}\|_\infty$ 分别为向量 \mathbf{R} 的 1 范数和 ∞ 范数。

$$\|\mathbf{R}\|_1 = \sum_{i=1}^k R_i \quad (10)$$

$$\|\mathbf{R}\|_\infty = \max |R_i| \quad (11)$$

式中, R_i 是 n 级指标的第 i 个单项指标值。

因此, 基于保底电网的安全性指标 β_Σ 、抵抗性指标 α_Σ 和恢复性指标 γ_Σ , 可求得保底电网的生存性综合指标 $Surv$ 如式(12)所示。

$$Surv = a \times \frac{1}{3} \|\mathbf{R}\|_1 + b \times \|\mathbf{R}\|_\infty \quad (12)$$

式中: $\mathbf{R} = (\beta_\Sigma, \alpha_\Sigma, \gamma_\Sigma)^T$; a 、 b 为权重系数, 且 $a+b=1$ 。

2.1 安全性指标

安全性指标反映了保底电网当前运行状态与极限运行状态间的距离, 可由节点电压裕度和支路功率裕度指标进行量化。保底电网中节点电压裕度/支路功率裕度越大, 保底电网越安全^[24-25]。

1) 节点电压裕度

节点电压裕度是指考虑节点重要度的情况下, 保底电网中所有节点的电压幅值距离额定值的裕度之和, 可表示为

$$\beta_1 = \sum_{b=1}^{M_n} \eta_{D,b} \cdot \Delta U'_b \quad (13)$$

$$\eta_{D,b} = D_b / \sum_{a=1}^{N_n} D_a \quad (14)$$

$$\Delta U'_b = \begin{cases} \frac{U'_b - U_{b,N}}{U_{b,\max} - U_{b,N}}, & U'_b > U_{b,N} \\ \frac{U_{b,N} - U'_b}{U_{b,N} - U_{b,\min}}, & U'_b \leq U_{b,N} \end{cases} \quad (15)$$

式中: M_n 为保底电网中的节点数量; $\eta_{D,b}$ 为节点 b 的重要度权重; $\Delta U'_b$ 为保底电网中节点 b 的电压裕度; D_a 、 D_b 分别为节点 a 、 b 的重要度; U'_b 为保底电网中节点 b 的电压幅值; $U_{b,N}$ 、 $U'_{b,\max}$ 分别为节点 b 的电压额定值和最大值。

2) 支路功率裕度

支路功率裕度是指考虑支路重要度的情况下, 保底电网中所有支路的有功功率距离该支路允许的最大有功功率的裕度之和, 可表示为

$$\beta_2 = \sum_{j=1}^{M_l} \eta_{l,j} \cdot \Delta P'_j \quad (16)$$

$$\eta_{l,j} = D_{l,j} / \sum_{i=1}^{N_l} D_{l,i} \quad (17)$$

$$\Delta P'_j = \frac{P_{j,\max} - P'_j}{P_{j,\max}} \quad (18)$$

式中: M_l 为保底电网中的支路数量; $\eta_{l,j}$ 为支路 j 的重要度权重; $\Delta P'_j$ 为保底电网中支路 j 的功率裕度; $D_{l,j}$ 、 $D_{l,i}$ 分别为支路 j 、 i 的重要度; P'_j 为保底电网中支路 j 的有功潮流; $P_{j,\max}$ 为支路 j 上允许流过的最大有功功率。

基于节点电压裕度 β_1 和支路功率裕度 β_2 , 可建立保底电网的安全性指标 β_Σ 。

$$\beta_\Sigma = a_1 \times \frac{1}{2} \|\mathbf{R}\|_1 + b_1 \times \|\mathbf{R}\|_\infty \quad (19)$$

式中: $\mathbf{R} = (\beta_1, \beta_2)^T$; a_1 、 b_1 为权重系数, 且 $a_1 + b_1 = 1$ 。

2.2 抵抗性指标

抵抗性指标反映了保底电网向重要负荷供电的服务对自然灾害的抵抗能力, 可由电源保存率、支路保存率、重要负荷保存率和微网保存率指标进行量化。保底电网中电源/支路/重要负荷/微电网保存率越大, 保底电网抵抗性越强。

1) 电源保存率

电源保存率是指考虑电源节点权重的情况下, 保底电网中所有电源节点占原始网架总电源节点的比例, 可用来表征保底电网对电源节点的保障程度。保底电网的电源保存率可表示为

$$\alpha_1 = \sum_{d=1}^{M_{ng}} \mu_{g,d} \quad (20)$$

$$\mu_{g,d} = P_{g,d} / \sum_{c=1}^{N_{ng}} P_{g,c} \quad (21)$$

式中: $\mu_{g,d}$ 为电源节点 d 的权重; M_{ng} 、 N_{ng} 分别为保底电网和原始网架中的电源节点数量; $P_{g,d}$ 、 $P_{g,c}$ 分别为原始网架中电源节点 d 、 c 的有功功率。

2) 支路保存率

支路保存率是指考虑支路权重的情况下, 保底电网中所有支路占原始网架总支路的比例, 可用来表征保底电网对支路的保障程度。保底电网的支路保存率可表示为

$$\alpha_2 = \sum_{j=1}^{M_l} \mu_{l,j} \quad (22)$$

$$\mu_{l,j} = P_{l,j} / \sum_{i=1}^{N_l} P_{l,i} \quad (23)$$

式中: μ_{lj} 为支路 j 的权重; P_{lj} 、 P_{li} 分别为原始网架中支路 j 、 i 上流过的有功功率。

3) 重要负荷保存率

重要负荷保存率是指考虑节点权重的情况下, 保底电网中所有负荷占原始网架总负荷的比例, 用来表征保底电网对重要负荷的保障程度。保底电网的重要负荷保存率可表示为

$$\alpha_3 = \sum_{k=1}^{M_{nd}} \eta_{d,k} \quad (24)$$

$$\eta_{d,k} = D_{d,k} / \sum_{h=1}^{N_{nd}} D_{d,h} \quad (25)$$

式中: $\eta_{d,k}$ 为负荷节点 k 的重要度权重; M_{nd} 、 N_{nd} 分别为保底电网和原始网架中的负荷节点数量; $D_{d,k}$ 、 $D_{d,h}$ 分别为原始网架中负荷节点 k 、 h 的重要度。

4) 微网保存率

微网保存率是指考虑微网权重的情况下, 保底电网中所有微网占原始网架总微网的比例, 用来表征保底电网对微网的保障程度。保底电网的微网保存率可表示为

$$\alpha_4 = \sum_{f=1}^{M_s} \mu_{s,f} \quad (26)$$

$$\mu_{s,f} = P_{s,f} / \sum_{e=1}^{N_s} P_{s,e} \quad (27)$$

式中: $\mu_{s,f}$ 为微电网 f 的权重; M_s 、 N_s 分别为保底电网和原始网架中的微网数量; $P_{s,f}$ 、 $P_{s,e}$ 分别为原始网架中微电网 f 、 e 向外输出的有功功率。

基于负荷保存率 α_1 、电源保存率 α_2 、支路保存率 α_3 和微网保存率 α_4 , 可建立保底电网的抵抗性指标 α_2 。

$$\alpha_2 = a_2 \times \frac{1}{4} \|\mathbf{R}\|_1 + b_2 \times \|\mathbf{R}\|_\infty \quad (28)$$

式中: $\mathbf{R} = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)^T$; a_2 、 b_2 为权重系数, 且 $a_2 + b_2 = 1$ 。

2.3 恢复性指标

恢复性指标反映了保底电网向原始网架恢复的能力, 可由电源备用率和微网支撑能力进行量化。保底电网中电源备用率/微网支撑能力越大, 保底电网恢复性越强。

1) 电源备用率

电源备用率是指考虑电源节点权重的情况下, 保底电网中所有电源的功率裕度之和, 用来表征保底电网向原始电网的恢复能力。保底电网的电源备用率可表示为

$$\gamma_1 = \sum_{d=1}^{M_g} \mu_{g,d} \cdot \Delta P'_{g,d} \quad (29)$$

$$\mu_{g,d} = P_{g,d} / \sum_{c=1}^{N_{g,c}} P_{g,c} \quad (30)$$

式中, $\Delta P'_{g,d}$ 为保底电网电源节点 d 的功率裕度。

2) 微网支撑能力

微网支撑能力是指考虑微网节点权重的情况下, 保底电网中所有微网输出的功率裕度之和, 用来表征保底电网向原始电网的恢复能力。微网支撑能力可表示为

$$\gamma_2 = \sum_{f=1}^{M_s} \mu_{s,f} \cdot \Delta P'_{s,f} \quad (31)$$

式中, $\Delta P'_{s,f}$ 为保底电网中微网 f 的功率裕度。

基于电源备用率 γ_1 和微电网对保底电网的支撑能力 γ_2 , 建立保底电网的恢复性指标 γ_Σ 。

$$\gamma_\Sigma = a_3 \times \frac{1}{2} \|\mathbf{R}\|_1 + b_3 \times \|\mathbf{R}\|_\infty \quad (32)$$

式中: $\mathbf{R} = (\gamma_1, \gamma_2)^T$; a_3 、 b_3 为权重系数, 且 $a_3 + b_3 = 1$ 。

3 含微电网的保底电网网架构建方法

3.1 基本思想

含微电网的保底电网网架构建的关键是得到微电网、保障电源、重要负荷和战略性输电支路通道, 以及其连通性作用的传输支路与节点的理想组合。在构建网架时, 应尽量提高含微电网的保底电网的安全性、抵抗性、恢复性, 进而提高其生存性, 增大极端情况下电网的保电保负荷能力。

如图3所示, 从安全性的角度来说, 在构建含微电网的保底电网网架时, 应满足电网安全运行约束和拓扑连通性约束。从抵抗性的角度来说, 尽量多地保留输出/流经功率较大的电源、支路; 应使保底电网中微电网的数量尽量多; 应保证尽量多的重要负荷的持续供电。从恢复性的角度来说, 应尽量提高保障电源的备用功率和微网对保底电网的支撑能力。然而, 基于保底电网的基本定义, 为提高电力系统的经济性, 避免过多地对元件进行改造和升级, 应建设较小规模的保底电网网架。因此, 在构建含微电网的保底电网网架时, 经济性与生存性存在矛盾, 应通过优化的方式解决。

针对上述问题, 本文提出的含微电网的保底电网网架构建流程如图4所示。首先, 对含微电网的保底电网的支路、节点进行重要度评估, 得到支路重要度指标和考虑微电网的节点重要度指标; 接着, 基于含微电网的保底电网的抵抗性、安全性和恢复性指标, 建立保底电网的生存性指标体系; 其次, 综合考虑保底电网的生存性综合指标和网架大小,

建立含微电网的保底电网网架构建的数学模型；最后，采用人工智能算法得到保底电网的规划方案。

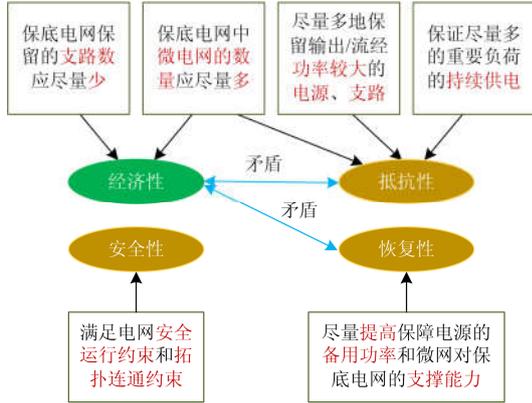


图3 关键问题

Fig. 3 Key problem

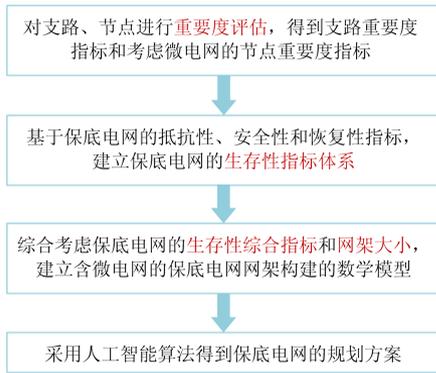


图4 含微电网的保底电网网架构建流程

Fig. 4 Network planning process of the secure power network with microgrids

3.2 保底电网网架的搜索模型

保底电网网架搜索是一个多目标优化问题，目标函数的最小化等价于力求寻找保证网架线路总长度较短的同时满足生存性综合指标较大的保底电网网架方案。因此，含微电网的保底电网的网架构建的数学模型的目标函数可表示为

$$f = \min \frac{M_l/N_l}{Surv} \quad (33)$$

针对上述目标函数，相应的含微电网的保底电网的网架构建应满足以下约束条件：

1) 网络连通性约束

$$\phi(x) = 1 \quad (34)$$

式中， $\phi(x)$ 为含微电网的保底电网网络连通性判断函数， $\phi(x)=1$ 说明保底电网是连通的， $\phi(x)=0$ 说明保底电网是不连通的。

2) 潮流等式约束

$$\sum_{d=1}^{M_{ng}} P'_{g,d} + \sum_{f=1}^{M_s} P'_{s,f} = \sum_{k=1}^{M_{nd}} P'_{d,k} \quad (35)$$

式中： $P'_{g,d}$ 为含微电网的保底电网中电源 d 输出的有功功率； $P'_{s,f}$ 为微电网 f 向外输出的有功功率； $P'_{d,k}$ 为负荷节点 k 的有功功率。

3) 电源出力约束

$$0 \leq P'_{g,d} \leq P_{g,d,max} \quad (36)$$

式中， $P_{g,d,max}$ 为电源节点 d 的有功功率上限。

4) 微电网向外输出的有功功率约束

$$P'_{s,f} \leq P_{s,f,max} \quad (37)$$

式中， $P_{s,f,max}$ 为微电网 f 向外输出的最大有功功率。

5) 节点电压约束

$$U_{b,min} \leq U'_b \leq U_{b,max} \quad (38)$$

式中， $U_{b,min}$ 和 $U_{b,max}$ 分别节点 b 的电压上、下限。

4 算例分析

下文以改进的 IEEE 39 节点系统为算例进行分析计算，以验证上述方法的有效性。改进的 IEEE 39 节点系统如图 5 所示，主要是将标准 IEEE 39 节点系统的电源节点 32、35 和 37 改为微电网并网点，并用蓝色标出。此外，节点 30、31、33、34、36、38、39 为同步发电机组对应的节点。

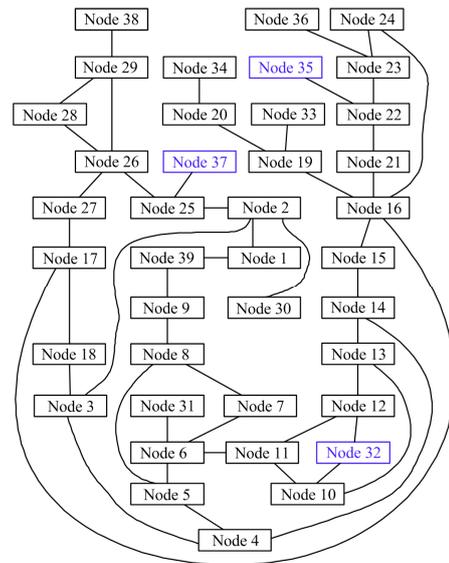


图5 改进的 IEEE 39 节点系统图

Fig. 5 Improved IEEE 39 node system diagram

本算例对以下两种方法进行对比分析。方法一为文献[6]所提一种城市防风抗灾保底电网的多目标规划方法，并将微电网接入点视为普通电源节点。方法二为本文所提基于生存性评估的含微电网的保底电网网架构建方法。其中，方法一不需要进行元

件重要性评估, 负荷节点 7、8、13、15、16、25、29 为重要负荷。

图 6 为根据方法一所得到的保底电网网架结构。对比图 5 和图 6 可得, 保底电网相比于原始网架的保存情况, 其中, 负荷保存率为 52.94%, 电源保存率为 42.86%, 微电网保存率为 33.3%。由此可知, 采取方法一时, 保底电网中微电网保存率较低, 无法充分发挥微电网的优越性。

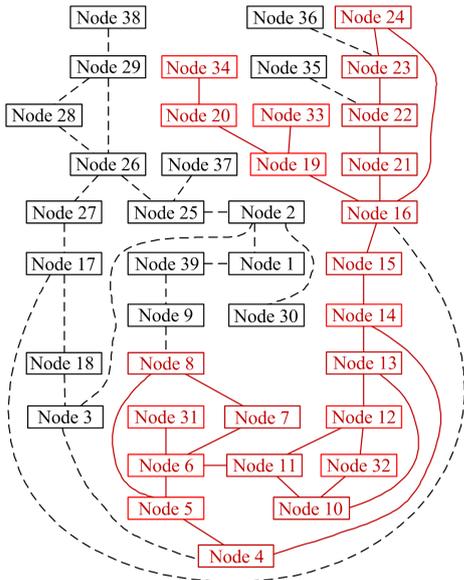


图 6 方法一的保底电网的网架结构

Fig. 6 Network planning of the secure power network of the first method

针对方法二, 首先基于文献[7]中原始网架的各个支路对应的退运概率, 计算单一支路退运后系统的节点电压越限风险和支路过载风险指标, 进而得到整个系统中所有支路的重要度, 如图 7 所示。其次, 基于支路重要度指标和节点在网架中的位置, 并对微电网节点进行修正, 可得到修正前后整个系统中所有节点的重要度, 如图 8 所示。

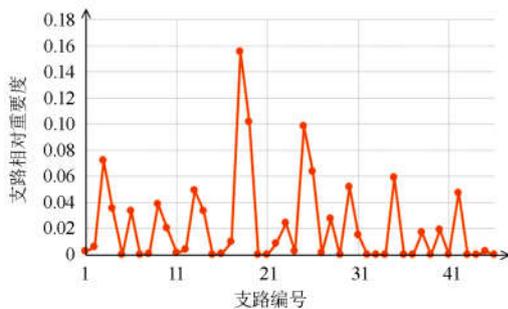


图 7 系统中各支路重要度

Fig. 7 Importance of each branch in the system

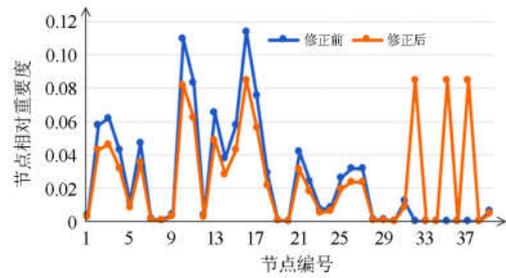


图 8 系统中各节点重要度

Fig. 8 Importance of each node in the system

接着, 根据方法二所提的基于生存性评估的含微电网的保底电网网架构建方法, 对改进的 IEEE 39 节点系统进行网架搜索, 在满足约束条件的基础上, 得到了最优的保底电网的网架结构。保底电网的网架结构如图 9 红色标注所示。对比图 6 和图 9 可知, 与方法二相比, 方法一不仅微电网保存率低, 且无法保证部分重要电源的正常供电, 如电源节点 39, 此外, 方法一还无法确保能够保留重要节点, 如连通性节点 17。如表 1 所示为采取方法二时, 保底电网相比于原始网架的保存情况。

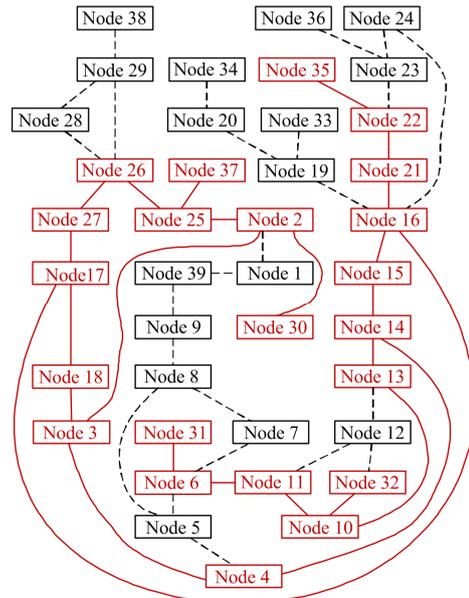


图 9 方法二的保底电网的网架结构

Fig. 9 Network planning of the secure power network of the second method

由表 1 可知, 保底电网的负荷节点、电源节点和微电网的保存率分别为 58.82%、28.57%和 100%, 且保留下来的负荷节点和电源节点的重要度较高。但是, 除重要负荷、电源、微电网节点外, 还需保留部分重要度较低连通性节点和支路, 进而保障保底电网的连通性。例如, 节点 22 的重要度较低, 但

为使保底电网中含有尽量多的微电网，微电网并网点 35 应被保留下来，而与节点 35 相连的只有节点 22，因此，节点 22 应作为连通性节点保留在保底电网中。所求得的保底电网的二级指标(安全性、抵抗

性、可恢复性)和三级指标(节点电压裕度、支路功率裕度、重要负荷保存率、电源保存率、支路保存率、微网保存率、电源备用率、微网支撑能力)的计算值，如表 2 所示。

表 1 方法二的保底电网相比于原始网架的保存情况

Table 1 Preservation of the secure power network compared to the original network of the second method

	原始网架	保底电网	保存率
负荷节点	3、4、7、8、13、15、16、18、20、21、23、24、25、26、27、28、29	3、4、13、15、16、18、21、25、26、27	58.82%
电源节点	30、31、33、34、36、38、39	30、31	28.57%
微电网并网点	32、35、37	32、35、37	100.0%
连通性节点	1、2、5、6、9、10、11、12、14、17、19、22	2、6、10、11、14、17、22	58.33%
支路	1-2、1-39、2-3、2-25、2-30、3-4、3-18、4-5、4-14、5-6、5-8、6-7、6-11、6-31、7-8、8-9、9-39、10-11、10-13、10-32、12-11、12-13、13-14、14-15、15-16、16-17、16-19、16-21、16-24、17-18、17-27、19-20、19-33、20-34、21-22、22-23、22-35、23-24、23-36、25-26、25-37、26-27、26-28、26-29、28-29、29-38	2-3、2-25、2-30、3-4、3-18、4-14、6-11、6-31、10-11、10-13、10-32、13-14、14-15、15-16、16-17、16-21、17-18、17-27、21-22、22-35、25-26、25-37、26-27	50.00%

表 2 保底电网的二级和三级指标值

Table 2 Secondary and tertiary index values of the secure power network

三级指标	节点电压裕度	支路功率裕度	重要负荷保存率	电源保存率	支路保存率	微网保存率	电源备用率	微网支撑能力
	0.499 939	0.540 639	0.495 426	0.299 369	0.579 212	1	0.065 622	0.221 225
二级指标	安全性			抵抗性		恢复性		
	0.530 464			0.796 751		0.182 324		

5 结论

针对含微电网的保底电网网架规划方法的欠缺，本文计及微电网对保底电网网架构建的影响，提出了面向保底电网网架规划的生存性指标体系，建立了含微电网的保底电网网架搜索模型，从而提出了一种基于生存性评估的含微电网的保底电网网架的构建方法。所提出的方法能够在满足网络连通性、潮流、电源出力约束的基础上，兼顾保底电网网架的生存性，能够保证在严重自然灾害下重要负荷的持续供电和保底电网的安全运行并提高保底电网的快速复电能力。

参考文献

[1] 刘佳, 程浩忠, 李思韬, 等. 兼顾供电能力和安全裕度的智能配电网协调运行优化方法[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3532-3538.
LIU Jia, CHENG Haozhong, LI Sitao, et al. Coordinated operation optimization method of smart distribution system considering total supply capability and security margin[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3532-3538.

[2] 肖峻, 张苗苗, 祖国强, 等. 配电系统安全域的体积[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(8): 2222-2230.
XIAO Jun, ZHANG Miaomiao, ZU Guoqiang, et al. Volume of distribution system security region[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(8): 2222-2230.

[3] IZADDOOST A, SHAHHEYDARI S. Proactive risk mitigation for communication network resilience in disaster scenarios[J]. Journal of Cognitive Neuroscience, 2014, 23(10): 2701-2715.

[4] ARAB A, KHODAEI A, ZHU Han, et al. Proactive recovery of electric power assets for resiliency enhancement[J]. IEEE Access, 2015, 3: 99-109.

[5] 徐国新, 夏清, 康重庆. 电网抗灾投资决策方法研究[J]. 电力自动化设备, 2010, 34(3): 17-21.
XU Guoxin, XIA Qing, KANG Chongqing. Practicing different design for improving grid ability against calamity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(3): 17-21.

[6] 郇嘉嘉, 韦斌, 隋宇, 等. 一种城市防风抗灾保底电网的多目标规划方法[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 927-932.
HUAN Jijia, WEI Bin, SUI Yu, et al. A multi-objective planning method of urban secure power networks guaranteed against typhoon and disaster[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 927-932.

[7] 段瑶, 龚贤夫, 左郑敏, 等. 沿海地区差异化的防风保底电网构建方法[J]. 水电能源科学, 2017, 35(12): 196-199.
DUAN Yao, GONG Xianfu, ZUO Zhengmin, et al. Differentiated method of planning minimum typhoon resistance power grid of coastal area[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(12): 196-199.

- [8] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇, 等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 100-107.
LU Zongxiang, WANG Caixia, MIN Yong, et al. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 100-107.
- [9] JIN Zheming, MENG Lexuan, GUERRERO J M, et al. Hierarchical control design for a shipboard power system with DC distribution and energy storage aboard future more-electric ships[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 14(2): 703-714.
- [10] XU Wanwan, CHENG Yan, WANG Bin. Microgrid influence on power quality of distribution system and its solution[C] // 2014 International Conference on Power System Technology, October 20-22, 2014, Chengdu, China: 3366-3370.
- [11] 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.
- [12] 黎灿兵, 梁锦照. 电网差异化规划新方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24): 11-15.
LI Canbing, LIANG Jinzhao. A novel method of power grid differential planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(24): 11-15.
- [13] 董飞飞, 刘涤尘, 吴军, 等. 基于改进 BBO 优化算法和电网生存性的核心骨干网架构建[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2659-2667.
DONG Feifei, LIU Dichen, WU Jun, et al. A method of constructing core backbone grid based on improved BBO optimization algorithm and survivability of power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2659-2667.
- [14] 宋春丽, 刘涤尘, 吴军, 等. 考虑气象因素的电网差异化规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(12): 1-6.
SONG Chunli, LIU Dichen, WU Jun, et al. Differential power network planning considering weather factors[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(12): 1-6.
- [15] 潘旭东, 吴军, 刘涤尘, 等. 基于元件重要度的差异化规划核心骨干网架构建方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(19): 40-46.
PAN Xudong, WU Jun, LIU Dichen, et al. A method for constructing core backbone grid in differential planning based on importance degrees of components[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 40-46.
- [16] 董飞飞. 大电网差异化规划理论及实现方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2015.
DONG Feifei. Study on the theory and implementation method of the differential planning of power system[D]. Wuhan: Wuhan University, 2015.
- [17] 汪凯. 电网差异化核心骨干网架构建及其评估方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
WANG Kai. Research on differential construction and evaluation method of the core backbone network of power grid[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.
- [18] LIU Y, MELIOPOULOS A P, SUN L, et al. Protection and control of microgrids using dynamic state estimation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(4): 340-352. DOI: 10.1186/s41601-018-0104-2.
- [19] 胡雪凯, 张乾, 胡文平, 等. 分布式光伏对线路自动重合闸的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 27(17): 75-82.
HU Xuekai, ZHANG Qian, HU Wenping, et al. Research on fault characteristics of distributed photovoltaic system in distributed network based on RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2019, 27(17): 75-82.
- [20] 李香龙, 付晓, 朱洁, 等. 含分布式电源的配电网分区和主导节点选取方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 24-29.
LI Xianglong, FU Xiao, ZHU Jie, et al. Research on partition method and selection of dominant nodes for distribution network with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2019(13): 24-29.
- [21] ZHANG Delong, LI Jianlin, HUI Dong. Coordinated control for voltage regulation of distribution network voltage regulation by distributed energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 35-42. DOI: 10.1186/s41601-018-0077-1.
- [22] SUN H, GUO Q, ZHANG B, et al. An adaptive zone division-based automatic voltage control system with applications in China[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1816-1828.
- [23] MIRELA O, SIMON D. Biogeography-based optimization of neuro-fuzzy system parameters for diagnosis of cardiac disease[C] // Proceedings of the 12th Annual Genetic and Evolutionary Computation Conference, July 7-11, 2010, Portland, USA: 1235-1242.
- [24] BLASIO R D E, TOM C. Standards for the smart grid[C] // Proceedings of IEEE Energy 2030 Conference, 2008, Atlanta, GA, USA: 7p.
- [25] 单政博. 电网重要节点、脆弱线路及骨干网架识别研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
SHAN Zhengbo. Research on identifications of important node, vulnerable transmission line and backbone grid[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.

收稿日期: 2019-12-27; 修回日期: 2020-02-19

作者简介:

岑海凤(1985—), 女, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向为配电网规划。E-mail: cenghanfeng@hotmail.com

(编辑 周金梅)