

计及源荷不确定性的配电网负荷转供优化模型

赵化达¹, 舒征宇¹, 姚钦², 童华敏², 付军军¹, 李欣¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 国网湖北省电力有限公司宜昌供电公司, 湖北 宜昌 443000)

摘要: 在配电网不停电负荷倒换过程中, 进行合解环操作时形成的合环电流较大, 会导致负荷转供失败, 而且随着新能源的接入, 负荷转供的情况也越来越复杂。为快速、高效进行配电网的负荷转供, 提出了计及源荷不确定性的配电网负荷转供优化模型。首先, 提出了度量传输元件耦合特性的计算方法, 即传输阻抗式的电气距离方法, 通过刻画元件之间的耦合程度达到降低合环电流的目标, 形成电气距离约束条件。然后结合负荷转供的安全约束条件和开关总动作次数最少的目标函数分析分布式发电(distributed generation, DG)和负荷的不确定性, 获得合环电流机会约束, 建立了计及源荷不确定性的负荷转供优化模型。最后对某地区配电网接线进行分析, 验证了所提模型的可行性和有效性。

关键词: 耦合特性; 电气距离; 转供优化; 合环电流; 不确定性

Optimization Model of Load Transfer in Distribution Network Considering Source and Load Uncertainties

ZHAO Huada¹, SHU Zhengyu¹, YAO Qin², TONG Huamin², FU Junjun¹, LI Xin¹

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443000, China;

2. Yichang Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Yichang, Hubei 443000, China)

Abstract: In the process of reversing the load of the distribution network, the loop current formed during the loop operation is large, resulting in the failure of the load transfer, and with the access of new energy, the load transfer is more and more complex. In order to quickly and efficiently conduct the load transfer of distribution network, a load transfer optimization model of source and load uncertainty is proposed. Firstly, the calculation method of measuring the coupling characteristics of the transmission element namely the transmission impedance electrical distance method is proposed. By describing the coupling degree between elements, the goal of reducing the loop current is achieved, forming an electrical distance constraint condition. Then, by integrating the safety constraints of load transfer and the objective function of minimizing the total number of switch operations, the uncertainties of distributed generation (DG) and load are analyzed to obtain the chance constraints of loop closing current, establishing an optimal load transfer model that accounts for the uncertainties of sources and loads. Finally, the wiring configuration of a regional distribution network is analyzed to verify the feasibility and effectiveness of the proposed model.

Key words: coupling characteristic; electrical distance; transfer optimization; loop closing current; uncertainty

0 引言

配电网进行负荷转供时, 会产生较大的合环电流, 并且合环瞬间的冲击电流可能会使保护误动, 造成用户停电, 大大降低了供电可靠性^[1]。配电网传输元件之间存在着一定耦合关系, 会影响合环电

流的大小, 有利于主动调控合环条件, 实现指定路线负荷转供, 并且随着分布式能源的大规模接入, 受分布式能源出力的不确定性影响导致负荷转供过程中的合环特性也不明确, 大大增加了负荷转供的复杂性, 对成功实现负荷转供的产生了较大的影响。因此, 如何在分布式能源高渗透率的情况下充分利用元件耦合关系使合环过程满足合环电流约束, 实现安全和可靠的负荷转供是提高供电可靠性需要解决的重要问题。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52107107)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52107107).

目前对于主动改善合环条件的研究主要方法分为两种：一是通过分析合环影响因素，利用电网现有设备改善合环条件。如文献[2]研究调节主变分接头以改变合环路径等效阻抗或增减无功补偿器改变线路潮流和电压差从而改善合环条件。文献[3]提出调整母线并列分列运行方式可增大环路阻抗进而降低合环电流；二是针对合环需求新增设备，实现精准调控。文献[4]分析了合环操作的稳定性影响因素，使用静止同步补偿装置作为合环辅助装置参与合环操作，并采用下垂调节的控制策略实现维持负载电压稳定的目的，以进行不停电合环转供电。文献[5]针对由于电压相位差引起合环问题引入串联变压器实现静态补偿，调整两端电压差，再通过四象限变流器实现动态补偿，实现对电压和相位精准调节，以此调节合环条件，完成合环操作。上述文献通过研究合环特性影响因素，依靠辅助设备改善合环条件，进而完成合环操作，但均没有考虑传输元件的耦合关系对于合环电流的影响，忽略了耦合关系对于改善合环条件、实现精准合环的可行性。

此外，为提高日益复杂的电网结构的供电可靠性，负荷转供是必要的手段之一，如文献[6]针对供电可靠性充分考虑负荷转的目标需求和安全约束建立了基于供电可靠性的负荷转供模型。文献[7]为提高供电可靠性，引入深度强化学习求解更加可靠和优越的负荷转供方案。文献[8]利用预测数据制定负荷转供方案，对电力系统的过载等情况起到一定的预警作用，提前制定方案。然而随着分布式能源接入越来越多，负荷转供的情况也越来越复杂，针对含分布式发电(distributed generation, DG)的负荷转供研究如：文献[9]分析了分布式能源对合环特性的影响，从而推导出计及分布式能源的合环电流计算方法。文献[10]通过分析 DG 出力对合环电流的影响，将 DG 作为调控手段参与负荷转供，从而建立了 DG 主动控制与合环协同的控制优化模型。文献[11]分析了多种 DG 接入对配电网保护的影响，对合环方案进行改进。文献[12]分析了 DG 参与合环调控的可行和操作流程，通过对比 DG 未接入和接入的两种转供方案分析验证了分布式能源的接入有利于负荷转供能力和提高负荷转供成功率。上述文献虽然考虑分布式能源参与负荷转供的影响，但均将负荷需求和 DG 出力当作定值处理，只体现了分布式能源对于负荷转供的有利方面，忽略了 DG

出力和负荷需求的不确定性对于合环特性的影响，容易造成合环稳态电流越限和关键节点电压越限等后果的问题，恶化合环条件，以致无法判断负荷转供方案能否成功，极大影响电网的供电可靠性。

鉴于上述分析，本文提出计及源荷不确定性的配电网负荷转供优化模型研究，主要分为以下两方面：一方面，提出配电网传输元件耦合特性的度量方法，即传输阻抗式电气距离的计算方法，通过计算节点之间的电气距离大小描述负荷转供路径之间的耦合强度，并选择开关总动作次数最少为目标函数，以及负荷转供后的功率平衡约束、线路载流量、辐射型网络结构约束和变电站负荷转供容量等约束条件，以此形成负荷转供模型。另一方面，考虑不确定性对合环电流的影响，通过刻画负荷、风电和光伏的概率分布模型，接着采用半不变量法(cumulant method, CM)计算节点电压和合环电流与负荷、风电和光伏的方程，然后利用级数展开得到节点电压和合环电流的累积分布特性，然后利用机会约束规划处理随机变量对约束条件的影响，获得合环电流暂稳态约束，并以电压偏移最少为目标函数对转供模型优化，最终确定负荷转供方案。

1 配电网传输元件耦合特性度量

电气距离计算方法主要分为阻抗式和灵敏度两种^[13]，其中传输阻抗式的电气距离计算方法表现最好，既能够反映节点之间电气量的联系，又可以反映空间距离的远近和对称性。首先按照单电源配电网中的某条支路为原型，假设某配电网中的节点*i*与节点*j*存在一条广义支路*i-j*功率传输关系如图1所示。

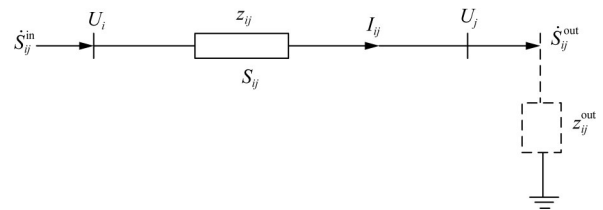


图1 潮流示意图

Fig. 1 Schematic diagram of power flow

由图1可得功率关系^[14]如式(1)~(3)所示。

$$\dot{S}_{ij}^{\text{in}} = \dot{U}_i \cdot (\dot{I}_{ij})^* = \Delta \dot{S}_{ij} + \dot{S}_{ij}^{\text{out}} \quad (1)$$

$$\dot{S}_{ij}^{\text{out}} = \dot{U}_j \cdot (\dot{I}_{ij})^* = z_{ij}^{\text{out}} \cdot \dot{I}_{ij} \cdot (\dot{I}_{ij})^* \quad (2)$$

$$\Delta \dot{S}_{ij} = (\dot{U}_i - \dot{U}_j) \cdot (\dot{I}_{ij})^* = z_{ij} \cdot \dot{I}_{ij} \cdot (\dot{I}_{ij})^* \quad (3)$$

联立式(1)–(3)可得:

$$\frac{z_{ij}}{z_{ij}^{\text{out}}} = \frac{\dot{S}_{ij}^{\text{in}}}{\dot{S}_{ij}^{\text{out}}} - 1 \quad (4)$$

式中: $\dot{S}_{ij}^{\text{out}}$ 为支路 $i-j$ 的输出功率; $\dot{S}_{ij}^{\text{in}}$ 为支路 $i-j$ 的注入功率; $\Delta \dot{S}_{ij}$ 为支路损耗功率; z_{ij}^{out} 为支路 $i-j$ 输出功率的等效阻抗; z_{ij} 为支路 $i-j$ 的阻抗; $\dot{U}_i$ 和 $\dot{U}_j$ 分别为节点 i 和 j 的电压; $\dot{I}_{ij}$ 为节点 i 和 j 之间的电流。

通过上述推导,由式(4)可知首末功率的关系,其中 z_{ij} 为支路 $i-j$ 的等效传输阻抗,表示节点 i 与节点 j 之间由于传输引起的功率损耗,可用来表示两点之间电气耦合关系。

对于多电源线路,需要考虑电源间的功率方向处理,以双电源供电支路为例,图2为其综合潮流示意图,图3为双电源各自的功率示意图。

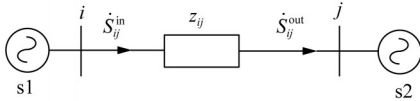


图2 综合潮流示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the integrated power flow

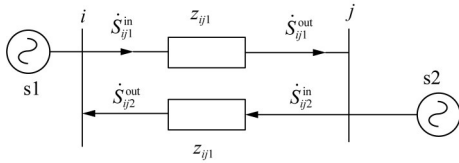


图3 双电源功率示意图

Fig. 3 Schematic diagram of dual power supply

由以上分析将按照与综合潮流同向与反向处理多电源系统功率分量,节点之间的传输阻抗为有限值,即说明节点之间传输关系时可当作两节点是相连的一条支路,传输阻抗越小,电气距离越近。

通过以上分析,首先,定义 l_1 和 l_2 两条负荷转供路径, A 和 B 分别为 l_1 和 l_2 转供路径中的节点集合,则可得负荷转供路径之间的电气距离为:

$$d_{l_1, l_2} = \sum_{i \in A} \sum_{j \in B} z_{ij} \quad (5)$$

式中: d_{l_1, l_2} 为负荷转供路径之间的电气距离; i 和 j 分别为 A 和 B 集合中的节点序号; z_{ij} 为两节点之间的电气距离。

2 基于元件耦合强度的配电网转供模型

为实现不停电合环,本文提出了一种考虑耦合

关系的负荷转供模型,通过考虑元件之间耦合关系,从而降低目标合环点的合环电流,使得目标合环点满足合环要求。

2.1 转供模型目标函数

在负荷转供过程中,为降低对电网的影响,需尽量减少电网运行方式的操作次数,因此目标函数^[15] f_1 为:

$$\min f_1 = \sum_{p=1}^{P_s} \|S_p - S_p^0\|^2 \quad (6)$$

式中: p 为第 p 个开关; S_p^0 和 S_p 分别为负荷转供前后线路开关 p 的运行状态,取值 0 和 1 分别表示断开和闭合; P_s 为总开关数量。

2.2 转供模型约束条件

1) 功率平衡

配电网转供后的 10 kV 线路上所接入的有功功率和主变压器需要保持有功平衡,即:

$$P_G - L_{s,n} S = 0 \quad (7)$$

式中: P_G 为 110 kV 变电站主变压器的有功功率; s 为开关; $L_{s,n}$ 为 10 kV 开关与变电站 n 之间拓扑关系的负荷系数行向量; S 为开关运行状态列向量。

以图4为例,图中 B1、B2 和 B3 分别为 10 kV 线路 F1 上 110 kV 站 A 的站内开关、10 kV 线路 F1 和 F2 之间的联络开关、10 kV 线路 F2 上 110 kV 站 B 的站内开关,它们均处于运行状态,则开关状态列向量为 $[1 \ 1 \ 1]$ 。 $\tilde{S}_a$ 、 $\tilde{S}_b$ 、 $\tilde{S}_{w2}$ 和 $\tilde{S}_{w3}$ 分别为 10 kV 线路 F1 注入功率、10 kV 线路 F2 注入功率、DG1 的注入功率和 DG2 的注入功率; $\tilde{S}_2$ 和 $\tilde{S}_3$ 分别为节点 2 负荷和节点 3 负荷,则负荷系数行向量如式(8)所示。

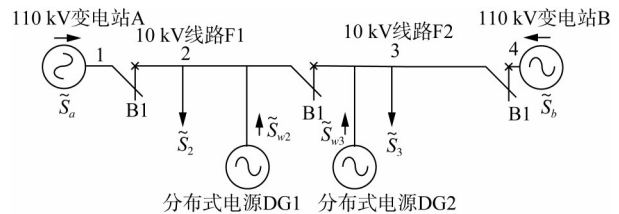


图4 10 kV 配电馈线合环示意图

Fig. 4 Schematic diagram of 10 kV power distribution feeder loop closure

$$\begin{cases} L_{s,A} = [P_2 + P_3 + P_{w2} + P_{w3} & P_3 + P_{w3} & -P_3 - P_{w3}] \\ L_{s,B} = [-P_2 - P_{w2} & P_2 + P_{w2} & P_2 + P_3 + P_{w2} + P_{w3}] \end{cases} \quad (8)$$

式中: $L_{s,A}$ 为以变电站 A 为参考点,合环后三段线

路的有功功率； $L_{s,B}$ 为以变电站B为参考点，合环后三段线路的有功功率； P_2 为节点2的负荷有功功率； P_3 为节点3的负荷有功功率； P_{w2} 为分布式电源DG1发出的有功功率； P_{w3} 为分布式电源DG2发出的有功功率。

2) 参与负荷转供的变电站容量约束

配电网负荷转供后需保证任意变电站主变负荷不会出现超载问题，即：

$$\sum_{j \in W_m} (S_j L_{s,j}^m) \leq P_m^s \quad (9)$$

式中： m 为变电站序号； W_m 为接入变电站 m 的所有馈线集合； $L_{s,j}^m$ 为10 kV馈线 j 上的开关与变电站 m 的负荷系数行向量； S_j 为开关运行状态列向量； P_m^s 为变电站 m 的主变压器总容量。

3) 线路传输功率约束

负荷转供后，为防止线路过载，需保证任意馈线上的负荷均不超过其最大传输功率，即：

$$P_l \leq P_{l,\max} \quad (10)$$

式中： P_l 为线路 l 上的运行功率； $P_{l,\max}$ 为线路 l 传输功率最大值。

4) 辐射型网络约束

鉴于合环操作的过程较为迅速，在负荷转供过程中需满足辐射状网络约束条件，即需要保证任一时刻的网络拓扑属于辐射状网络。

$$g(t) \in G \quad (11)$$

式中： $g(t)$ 在 t 时刻的网络拓扑； G 为所有辐射状网络拓扑结构。

首先，选取生成树约束 (spanning tree constraints, ST) 方法构建辐射状网络拓扑结构集合 G ，即：

$$\begin{cases} a_{ij} + a_{ji} = x_{ij}, \forall i \rightarrow j \in E \\ \sum_{j \in \Omega_i} a_{ij} = 1, \forall i \in NR \\ a_{ij} = 0, \forall i \in R, \forall j \in \Omega_i \end{cases} \quad (12)$$

式中： a_{ij} 、 a_{ji} 和 x_{ij} 均为0-1变量，判断节点 i 和节点 j 之间的关系，以 a_{ij} 为例，若 $a_{ij} = 1$ 表示节点 j 为节点 i 的父节点， x_{ij} 表示节点之间是否相连，若 x_{ij} 为1，则节点 i 和节点 j 相连，否则为0； E 、 R 、 N 和 Ω_i 分别为所有线路集合、所有根节点集合、所有节点集合和与节点 i 相连的所有节点集合。

根据辐射状网络的充要条件是在配电网是连通的前提下最终线路数等于有效节点数减去变电站

数，其中配电网连通为默认条件，计算公式如式(13)所示。

$$\sum_{j=1}^{N_i} S_j = N_u - N_T \quad (13)$$

式中： S_j 为开关运行状态列向量； N_u 为接线单元内开关数量； N_T 为接线单元内变电站数量； N_i 为其他节点状态。

综上，式(11)~(13)为配电网辐射状网络约束条件。

5) 电气距离约束

电气距离代表各转供路径之间的传输能力，也就是转供路径之间的电气距离应小于等于目标合环点需减少的合环电流对应的电气距离值，即：

$$d_{ab} \leq d_0 \quad (14)$$

式中： d_{ab} 为传输元件之间的电气距离； d_0 为着目标合环点所需减少的合环电流对应的电气距离。

6) 合环电流约束

(1) 合环电流稳态约束

配电馈线在短时间的过载运行时，仅会发出报警信号，不会使保护动作^[16-17]，因此可合环稳态电流约束如式(15)所示。

$$I_o \leq I_{\text{set, II}} \quad (15)$$

式中： I_o 为最终合环稳态电流； $I_{\text{set, II}}$ 为电流限时速断保护的整定值。

(2) 合环暂态约束

合环操作中，面对不同的合环冲击电流暂态分量衰减时间，需要分别设定不同的合环暂态电流约束。

当 $t_0 \leq t_{\text{set, II}}$ 时，由于未到过电流II段动作时间，那么仅需防止过电流I段保护动作即可，而当 $t_0 > t_{\text{set, II}}$ 时，则需在过电流I段保护不动作的前提下，保证过电流II段保护的不动作，由此可得合环电流暂态约束如下。

$$i_{\max} < I_{\text{set, I}} \quad (16)$$

式中： t_0 为暂态电流存在时间； $t_{\text{set, II}}$ 为过电流II段保护整定时间； $I_{\text{set, I}}$ 为过电流I段保护的整定值。

$$I_{\max} < I_{\text{set, II}} \quad (17)$$

式中 $I_{\text{set, II}}$ 为过电流II段保护的整定值。

3 计及源荷不确定性的转供模型优化

由于接入大规模DG的随机性和波动性出力将对电网合环特性产生较大影响^[18-19]，其合环瞬间

机端电压突变导致的DG输出特性变化也必然会改变合环特性,容易造成稳态合环电流越限和关键节点电压波动越限等后果^[20],使得含DG的城市电网合环特性具有不确定性,致使负荷转供方案的成功率大大降低。因此,在初步确定负荷转供方案的前提下,为考虑不确定性的影响,通过利用机会约束描述随机变量的不等式约束,并结合第2节的合环电流约束,得到最终的合环电流约束条件;并且由于上述模型求解不唯一,因此采用合环电流约束校验及电压偏移最小优化模型,对第一阶段模型求解得到的转供方案的合环电流约束进行校验和调整,以此确保方案的唯一性和可行性。

3.1 转供方案优化

1) 目标函数

随着DG接入后,配电网潮流流向更加复杂多变,输入配电网中的功率将引起节点电压抬升,有可能超过电压限值,威胁配电网安全。电压水平是对配电网运行平稳度的关键衡量参数^[21],因此考虑不确定性对合环操作稳定性的影响,本文将节点电压偏移平均值作为转供方案另一目标 f_2 ,如式(18)所示。

$$\min f_2 = U_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|U_i - U_r|}{U_r} \quad (18)$$

式中: U_p 为电压偏移量; U_i 为计及不确定性所得的节点电压; U_r 为节点额定电压; n 为节点数量。

2) 约束条件

(1) 等式约束

$$\begin{cases} P_{Gi} + P_{Wi} + P_{PVi} = P_{Li} + U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{Gi} + Q_{Wi} + Q_{PVi} = Q_{Li} + U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (19)$$

式中: P_{Gi} 、 P_{Wi} 、 P_{PVi} 和 P_{Li} 分别为发电机、风电、光伏和负荷的有功功率; Q_{Gi} 、 Q_{Wi} 、 Q_{PVi} 和 Q_{Li} 分别为发电机、风电、光伏以及负荷的无功功率; U_i 和 U_j 分别为节点*i*和*j*的电压幅值; θ_{ij} 为节点*i*与*j*之间的相角差; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵元素的实部和虚部。

(2) 不等式约束

对于源荷不确定性的情况下,一般有机会约束法、场景生成法和模型转换等方法^[22-24],本文选择

机会约束规划方法,使约束条件在设定的置信度下满足,即:

$$\begin{cases} P_r \{ U_{i, \min} \leq U_i \leq U_{i, \max} \} > \beta_U \\ P_r \{ I_o \leq I_{\text{set}, 2} \} > \beta_I \end{cases} \quad (20)$$

式中: $P_r \{ \cdot \}$ 为不等式成立的概率; β_U 和 β_I 分别为电压幅值置信度和过电流Ⅱ段整定值置信度; $U_{i, \max}$ 和 $U_{i, \min}$ 分别为节点*i*处电压的上下限。

(3) 机会约束处理方法

本文通过抽样平均近似方法(sample average approximation, SAA)将机会约束规划转化为确定性规划,其主要通过对不确定参数进行抽样,并通过生成足够多的不确定性样本来代替模型中的不确定量,从而将原问题转换为混合整数问题。用SAA表示机会约束一般形式如式(21)所示。

$$\begin{cases} P_r \{ f(x, \zeta) \geq 0 \} > \beta \\ \sum_{s=1}^{N_s} m(f(x, \zeta_s)) < \beta N_s \end{cases} \quad (21)$$

式中: β 为置信度; N_s 为采样数量; ζ 为所有样本; ζ_s 为第*s*次样本; $f(x, \zeta_s)$ 为安全约束函数; $m(f(x, \zeta_s))$ 为指示函数。其中,当 $f(x, \zeta_s) \geq 0$ 时, $m(f(x, \zeta_s))=0$,表示机会约束有效,而 $f(x, \zeta_s) < 0$ 时, $m(f(x, \zeta_s))=1$,表示机会约束失效。因此,由SAA将式(20)机会约束转化为:

$$\begin{cases} U_{i, \min} - U_i \leq m_{j, \min} M \\ U_i - U_{i, \max} \leq m_{j, \max} M \\ I_o - I_{\text{set}, \text{II}} \leq m_{j, \text{set}, \text{II}} M \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{N_s} m_{j, \min} \leq \beta_{\min} N_s \\ \sum_{j=1}^{N_s} m_{j, \max} \leq \beta_{\max} N_s \\ \sum_{j=1}^{N_s} m_{j, \text{set}, \text{II}} \leq \beta_{\text{set}, \text{II}} N_s \end{cases} \quad (23)$$

式中: $j=1, \dots, N_s$; $m_{j, \min}$ 、 $m_{j, \max}$ 和 $m_{j, \text{set}, \text{II}}$ 均为0-1变量,用来标记约束是否被违反; M 为正数; $\beta_{\min}$ 、 $\beta_{\max}$ 、 $\beta_{\text{set}, \text{II}}$ 分别为各约束对应的最大允许越限概率。

通过上述研究,式(22)~(23)和第2节中的式(15)~(17)为最终合环电流约束,并以式(18)为目标函数,得到计及不确定性的合环电流约束校验模型为:

$$\begin{cases}
\min f_2 = U_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|U_i - U_r|}{U_r} \\
I_o \leq I_{\text{set. II}} \\
i_{\max} < I_{\text{set. I}} \\
I_{\max} < I_{\text{set. II}} \\
P_{Gi} + P_{Wi} + P_{PVi} = P_{Li} + U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\
Q_{Gi} + Q_{Wi} + Q_{PVi} = Q_{Li} + U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\
U_{i, \min} - U_i \leq m_{j, \min} M \\
U_i - U_{i, \max} \leq m_{j, \max} M \\
I_o - I_{\text{set. II}} \leq m_{j, \text{set. II}} M \\
\sum_{j=1}^{N_s} m_{j, \min} \leq \beta_{\min} N_s \\
\sum_{j=1}^{N_s} m_{j, \max} \leq \beta_{\max} N_s \\
\sum_{j=1}^{N_s} m_j \leq \beta_{\text{set. II}} N_s
\end{cases} \quad (24)$$

3.2 随机变量的获取方法

为了考虑 DG 和负荷带来的不确定性, 使得合环计算难以进行, 本文通过建立负荷和分布式能源的概率模型^[25], 然后采用半不变量法(CM)求取负荷、风电和光伏的半不变量, 接着通过 Cornish-Fisher 级数展开^[26]获得合环电流的概率特性, 最终获得考虑了不确定性的合环电流约束。

3.2.1 含源荷不确定性的合环电流计算

1) 概率分布模型

(1) 负荷概率模型

本文通过正态分布描述负荷, 可得函数如式 (25) 所示。

$$\begin{cases}
f(P_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_p} \exp\left(-\frac{(P - \mu_p)^2}{2\delta_p^2}\right) \\
f(Q_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_Q} \exp\left(-\frac{(Q - \mu_Q)^2}{2\delta_Q^2}\right)
\end{cases} \quad (25)$$

式中: μ_p 和 μ_Q 分别为负荷的有功功率期望和无功功率期望; δ_p 和 δ_Q 分别为负荷的有功功率标准差和无功功率标准差; P 为 P_L 的随机取值; P_L 为负荷有功功率, Q_L 为负荷无功功率; Q 为 Q_L 的随机取值; $f(\cdot)$ 为标准的正态分布概率密度函数。

(2) 风电概率模型

风机有功功率出力 P_{WT} 可由风速 v 确定, 其关系式为:

$$P_{WT} = \begin{cases} 0, v < v_{ci}, v \geq v_{co} \\ P_r \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}}, v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_r, v_r \leq v \leq v_{co} \end{cases} \quad (26)$$

$$Q_{WT} = P_{WT} \tan(\phi_{WT})$$

式中: P_r 为风机的额定有功功率; v_{ci} 为风机切入风速; v_r 为风机额定风速; v_{co} 为风机切出风速; ϕ_{WT} 为风机的功率因数角; Q_{WT} 为风机无功功率。

(3) 光伏概率模型

本文采用较为广泛的 Beta 分布来描述光照强度, 最终可以将光伏电池组的输出功率描述为:

$$P_{PVG} = \begin{cases} P_{PV}^r \frac{I}{I_r}, I \leq I_r \\ P_{PV}^r, I > I_r \end{cases} \quad (27)$$

$$Q_{PV} = P_{PV} \tan(\phi_{PV})$$

式中: P_{PV}^r 为光伏机组额定功率; I_r 为额定光照强度; I 为实际光照强度; ϕ_{PV} 为光伏机组的功率因数角; P_{PVG} 为光伏发电机组的实际输出有功功率; Q_{PV} 为光伏发电机组输出的无功功率; P_{PV} 即为 P_{PVG} 。

2) 合环电流累积概率特性分布获取

本文基于叠加法计算合环电流方法^[27]得到合环电流计算线性化方程组, 即:

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{X} = \mathbf{S}_0 \Delta \mathbf{W} \\ \Delta \mathbf{I} = \mathbf{E}_0 \Delta \mathbf{W} \end{cases} \quad (28)$$

式中: $\mathbf{E}_0$ 、 $\mathbf{S}_0$ 分别为以节点负荷注入功率期望值为基准点线性化潮流方程并进行潮流计算得到的矩阵; $\Delta \mathbf{X}$ 为系统状态变量的变化量向量; $\Delta \mathbf{I}$ 为支路电气量的变化量向量; $\Delta \mathbf{W}$ 为节点注入功率的变化量向量具体求解过程见文献[28]。

当各个节点的注入有功功率与无功功率是独立的并在一个基准点泰勒展开并线性化方程时, 依据式 (28) 可知, 合环电流的变化量等于各注入功率的线性之和。假设节点 i 的注入功率变化量为 $\Delta \mathbf{W}_i$, 由负荷的变化量 $\Delta \mathbf{W}_{li}$ 、风电出力的变化量 $\Delta \mathbf{W}_{wi}$ 与光伏发电出力的变化量 $\Delta \mathbf{W}_{pvi}$ 通过卷积计算获得, 即:

$$\Delta \mathbf{W}_i = \Delta \mathbf{W}_{li} * \Delta \mathbf{W}_{wi} * \Delta \mathbf{W}_{pvi} \quad (29)$$

随机变量的卷积计算非常繁杂, 不适用于合环

电流计算。而CM可以根据相互独立随机变量的半不变量具有的可加性^[29],将其转换为代数运算进行计算;因此,通过半不变量的代数运算得到节点注入功率的各阶半不变量,从而代替式(28)–(29)的计算,即:

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{X}^{(\gamma)} = \mathbf{S}_0^{(\gamma)} \Delta \mathbf{W}^{(\gamma)} \\ \Delta \mathbf{I}^{(\gamma)} = \mathbf{E}_0^{(\gamma)} \Delta \mathbf{W}^{(\gamma)} \end{cases} \quad (30)$$

$$\Delta \mathbf{W}_i^{(\gamma)} = \Delta \mathbf{W}_{li}^{(\gamma)} + \Delta \mathbf{W}_{wi}^{(\gamma)} + \Delta \mathbf{W}_{pvi}^{(\gamma)} \quad (31)$$

式中: $\Delta \mathbf{W}_i^{(\gamma)}$ 、 $\Delta \mathbf{W}_{li}^{(\gamma)}$ 、 $\Delta \mathbf{W}_{wi}^{(\gamma)}$ 、 $\Delta \mathbf{W}_{pvi}^{(\gamma)}$ 分别为节点*i*的输入功率、负荷输入功率、风电输入功率、光伏输入功率的半不变量; $\Delta \mathbf{X}^{(\gamma)}$ 为系统状态变量的变化量; $\Delta \mathbf{I}^{(\gamma)}$ 为支路电流的变化量; $\Delta \mathbf{W}^{(\gamma)}$ 为节点注入功率的变化量; $\mathbf{S}_0^{(\gamma)}$ 为状态变量对注入功率的灵敏度矩阵; $\mathbf{E}_0^{(\gamma)}$ 为支路电流对注入功率的灵敏度矩阵; γ 为阶数。将式(30)–(31)计算节点电压和合环电流的阶半不变量,并利用级数展开法获得输出变量的累积概率分布。

3.3 求解方法与步骤

本文所提的负荷转供方案由两阶段所得。

第一阶段:判断合环点是否满足合环电流的暂稳态约束,然后计算出不满足约束点所需要的耦合强度,以此形成式(14)的电气距离约束,并选择开关总动作次数最少为目标函数,以及负荷转供后的功率平衡约束、线路载流量、辐射型网络结构约束和变电站负荷转供容量,并使用CPLEX进行求解负荷转供优化方案^[30]。

第二阶段:通过叠加法得到合环电流计算方程,然后将其线性化,接着通过半不变量法计算出负荷、风电和光伏的半不变量,得到式(30)–(31)表示节点电压和合环电流的求解方程,接着采用Cornish-Fisher级数展开得到合环电流和合环电压的累积分布特性曲线,利用机会约束描述计及不确定性的状态变量约束式(20),然后利用SAA方法进行机会约束确定性转化得式(22)–(23),并结合第2节的式(15)–(17)形成合环电流约束条件,然后再考虑校验潮流约束等式约束式(19)以及合环电流暂稳态约束,以电压偏移最小为目标建立合环电流约束校验模型,其中合电流约束主要是判断合环稳态电流的情况,因此本文将合环暂态电流忽略^[31–33],从而简化,最终得式(24)为整数规划问题,依然使用CPLEX进行求解。

基于上述两阶段步骤建立最终的负荷转供优化模型方案,以此求出负荷转供的最优解,并且加入开关约束限制考虑了电气距离依然无法满足合环电流约束的线路开关,即:

$$S_j = S_j^0 \Big|_{j \in \phi} \quad (32)$$

式中: S_j 为任一开关状态; S_j^0 为负荷转供前集合 ϕ 中开关状态。本文所建立的计及源荷不确定性的负荷转供优化模型研究求解如图5所示。

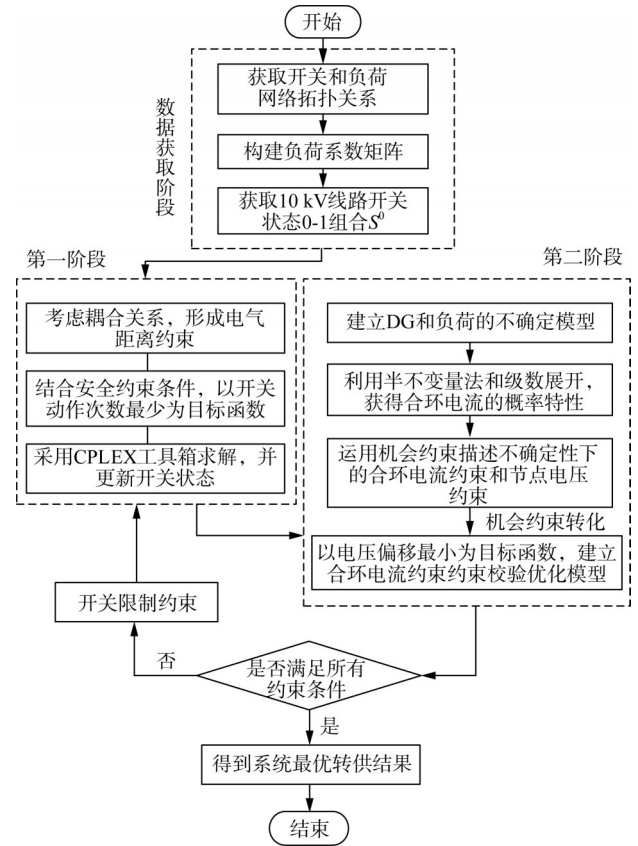


图5 求解流程

Fig. 5 Solution process

4 算例分析

4.1 算例数据

在MATLAB R2019a上对某实际的10 kV配电网进行转供测试,如图3所示。该配电网共有5座变电站,除变电站5为220 kV以外均为110 kV。该配电网共有20条10 kV线路,变电站1–5的线路分别用Q、H、D、L和Y表示,具体为:变电站1的Q1–Q5、变电站2的H1–H6、变电站3的D1–D5、变电站4的L1–L3和变电站5的Y1;并将配

电网中的 37 个开关以 S1—S37 表示；其中，蓝色方框和白色方框分别表示开关处于闭合状态和断开状态。图 6 中箭头表示线路负荷。

其中，各节点负荷的期望值取真实负荷数据，标准差取真实负荷数据的 5 %；G1—G4 为光伏发电机组，光伏电池数为 1 000 且每个电池板的面积为 2 m²，光照强度最大值为 1.155 kW/m²，光电转换效率为 15 %，光照强度服从 $a=6$ 、 $b=4$ 的 Beta 分布， a 、 b 为形状参数^[34-35]；G5—G8 为额定功率为 250 kW 的风力发电机组，切入风速、切出风速和额定风速分别取： $v_{ci}=4$ m/s， $v_{co}=25$ m/s， $v_r=14$ m/s，尺度参数为 10，形状参数为 2.5。

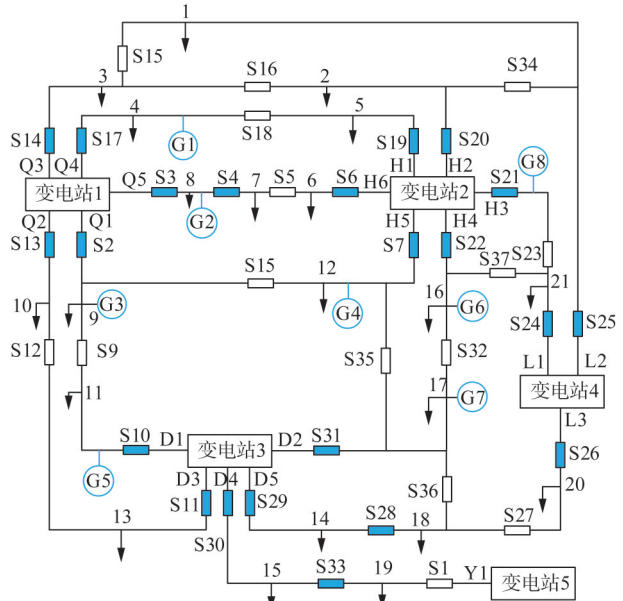


图 6 配电网接线图

Fig. 6 Wiring diagram of distribution network

各 10 kV 馈线合环后的等值阻抗以及各条 10 kV 馈线过电流 I、II 段整定值见表 1。

选取某时刻下的变电站 1—5 主变压器的负载情况及各个站的 10 kV 母线电压具体见表 2，统一线路功率因数取为 0.95。

4.2 计及不确定性的转供优化结果分析

4.2.1 不考虑耦合特性的负荷转供结果

按照本文所提转供模型，得到的转供方案，如表 3 所示，以此解决变电站 2 需要转出的 20 MW 负荷。

根据当前的主变情况，所得方案满足转供的优先级，即：先变电站 4 再变电站 3。图 7 是负荷转供

表 1 系统合环参数

Tab. 1 System ring closure parameters

参数	数值
合环后 等值阻抗	变电站 1-2 1.25 1-3 0.75 3-2 1.23 2-4 0.82 4-1 1.77 3-5 0.12
10 kV 线路	线路 H1—H6 Q1—Q4 L1—L3 D1—D5 Y1
电流保护 整定值	过电流 I 段 99 99 99 99 99
	过电流 II 段 8 10 10 10 10

注： Z_k 为两变电站之间线路等效后的等值阻抗。

表 2 变电站运行状况

Tab. 2 Substation operation status

变电站	主变压器容量/MVA	当前负载/MW	母线段电压/kV
1	2×63	122.2	10.10
2	2×50	120	11.50
3	2×50	89.9	10.50
4	2×50	55.4	10.62
5	2×240	102.6	10.38

表 3 配电网转供方案

Tab. 3 Distribution network transfer scheme

序号	转供线路	运行开关	断开开关
1	D2-H4	S31 和 S32	S22
2	L1-H3	S23 和 S24	S21
3	L2-Q3	S25 和 S15	S14
4	H2-L2	S25、S15 和 S16	S20
5	D4-Y1	S1 和 S33	S30

后的主变压器负载情况。

由图 7 可知，转供后，变电站 2 主变压器承载

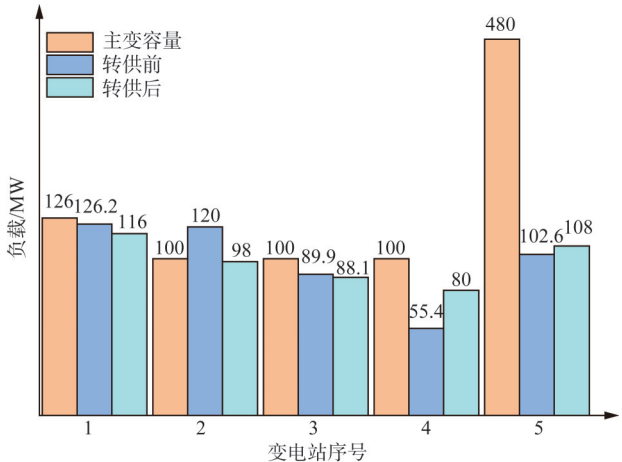


图 7 负荷转供后的主变压器负载情况

Fig. 7 Load condition of the main transformer after load transfer

的负荷小于其主变压器容量 100 MW, 超载问题得到解决, 其余站未出现新的超载问题。

再考虑不确定性对合环电流的影响方面, 本文设定 β_U 和 β_I 的置信水平为 95 %, 1.05 p. u. 为节点电压幅值最大值, 0.95 p. u. 为其最小值。参照 D2-H4 合环方式, I_a 和 I_b 分别为线路 D2 和线路 H4 站内的电流; 这 5 种转供路线合环稳态电流超限情况如图 8 所示, 关于合环稳态电流超限数据如表 4 所示。

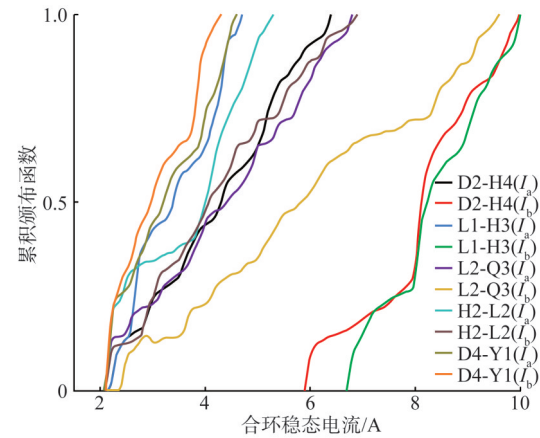


图 8 合环稳态电流超限情况

Fig. 8 Limit of the steady state currents

表 4 合环电流超限情况

Tab. 4 Ring closure currents limit situation

序号	转供线路	$P_r\{I_a \leq I_{set, II}\} / \%$	$P_r\{I_b \leq I_{set, II}\} / \%$
1	D2-H4	100	30
2	L1-H3	100	27
3	L2-Q3	100	100
4	H2-L2	100	100
5	D4-Y1	100	100

由图 8 和表 4 可知, L2-Q3、H2-L2 和 D4-Y1 3 种转供路线合环稳态电流约束的满足概率均大于设定的 95 %, 而 H4 和 H3 的合环稳态电流约束的概率分别为 30 % 和 27 % 均小于 95 %, 为更具体反应这两种合环方式的情况, 选取节点 1、2 和 17 的节点电压幅值超限情况, 如图 9 和表 5 所示。

从图 9 和表 5 可以看出, 目前负荷转供方案节点 1、2 和 17 电压幅值处于设定边界 1.05 p. u. 和 0.95 p. u. 之间的概率分别为 20 %、24 % 和 26 %, 说明当下的负荷转供方案在面对负荷、光伏和风电 3 种不确定性下节点电压约束难以满足置信水平, 因而合环操作的稳定性较低。

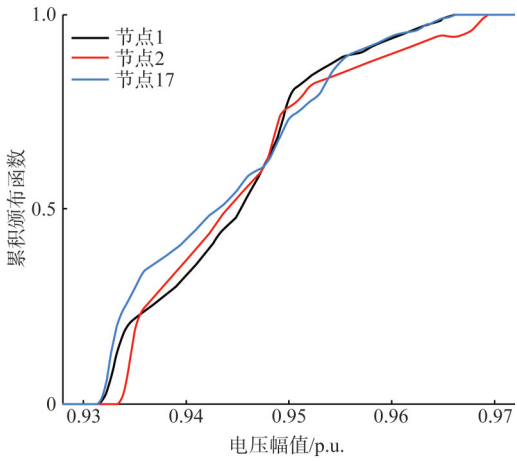


图 9 电压幅值超限情况

Fig. 9 Voltage amplitudes exceeds the limit

表 5 电压幅值超限情况

Tab. 5 Voltage amplitude exceeds the limit %

节点序号	$P_r\{U_{i, min} \leq U_i \leq U_{i, max}\} / \%$
1	20
2	24
3	26

4. 2. 2 考虑耦合特性的负荷转供结果

由图 8 知 10 kV 线路 D2 和 H4、L1 和 H3 合环失败, 本文通过考虑节点之间的电气耦合关系, 也就是计算节点之间的电气距离, 改变阻抗分布, 降低合环稳态电流, 继而保证原始方案的可行性, 进行快速高效的负荷转供, 表 6 给出了考虑电气距离后的负荷方案, 表 7 为电气距离计算结果。

表 6 考虑电气距离的配电网转供方案

Tab. 6 Distribution network transfer scheme considering electrical distance

序号	转供线路	运行开关	断开开关
1	D2-H4	S31 和 S32	S22
2	L1-H3	S23 和 S24	S21
3	L2-Q3	S25 和 S15	S14
4	H2-L2	S25、S15 和 S16	S20
5	D4-Y1	S1 和 S33	S30
6	D5-L3	S36、S29、S26 和 S27	S28
7	L1-H4	S37 和 S24	S22

表 6 可知, L2-Q3、H2-L2 和 D4-Y1 3 种转供路线均为改动; 通过运行 S27、S36 和 S37 在原本的 D2-H4 和 L1-H3 进行改动, 第一步: 先运行 S27、S36 和 S37, 然后得出 D5-L3 和 L1-H4 的合环稳态电

表 7 电气距离计算

Tab. 7 Electrical distance calculation results

序号	d_{ab}	d_0
D2-H4 和 D5-L3	0.502	0.542
D2-H4 和 L1-H4	0.487	
L1-H3 和 D5-L3	0.524	0.632
L1-H3 和 L1-H4	0.593	

流越限情况，第二步：按照预定方案进行合环操作，并由表 7 可知，线路之间的电气距离约束满足，表示两者之间存在较高的耦合强度，得出新的合环电流越限情况，如表 8 所示。

表 8 合环电流越限情况

Tab. 8 Exceeding the limit of ring currents %

序号	转供线路	$P_r \{I_a \leq I_{set, II}\}$	$P_r \{I_b \leq I_{set, II}\}$
1	D2-H4	98	96
2	L1-H3	99	98
3	L2-Q3	100	100
4	H2-L2	100	100
5	D4-Y1	98	100
6	D5-L3	97	100
7	L1-H4	100	96

由表 8 可知，通过改变阻抗分布降低合环电流，可以使得各负荷转供路线满足合环稳态电流约束，但由于线路之间的电气耦合关系的强弱会产生一定的影响，例如：L1-H3 和 D4-Y1，虽然满足约束的概率相对预定方案降低一些，但还是可以保持一定的置信水平，最终可以确定表 6 所提的负荷转供方案，可以解决预定方案合环稳态电流约束不满足的情况，使得负荷转供成功，并为表明本文方法的稳定性，通过求取第一步合环操作中节点 18 和节点 21 的电压幅值越限情况，如图 10 和表 9 所示。

由图 10 可知，节点 18 和节点 21 处于设定边界 1.05 p.u. 和 0.95 p.u. 之间的概率分别是 96% 和 98%，见表 9，满足置信要求，表明所提方法充分考虑不确定性对负荷转供的影响。

5 结论

本文提出了计及不确定性的负荷转供优化模型。通过算例仿真表明，当变电站变压器容量超载时，本模型可以基于电气耦合关系进行合环操作使

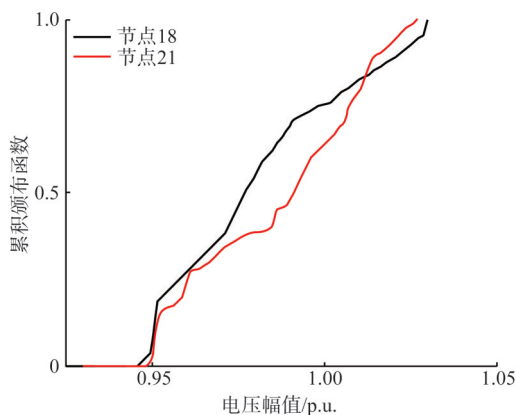


图 10 电压幅值越限情况

Fig. 10 Voltage amplitudes exceeds the limit

表 9 电压幅值越限情况

Tab. 9 Exceeding the limit of voltage amplitudes %

节点序号	$P_r \{U_{i, min} \leq U_i \leq U_{i, max}\}$
18	96
21	98

得负荷转供方案得以满足合环电流约束，并确保所提方案在面对负荷、风电和光伏的不确定性时，具有较高的稳定性和可行性。得到如下结论。

1) 引入了传输阻抗式的电气距离计算方法量化传输元件之间的耦合强度，并通过分析耦合强度对于合环电流的影响，以此形成电气距离约束，从而建立了基于元件耦合特性的负荷转供模型，通过对约束条件的完善使得原本不满足合环约束的地方可以满足约束条件，进而加强了对负荷转供方案的可控性。

2) 为使得计及负荷和分布式能源不确定性下的约束条件更加合理，应用 CM 方法和级数展开获得变量的概率特性，并通过机会约束规划的方式完善模型的约束条件。

3) 针对分布式能源参与负荷转供，本文深度分析了分布式能源对负荷转供的影响，并为应对 DG 出力的不确定性、负荷的不确定性和合环操作稳定性制定转供模型优化策略，充分考虑负荷转供的影响因素，确保负荷转供的可行性和成功率，提高配电网供电可靠性。

参考文献

- [1] 汪德义. 存在 30 度角差的 35 kV 系统合环操作探讨[J]. 电力与能源, 2020, 41(2): 258-259.
WANG Deyi. Loop closing operation of 35 kV systems with 30-

- degree angle difference [J]. Power & Energy, 2020, 41(2): 258 – 259.
- [2] 肖程元. 复杂配电网的合环分析与调控措施研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [3] 尹瑞君. 包头电网轻重负荷区110 kV电网合环电流控制分析[J]. 内蒙古电力技术, 2021, 39(6): 94 – 97.
YIN Ruijun. Analysis of closed loop current control measures of 110 kV power grid in light and heavy load area of Baotou power grid[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2021, 39(6): 94 – 97.
- [4] 杨用春, 牛超群, 唐健雄, 等. 静止同步补偿装置电压调整与合环转换控制策略研究[J]. 电力科学与工程, 2022, 38(8): 30 – 38.
YANG Yongchun, NIU Chaoqun, TANG Jianxiong, et al. Research on voltage regulation and loop closing conversion control strategy of static synchronous compensation device[J]. Electric Power Science and Engineering, 2022, 38(8): 30 – 38.
- [5] 李闯, 刘永强, 马中静, 等. 基于相位补偿的配电网30°合环环流抑制技术[J]. 电测与仪表, 2023, 60(12): 82 – 89.
LI Chuang, LIU Yongqiang, MA Zhongjing, et al. Suppression technology for 30-degree loop-closing circulation in distribution network based on phase compensation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(12): 82 – 89.
- [6] 王洪信, 刘刚, 郭艳, 等. 考虑供电可靠性的配电网负荷转供优化方法研究[J]. 自动化应用, 2020(12): 91 – 92, 96.
WANG Hongxin, LIU Gang, GUO Yan, et al. Study on the optimization method of distribution network load transfer considering the power supply reliability [J]. Automation Application, 2020(12): 91 – 92, 96.
- [7] 王光华, 李晓影, 宋秉睿, 等. 基于深度强化学习的配电网负荷转供控制方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(7): 253 – 260.
WANG Guanghua, LI Xiaoying, SONG Bingrui, et al. Real-time dispatching strategy of cascaded hydropower stations under frequent load fluctuation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(7): 253 – 260.
- [8] 马占业, 李现伟, 杜云朋, 等. 基于预测的智能配电网负荷转供策略生成方法[J]. 电工技术, 2024(6): 111 – 113.
MA Zhanye, LI Xianwei, DU Yunpeng, et al. Prediction-based method of generating load transfer strategy for intelligent distribution network[J]. Electric Engineering, 2024(6): 111 – 113.
- [9] 李邦源, 李昂, 石恒初, 等. 计及分布式电源输出特性的主动配电网合环电流计算方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(6): 115 – 123.
LI Bangyuan, LI Ang, SHI Hengchu, et al. A calculation method of the closing loop current in active distribution networks with distributed power output characteristics considered [J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(6): 115 – 123.
- [10] 张丽, 李昂, 许守东, 等. 考虑合环延时的含分布式电源配电网合环电流协同控制方法[J]. 电工电能新技术, 2024, 43(5): 19 – 27.
ZHANG Li, LI Ang, XU Shoudong, et al. Closed loop current cooperative control method for distributed power distribution network with closed loop delay considered [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2024, 43(5): 19 – 27.
- [11] WHEELER K A, ELSAMAHY M, FARIED S O. A novel reclosing scheme for mitigation of distributed generation effects on overcurrent protection [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 981 – 991.
- [12] 徐鹏鑫. 考虑分布式电源的合环电流计算与新型调控方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2023.
- [13] 房国俊. 基于传输阻抗的电气距离计算方法及配电网无功优化[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- [14] 鲍海, 房国俊. 一种采用等效传输阻抗法的新型电气距离计算方法及其应用[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 244 – 250.
BAO Hai, FANG Guojun. A new method of electrical distance calculation and its applications used the equivalent transmission impedance method [J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 244 – 250.
- [15] 荆朝霞, 张露, 谭慧娟, 等. 考虑负荷转供的校正型安全约束最优潮流模型研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2020(3): 21 – 24.
JING Zhaoxia, ZHANG Lu, TAN Huijuan, et al. Corrective security constrained optimal power flow considering load transfer capacity[J]. Automation & Instrumentation, 2020(3): 21 – 24.
- [16] 唐海天, 冯银平. 计及合环约束的分布式电源与配电网联合优化[J]. 上海电力大学学报, 2023, 39(4): 345 – 352.
TANG Haitian, FENG Yinping. Joint planning of distributed generation and distribution network considering closing constraint [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2023, 39(4): 345 – 352.
- [17] 纪焕聪. 配电网合环电流分析及概率评估方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
- [18] 欧阳金鑫, 陈纪宇, 袁毅峰, 等. 考虑合环电压波动抑制的配电网故障恢复协同控制方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 193 – 201.
OUYANG Jinxin, CHEN Jiyu, YUAN Yifeng, et al. Cooperative control method for fault restoration of distribution network considering closed-loop voltage fluctuation suppression [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 193 – 201.
- [19] 李振兴, 王扬曦, 望周丽, 等. 通信限制下多DG接入配电网的新型电流差动保护[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 80 – 89.
LI Zhenxing, WANG Yangze, WANG Zhouli, et al. A novel current differential protection for multiple DGs accessing a distribution network with a communication limitation [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 80 – 89.
- [20] 许智光, 李岩松, 陈东旭, 等. 基于三点估计法的有源配电网合环电流安全性评估模型[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2025, 52(6): 22 – 31.
XU Zhiguang, LI Yansong, CHEN Dongxu, et al. Safety evaluation model of closed-loop current in active distribution network based on three point estimation method [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2025, 52(6): 22 – 31.
- [21] 周自强, 张焰, 郭强, 等. 基于概率潮流的10kV配电网合环操作安全性评估[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1421 – 1429.
ZHOU Ziqiang, ZHANG Yan, GUO Qiang, et al. Security assessment of loop closing operation in 10 kV distribution network based on probabilistic load flow [J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1421 – 1429.
- [22] 卫志农, 马智刚, 陈胜, 等. 考虑光伏随机性的交直流混合配

- 电网鲁棒机会约束安全域模型[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(6): 2208–2219.
- WEI Zhinong, MA Zhigang, CHEN Sheng, et al. Robust chance-constrained security region model of AC/DC hybrid distribution network considering the uncertainty of photovoltaic generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2208–2219.
- [23] 孙锴, 张大海, 李亚平, 等. 考虑时空不确定性的风电出力场景生成方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(7): 101–107.
- SUN Kai, ZHANG Dahai, LI Yaping, et al. A method for generating wind power output scenarios considering spatio-temporal uncertainty[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(7): 101–107.
- [24] 陈萍, 党喜, 刘龙成, 等. 考虑风光不确定性的暂态稳定约束最优潮流模型研究[J]. 智慧电力, 2024, 52(3): 17–24.
- CHEN Ping, DANG Xi, LIU Longcheng, et al. Transient stability constrained optimal power flow model considering uncertainty of wind and photovoltaic output[J]. Smart Power, 2024, 52(3): 17–24.
- [25] 毛东宇. 计及不确定性的城市电网负荷转供路径分析及应用[D]. 南京: 东南大学, 2022.
- [26] 许礼彬, 廖星星. 计及新能源出力不确定性的配电网概率潮流分析[J]. 江西电力, 2024, 48(1): 49–52, 67.
- XU Libin, LIAO Xingxing. Probabilistic tidal current analysis of distribution networks taking into account the uncertainty of new energy outputs[J]. Jiangxi Electric Power, 2024, 48(1): 49–52, 67.
- [27] 石钟文, 温辉, 杨利森, 等. 10kV配电网合环电流计算方法研究[J]. 电工技术, 2023(15): 93–96.
- SHI Zhongwen, WEN Hui, YANG Lisen, et al. Research on calculation method of closed loop current in 10kV distribution network[J]. Electric Engineering, 2023(15): 93–96.
- [28] 鄢珂. 含分布式电源的配电网合环电流计算方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2023.
- [29] 郭效军, 蔡德福. 不同级数展开的半不变量法概率潮流计算比较分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12): 85–90, 110.
- GUO Xiaojun, CAI Defu. Comparative analysis of probabilistic trend calculations for semi-invariant methods with different level expansions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 85–90, 110.
- [30] 郭壮志, 徐其兴, 洪俊杰, 等. 配电网快速高容错性故障定位的线性整数规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3): 786–795.
- GUO Zhuangzhi, XU Qixing, HONG Junjie, et al. Integer linear programming based fault section diagnosis method with high fault-tolerance and fast performance for distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3): 786–795.
- [31] 周念成, 谷飞强, 雷超, 等. 考虑合环电流约束的主动配电网转供优化模型[J]. 电工技术学报, 2020, 35(15): 3281–3291.
- ZHOU Niancheng, GU Feiqiang, LEI Chao, et al. A power transfer optimization model of active distribution networks in consideration of loop closing current constraints[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(15): 3281–3291.
- [32] 贾申利, 乐小熙, 黄小龙, 等. 环保型高压真空开关电流开断基础[J]. 广东电力, 2024, 37(9): 88–101.
- JIA Shenli, LE Xiaoxi, HUANG Xiaolong, et al. Fundamentals of current interruption in environmental friendly high-voltage vacuum switches[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(9): 88–101.
- [33] 李楠, 张家恒. 基于XGboost-DF的电力系统暂态稳定评估方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(10): 119–127.
- LI Nan, ZHANG Jiaheng. A transient stability assessment method of power system based on XGboost-DF[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(10): 119–127.
- [34] 王敏, 宗炫君, 袁越, 等. 含光伏电站的发电系统可靠性分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 42–49, 10.
- WANG Min, ZONG Xuanjun, YUAN Yue, et al. Reliability analysis of generation systems with photovoltaic stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 42–49, 10.
- [35] 陈光, 戴攀, 周浩, 等. 计及入网电动汽车和分布式电源的配电系统重构[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 82–88.
- CHEN Guang, DAI Pan, ZHOU Hao, et al. Distribution system reconfiguration considering distributed generators and plug-in electric vehicles[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 82–88.

收稿日期: 2024-09-18;网络首发日期:2024-11-30

作者简介:

赵化达(2000), 男, 硕士研究生, 从事智能电网运维研究, 1463144512@qq.com;

舒征宇(1983), 男, 副教授, 博士, 从事电力系统保护与控制、智能电网运维研究, 18702031@qq.com;

姚钦(1984), 男, 高级工程师, 硕士, 从事新能源及配电自动化研究, 249550499@qq.com。