

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.06.013

基于 DK2-PLF 的主动配电网馈线合环电流评估

黄跃¹, 荣娜¹, 陈世威¹, 郭元萍²

(1. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025;

2. 贵州电网有限责任公司电网规划研究中心, 贵州 贵阳 550002)

摘要:合环电流评估技术对于配电网馈线合环转供电操作具有重要意义,为了提高主动配电网馈线合环电流计算的准确性,文中从融入源荷数据分布特性及预测的角度,提出基于双重 K2 算法和概率潮流(double K2 algorithm and probability load flow, DK2-PLF)的主动配电网馈线合环电流评估方法。首先,采用基于 DK2 算法的贝叶斯网络描述源荷相关性样本;其次,利用 Cholesky 分解方法处理获得的源荷相关性样本,以半不变量法计算主动配电网馈线合环电流的累积概率分布;然后,对主动配电网馈线合环电流从合环成功率和越限程度两方面进行安全性评估;最后,以贵州某城市为算例,对 10 kV 配电网系统开展馈线合环电流评估研究。得出以下结论:一是从概率密度、累积分布、最大误差三方面比较,相比于 K2 算法,DK2 算法源荷预测值的概率密度、累积分布误差较小,验证了 DK2 算法的优越性;二是从累积分布、最大误差两方面比较,采用 Cholesky 分解的半不变量法对比未采用 Cholesky 分解的半不变量法、蒙特卡洛法,其累积分布误差较小,采用 Cholesky 分解的半不变量法满足主动配电网馈线合环电流评估要求;三是从合环成功率、合环越限程度两方面比较,采用半不变量法计算的合环电流安全性指标结果与仿真结果偏差在电网经验误差 5% 范围内,说明基于 DK2-PLF 的主动配电网馈线合环电流评估方法可为合环辅助决策提供参考。

关键词:配电网合环操作;双重 K2(DK2)算法;概率预测;概率潮流;合环电流评估指标;DIgSILENT 仿真

中图分类号:TM711

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2024)06-0133-09

0 引言

在配电网区域计划停电期间,通过合环转供电操作可将用户负荷转移到其他电源,从而实现不间断供电的目标,这对提高配电网供电可靠性意义重大^[1-2]。一旦合环操作判断失误,将导致闭环失败的严重后果,存在较大的运行风险^[3]。因此,有必要研究配电网合环操作的风险评估方法,并利用该评估方法对配电网合环操作的进行合环辅助决策^[4]。

概率预测是研究源荷变量在预测时刻的累积概率分布函数。根据是否预先假定概率分布函数,可分为参数化方法和非参数化方法^[5-6]。参数化方法模型简单,便于计算,但须假设源荷数据服从某分布,再对该分布函数的参数进行估计^[7]。贝叶斯网络属于非参数化方法,具有描述多个变量间的相关性以及可解释性强的优点^[8]。文献[9]利用贝叶斯网络构造源荷之间的非线性相关性,通过比较原数据与合成数据的累积概率分布特征,验证贝叶斯网络模型的准确性。

目前对于合环电流评估技术理论研究相对较

少。文献[10]提出极端情况下的合环评估方法,将合环电流合环点分为 3 类(绝对安全、绝对不安全、条件安全)。文献[11]提出基于典型运行方式下的合环评估方法,其中典型运行方式为夏大、夏小、冬大、冬小。文献[10-11]所提方法得出的评估结果大多是粗略且定性的,对合环辅助决策难以提供有效参考。考虑将概率潮流融入到合环电流评估中,可对合环辅助决策提供参考。

概率潮流的求解方法^[12-13]有:蒙特卡洛法^[14]、点估计法^[15]和半不变量法^[16]等。文献[17]将半不变量法融入到合环电流评估中,采用实际合环算例验证半不变量法计算合环电流的准确性,但并未考虑分布式电源(distributed generator, DG)的加入对合环电流评估的影响。

综上所述,文中提出基于双重 K2 算法和概率潮流(double K2 algorithm and probability load flow, DK2-PLF)的主动配电网馈线合环电流评估方法。在源荷预测方面,考虑贝叶斯网络结构学习采用 DK2 算法时,效率与精度上优于 K2 算法。在概率潮流方法中,半不变量法仅在相互独立时计算的精度较高,采用了 Cholesky 分解方法处理获得的源荷相关性样本。最后,以贵州某城市作为算例分析,比较 DIgSILENT 仿真值与文中方法的计算值,分析验证了 DK2-PLF 方法的准确性。

收稿日期:2024-06-01;修回日期:2024-08-15

基金项目:贵州省科技支撑计划资助项目“主动配电网电气热储多能协同技术研究”

1 主动配电网合环等值模型

含 DG 的主动配电网如图 1 所示,正常运行时,开关 QF1 打开,在线路上发生故障时,可通过开关 QF1 进行合环转供电操作。

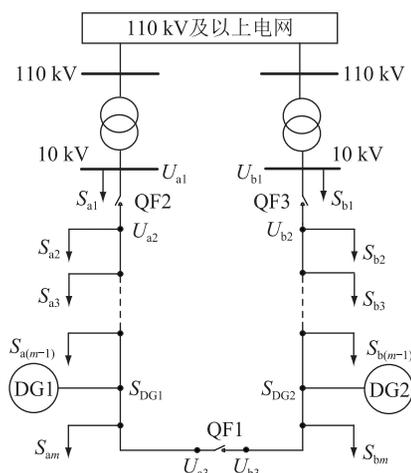


图 1 10 kV 主动配电网合环操作示意

Fig.1 Schematic diagram of 10 kV active distribution network loop closing operation

图 1 中, S_{a1} 、 S_{b1} 为非合环点两侧馈线的负荷; S_{a2} 、 S_{a3} 、 \dots 、 $S_{a(m-1)}$ 和 S_{b2} 、 S_{b3} 、 \dots 、 $S_{b(m-1)}$ 为合环点两侧中段馈线负荷; S_{am} 、 S_{bm} 为合环点两侧末端馈线负荷; S_{DG1} 、 S_{DG2} 为合环点两侧馈线接入的 DG; U_{a1} 、 U_{b1} 为合环点两侧馈线的 10 kV 母线电压; U_{a2} 、 U_{b2} 为两侧馈线第 1 个负荷的节点电压; U_{a3} 、 U_{b3} 为断路器 QF1 的断口两侧电压。

由叠加定理^[18]得出,合环稳态电流的构成:一部分为两侧合环前的 I_a 和 I_b ;一部分为合环后的循环电流 I_{loop} ,即:

$$\begin{cases} I'_a = I_a + I_{loop} \\ I'_b = I_b - I_{loop} \end{cases} \quad (1)$$

式中: I'_a 、 I'_b 分别为两侧馈线 a、b 合环后的稳态电流。

其中,循环电流 I_{loop} 为:

$$I_{loop} = \frac{\Delta U}{\sqrt{3}Z_{eq}} = \frac{U_{a3} - U_{b3}}{\sqrt{3}(Z_1 + Z_a + Z_b)} \quad (2)$$

式中: ΔU 为等值电源电势; Z_{eq} 为环网等值阻抗; Z_1 为主网系统等值回路阻抗; Z_a 、 Z_b 分别为合环点两侧馈线 a、b 的阻抗。

主动配电网在合环时,由于合环联络开关两侧会出现电压差,因此合环电流不但有周期分量,还有非周期分量。在文献[18-19]中得到冲击电流最大瞬时值 i_M 和最大有效值 I_M 分别为:

$$\begin{cases} i_M = \left(1 + e^{-\frac{0.01}{T_a}}\right) I_{loop} = \sqrt{2}kI_{loop} \\ I_M = \frac{I_{loop}}{\sqrt{2}} \left(1 + 2e^{-\frac{0.02}{T_a}}\right)^{\frac{1}{2}} = I_{loop} \sqrt{1 + 2(k-1)^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: k 为冲击系数; T_a 为冲击电流非周期分量的衰减时间常数。

合环后两侧馈线 a、b 首端的最大冲击电流有效值 I_{aM} 、 I_{bM} 分别为:

$$\begin{cases} I_{aM} = I_a + 1.51I_{loop} \\ I_{bM} = I_b + 1.51I_{loop} \end{cases} \quad (4)$$

综上所述,合环稳态电流与合环冲击电流最大有效值都与循环电流 I_{loop} 有关。设变量 $\mathbf{X} = [\delta_a \ U_a \ \delta_b \ U_b]^T$, 其中, δ_a 、 δ_b 分别为馈线 a、b 的相角; U_a 、 U_b 分别为馈线 a、b 的电压,则合环电流表达如式(5)所示。

$$\begin{bmatrix} I'_a \\ I'_b \\ I_{aM} \\ I_{bM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |I_a + I_{loop}| \\ |I_b - I_{loop}| \\ I_a + 1.51I_{loop} \\ I_b + 1.51I_{loop} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1(\mathbf{X}) \\ t_2(\mathbf{X}) \\ t_3(\mathbf{X}) \\ t_4(\mathbf{X}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $t_1(\mathbf{X})$ 、 $t_2(\mathbf{X})$ 分别为合环后馈线 a、b 的稳态电流变量; $t_3(\mathbf{X})$ 、 $t_4(\mathbf{X})$ 分别为合环后馈线 a、b 的冲击电流变量。

设合环电流变量 $\mathbf{I} = [I'_a \ I'_b \ I_{aM} \ I_{bM}]^T$, 则合环电流表达式可简化为:

$$\mathbf{I} = [t_1(\mathbf{X}) \ t_2(\mathbf{X}) \ t_3(\mathbf{X}) \ t_4(\mathbf{X})]^T = \mathbf{T}(\mathbf{X}) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{T}(\mathbf{X})$ 为合环后馈线 a、b 的稳态电流以及冲击电流变量矩阵。

2 DK2 算法描述源荷数据的相关性

2.1 贝叶斯网络原理

贝叶斯网络是一个由 (G, θ) 组成的对,其由以下 2 个部分组成^[20]:

(1) $G = (U, E)$ 网络结构代表有向无环图 (directed acyclic graph, DAG), 节点集合 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_u, \dots, x_j, \dots, x_n\}$ 表示随机变量的集合, $u = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n$; 集合 $E = \{(x_u, x_j) \mid x_u \neq x_j; x_u, x_j \in U\}$ 表示有向无环图中所存在的有向边; (x_u, x_j) 表示 x_u 和 x_j 之间的直接依赖关系。

(2) 网络参数 θ 可表示为 n 个离散随机变量 $\{x_1, x_2, \dots, x_u, \dots, x_j, \dots, x_n\}$ 上的概率分布或概率分布族。对于每个变量 $x_u \in U$, 都存在一个条件分布族 $P_a(x_u)$ 。 $P_a(x_u)$ 表示变量 x_u 的父节点。根据贝叶斯网络的性质,联合概率分布 $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$

可以表示为每个变量的条件概率的乘积:

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{u=1}^n P(x_u | P_a(x_u)) \quad (7)$$

2.2 基于 DK2 算法的贝叶斯网络结构学习

K2 算法^[21]属于经典的评分搜索算法,能够做到从数据中学习贝叶斯网络的结构,而且该算法采用评分搜索策略可搜索评分最佳的网络结构。K2 算法要求将节点的先验排序作为输入,并据此构建网络结构,从而降低了计算复杂度。

K2 算法的排序要求为节点 x_u 在排序中排在节点 x_j 之前,节点 x_j 就不能成为节点 x_u 的父节点。在 K2 算法中,节点 x_u 的候选父节点 $P_a(x_u)$ 初始设置为空集。K2 算法根据之前节点排序中指定的顺序访问每个节点,如果节点 x_u 的父节点 $P_a(x_u)$ 的添加能使网络得分最大化,则算法会将 $P_a(x_u)$ 添加到节点 x_u 的父节点集合中,反之,则不能添加。当满足以下任一条件时,算法停止:

- (1) 该节点的父节点数已达到上限。
- (2) 没有可添加的合法父节点。
- (3) 增加的父节点都不能提高网络得分。

K2 算法的性能在很大程度上受节点排序的影响。如果所有父节点的排序都在子节点之前,算法的性能就会达到最佳,结果也会非常准确。节点排序信息缩小了搜索空间,故 K2 算法比其他算法高效。

综上所述,算法的重点是从数据中获取节点排序。这个排序可以作为 K2 算法的输入参数,从而更准确地学习贝叶斯网络结构。基于节点序研究,文献[22]提出 DK2 算法。DK2 算法的步骤如下:

(1) 初始节点序以节点信息为准,采用 K2 算法找到各节点最佳父节点,以此构造初始结构,即邻近矩阵 DAG。

(2) 根据 DAG 中各元素具备的特性,调用拓扑排序方法^[23]获得一组线性排列。其中,更新后的节点序的标准为该排列满足子节点处于父节点之后。

(3) 再次利用 K2 算法根据更新后的节点序搜索得到最佳的网络结构。

2.3 描述源荷变量的相关性

采用 DK2 算法的贝叶斯网络结构学习描述源荷变量的相关性步骤如下。

(1) 核密度估计。核密度估计(kernel density estimation, KDE)可以根据源荷(风速、光照强度、负荷)数据,分别得到关于源荷的概率密度函数 $f_u(y_u)$ 、累积分布函数 $F_u(y_u)$ 、反函数 $F_u^{-1}(y_u)$,再依据 $F_u(y_u)$ 将源荷变量 y_u 转换为概率 t_u (t_u 为均匀分布)。

$$\begin{cases} F_1(y_1) = t_1 \\ F_2(y_2) = t_2 \\ \vdots \\ F_u(y_u) = t_u \\ \vdots \\ F_n(y_n) = t_n \end{cases} \quad (8)$$

(2) 离散化处理。无论是离散变量还是连续变量,都可采用贝叶斯网络进行处理,但连续变量须预先假设服从某分布,才能采用贝叶斯网络处理。因此,文中须先对连续变量 t_u 进行处理。其中,由于最大信息系数方法的特性是最大化的保留网络结构信息,故文中采用最大信息系数方法处理连续变量。

(3) 结构及参数学习。得到源荷变量的离散化数据后,便可采用 DK2 算法的贝叶斯网络结构学习构建源荷变量 y_u 的相关性关系,再对贝叶斯网络参数学习利用最大似然估计法,得到关于父与子节点的条件概率,以此构造可用于描述源荷变量相关性的模型。

采样的顺序为从父节点至子节点,得到源荷变量概率的离散矩阵 W_C ,表示如下:

$$W_C = [W_{1,C} \quad W_{2,C} \quad \dots \quad W_{u,C} \quad \dots \quad W_{n,C}] \quad (9)$$

式中: $C=1, 2, \dots, q$ 为抽样的次数, q 为抽样总次数; $W_{u,C}$ 、 $W_{n,C}$ 分别为第 u 、 n 个节点 C 次抽样后的离散值; W_C 为离散值矩阵,需 n 个节点通过 C 次抽样后得到。

在获得 $W_{u,C}$ 后,通过随机数和各离散值对应的连续区间,获得概率值 $t_{u,C}$,以此再获得概率值矩阵 T_C ,表示如下:

$$T_C = [t_{1,C} \quad t_{2,C} \quad \dots \quad t_{u,C} \quad \dots \quad t_{n,C}] \quad (10)$$

式中: T_C 为概率值矩阵; $t_{u,C}$ 、 $t_{n,C}$ 分别为第 u 、 n 个节点 C 次抽样后的概率值。

在获得 $t_{u,C}$ 后,通过逆变换得到源荷随机变量的相关性样本 $y_{u,C}$,表示如下:

$$\begin{cases} y_{1,C} = F_1^{-1}(t_{1,C}) \\ y_{2,C} = F_2^{-1}(t_{2,C}) \\ \vdots \\ y_{u,C} = F_u^{-1}(t_{u,C}) \\ \vdots \\ y_{n,C} = F_n^{-1}(t_{n,C}) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $y_{u,C}$ 为第 u 个节点源荷变量 C 次抽样后的相关性样本; $F_u^{-1}(t_{u,C})$ 为相应源荷变量累积分布函数的反函数。

(4) 风光有功出力模型。通过以上步骤获得光照强度的数据后,采用光照强度-光伏电站有功出力模型 $P_g(s)$ 转换成光伏出力, $P_g(s)$ 的表达式为:

$$P_g(s) = \begin{cases} \frac{s}{s_r} P_r & s \leq s_r \\ P_r & s > s_r \end{cases} \quad (12)$$

式中: P_r 为额定功率; s_r 、 s 分别为额定、实时光照强度。

获得风速的数据后,采用风速-风电场有功出力模型 $P_f(\nu)$ 转换成风电出力, $P_f(\nu)$ 的表达式为:

$$P_f(\nu) = \begin{cases} 0 & \nu \leq \nu_{ci} \\ k_1 \nu + k_2 & \nu_{ci} < \nu \leq \nu_r \\ P_N & \nu_r < \nu \leq \nu_{co} \\ 0 & \nu > \nu_{co} \end{cases} \quad (13)$$

式中: ν_{co} 、 ν_{ci} 、 ν_r 分别为切出、切入、额定风速; ν 为实时风速; $k_1 = P_r / (\nu_r - \nu_{ci})$; $k_2 = -k_1 \nu_{ci}$; P_N 为装机容量。

3 合环电流概率潮流计算

3.1 合环电流方程和潮流方程的数学模型

设输入变量为 $Y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_u \ \dots \ y_n]^T$, 合环电流方程以及系统潮流方程皆采用矩阵, 在选定基准点后, 根据泰勒级数方法展开矩阵, 并且忽略其中的高次项, 即:

$$\begin{cases} Z = Z_0 + \Delta Z = Z_0 + D \cdot \Delta Y \\ Z = f(Y_0 + \Delta Y) = f(Y_0) + J_0 \cdot \Delta X \\ I = I_0 + \Delta I = T(X_0) + S_0 \cdot \Delta X \\ I = T(X_0 + \Delta X) = T(X_0) + S_0 \cdot \Delta X \end{cases} \quad (14)$$

式中: Z 为节点注入功率变量; Z_0 、 Y_0 、 I_0 、 X_0 分别为系统状态变量、输入变量、合环电流变量、输出变量的期望值; ΔZ 、 ΔI 分别为 Z 、 I 随机扰动; $f(Y_0)$ 、 $f(Y_0 + \Delta Y)$ 分别为基准运行下、随机扰动下的潮流方程; $T(X_0)$ 、 $T(X_0 + \Delta X)$ 分别为基准运行下、随机扰动下的合环电流方程; ΔX 、 ΔY 分别为系统状态变量、输入变量; D 为合环前两首端有功和无功组成的对角矩阵; J_0 为雅可比矩阵; S_0 为系数矩阵, 表达式如式(15)所示。

$$S_0 = (\partial T(X) / \partial X) |_{X=X_0} \quad (15)$$

由式(14)可得 $\Delta X = J_0^{-1} \cdot D \cdot \Delta Y$, 令合环电流方程的灵敏度矩阵 $F_0 = S_0 \cdot J_0^{-1} \cdot D$, 则上述矩阵方程组可简化为:

$$\begin{cases} Z = Z_0 + D \cdot \Delta Y \\ I = I_0 + F_0 \cdot \Delta Y \end{cases} \quad (16)$$

3.2 源荷变量采样及合环电流概率分布计算

(1) 基于 Cholesky 分解的源荷变量采样。由

2.3节方法步骤获得源荷预测数据后,通过 KDE 方法得到源荷数据各自服从指定分布的概率密度函数。将相互独立的标准正态随机变量 Z 转换为相关性的服从指定分布的随机变量 Y 的具体采样步骤如下。

① 利用采样方法得到相互独立的标准正态随机变量 Z 的样本 Z_w 。

② 对变量 Z 的相关系数矩阵 C_z 进行 Cholesky 分解转换得到下三角矩阵 V , 即:

$$C_z = VV^T \quad (17)$$

③ 依次得到相关性的标准正态随机变量 X 的样本 X_w , 即:

$$X_w = V^{-1} Z_w \quad (18)$$

④ 通过等概率转换原则即可将变量 X_w 依次转换为服从指定分布的变量 Y 的样本 Y_w 。

$$Y_w = F^{-1}(\Phi(X_w)) \quad (19)$$

式中: $\Phi(X_w)$ 为具有相关性的标准正态随机变量样本 X_w 的累积分布函数。

(2) 求取合环电流概率分布函数。合环电流变量 $I = [I'_a \ I'_b \ I_{aM} \ I_{bM}]^T$ 作为输出变量, 其概率分布的求取主要有 2 个步骤: 第一步, 计算 I 的 k 阶半不变量; 第二步, 采用 Cornish-Fisher 级数方法求取 I 的概率分布函数。具体步骤如下:

① 由式(16)可知, 合环电流 ΔI 的求取前提是求取 ΔY , 假设 $F_0^{(d)}$ 为灵敏度矩阵 F_0 里各元素 d 次方所组成的矩阵, $\Delta Y^{(k)}$ 为输入变量的 k 阶半不变量, 求取合环电流的 k 阶半不变量, 即:

$$\Delta I^{(k)} = F_0^{(d)} \cdot \Delta Y^{(k)} \quad (20)$$

② 文中采用 Cornish-Fisher 级数, 再根据合环电流的各阶半不变量, 展开获得合环电流的概率分布函数。假设合环电流 I'_a 的分位数为 δ , 则 $I'_a(\delta)$ 表达为:

$$I'_a(\delta) = \xi(\delta) + \frac{\xi^2(\delta) - 1}{6} k_3 + \frac{\xi^3(\delta) - 3\xi(\delta)}{24} k_4 + \frac{2\xi^3(\delta) - 5\xi(\delta)}{36} k_3^2 + \frac{\xi^4(\delta) - 6\xi^2(\delta) + 3}{120} k_5 \quad (21)$$

式中: $\xi(\delta) = \Phi^{-1}(\delta)$; k_3 、 k_4 、 k_5 分别为 3、4、5 阶规格化半不变量; $I'_a(\delta) = F_a^{-1}(\delta)$ 。

3.3 合环电流评估指标及算法流程

(1) 合环电流评估指标。已知合环电流变量 $I = [I'_a \ I'_b \ I_{aM} \ I_{bM}]^T$, 若需要主动配电网达到安全成功合环的目的, 则合环后满足以下要求^[18]:

① I'_a 和 I'_b 都不得超过合环点两侧的最大载流量;

② I_{aM} 和 I_{bM} 都不得超过合环点两侧的电流 I 段保护整定值。

在求得合环电流概率分布后,将合环后需要满足的 2 个条件作为限定值,便可以判断合环成功概率。

设合环两侧线路 a、b 的最大载流量分别为 $I_{\max,a}$ 、 $I_{\max,b}$,合环两侧线路 a、b 的电流 I 段保护整定值分别为 $I_{\text{set}I,a}$ 、 $I_{\text{set}I,b}$ 。若合环电流变量 I'_a 、 I'_b 、 I_{aM} 、 I_{bM} 对应的累积分布函数分别为 $F_1(x)$ 、 $F_2(x)$ 、 $F_3(x)$ 、 $F_4(x)$,其中 x 为合环电流变量,则有合环成功概率为:

$$\begin{cases} P_a(I'_a \leq I_{\max,a}) = F_1(I_{\max,a}) \\ P_b(I'_b \leq I_{\max,b}) = F_2(I_{\max,b}) \\ P_{aM}(I_{aM} \leq I_{\text{set}I,a}) = F_3(I_{\text{set}I,a}) \\ P_{bM}(I_{bM} \leq I_{\text{set}I,b}) = F_4(I_{\text{set}I,b}) \end{cases} \quad (22)$$

式中: $P_a(I'_a \leq I_{\max,a})$ 为馈线 a 合环稳态电流的成功合环概率; $P_b(I'_b \leq I_{\max,b})$ 为馈线 b 合环稳态电流的成功合环概率; $P_{aM}(I_{aM} \leq I_{\text{set}I,a})$ 为馈线 a 合环冲击电流的成功合环概率; $P_{bM}(I_{bM} \leq I_{\text{set}I,b})$ 为馈线 b 合环冲击电流的成功合环概率。

令 I_V 为 99.9% 的累积分布函数概率对应的合环电流 I'_a 最大值,表示为 $I_V = F_a^{-1}(99.9\%)$ 。其中,合环电流 I'_a 的概率密度函数为 $f(x)$ 。则 I'_a 的最大越限率和平均越限率分别表示为:

$$\begin{cases} \varepsilon_m = \left(\frac{I_V}{I_{\max,a}} - 1 \right) \times 100\% \\ \varepsilon_a = \left(\frac{\int_{I_{\max,a}}^{I_V} xf(x) dx}{\int_{I_{\max,a}}^{I_V} f(x) dx} - 1 \right) \times 100\% \end{cases} \quad (23)$$

在实际合环操作中,通常认为合环电流的 ε_m 小于 10% 且 ε_a 小于 5% 是安全的。同理可得,合环电流 I'_b 、 I_{aM} 、 I_{bM} 皆可通过式 (23) 计算出相应的最大越限率和平均越限率。将 I'_a 、 I'_b 、 I_{aM} 、 I_{bM} 的合环成功率、最大越限率、平均越限率作为合环安全评估指标,即可对主动配电网馈线合环安全性操作进行合环成功率及越限程度的评估。

(2) DK2-PLF 算法流程。由 2.3 节及 3.2 节的方法步骤可得,基于 DK2-PLF 的主动配电网馈线合环电流评估算法流程如图 2 所示。

基于 DK2-PLF 的主动配电网馈线合环电流计算的重点在于 2 个方面:一是利用 DK2 算法的贝叶斯网络描述源荷相关性样本;二是利用半不变量法结合 Cornish-Fisher 级数对合环电流的累积概率分布进行计算。

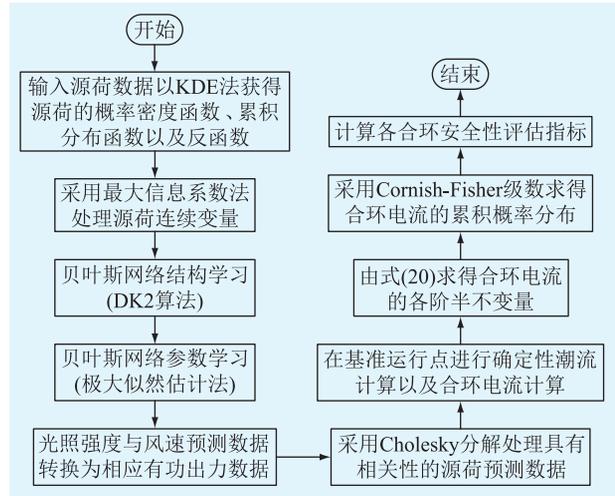


图 2 算法流程

Fig.2 Algorithm process

4 算例分析

4.1 DK2 算法准确性验证

以贵州某城市 10 kV 配电网系统为例,对 DK2 算法准确性进行验证。采集一年样本(8 760 组)的光照强度、风速、负荷数据,用 KDE 法得到各概率密度以及累积分布曲线如图 3—图 5 所示。

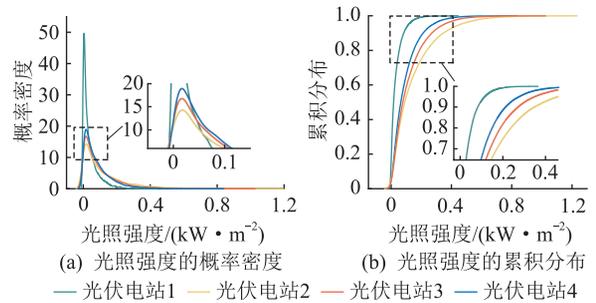


图 3 光照强度的概率密度与累积分布

Fig.3 Probability density and cumulative distribution of light intensity

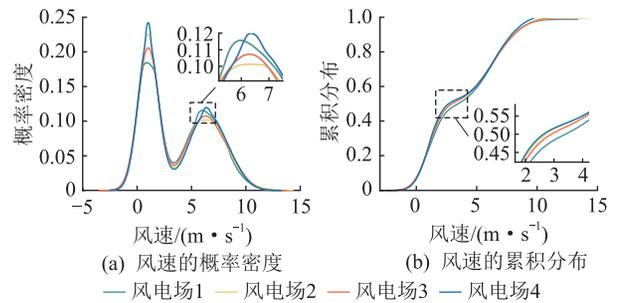


图 4 风速的概率密度与累积分布

Fig.4 Probability density and cumulative distribution of wind speed

目前光照强度的概率密度曲线多为 Beta 分布,风速的概率密度曲线多为 Weibull 分布,负荷的概

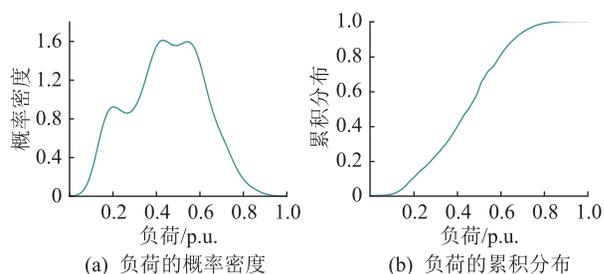


图5 负荷的概率密度与累积分布

Fig.5 Probability density and cumulative distribution of load

率密度曲线多为正态分布。从图3—图5可知,光照强度、风速、负荷实际的概率密度曲线如果使用Beta、Weibull、正态分布并不能完全描述其分布特征。

因此文中利用DK2算法的贝叶斯网络对源荷的分布特征进行描述,得到准确的源荷预测数据,以便保证后续概率潮流计算的精确性。

为验证DK2算法的源荷预测准确性与优越性,对光伏电站1、风电场3、负荷的概率密度曲线与累积分布曲线进行比较,如图6—图8所示。

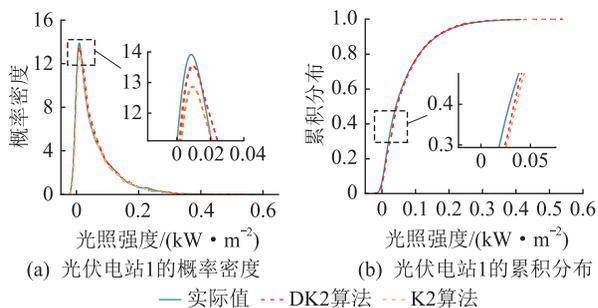


图6 实际与预测光照强度概率密度与累积分布

Fig.6 Probability density and cumulative distribution of actual and predicted light intensity

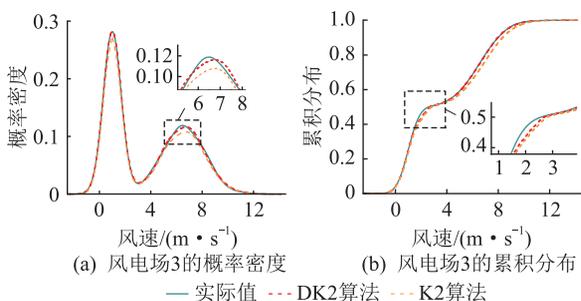


图7 实际与预测风速概率密度与累积分布

Fig.7 Probability density and cumulative distribution of actual and predicted wind speed

图6中概率密度曲线仅在尖峰有所误差,累积分布曲线在概率0.3~0.4之间出现最大误差。图7中概率密度曲线仅在在第2个尖峰处有误差,累积分布曲线在概率0.4~0.5之间出现最大误差。图8中

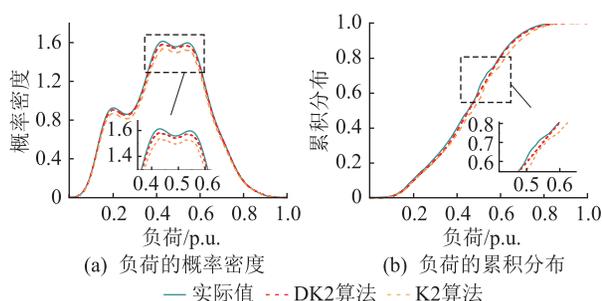


图8 实际与预测负荷概率密度与累积分布

Fig.8 Probability density and cumulative distribution of actual and predicted load

概率密度曲线仅在后2个尖峰处有所误差,累积分布曲线在概率0.6~0.7之间出现最大误差。实际值与预测值的最大误差如图9所示。

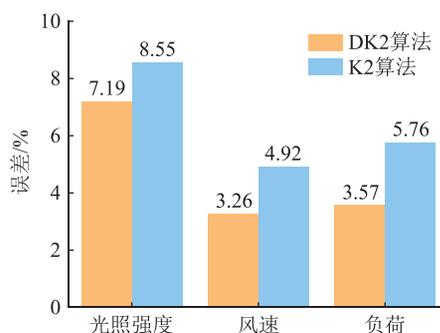


图9 实际值与预测值的最大误差

Fig.9 Maximum error between actual and predicted value

由图9可知,DK2算法以及K2算法的贝叶斯网络预测的光伏电站1最大误差分别为7.19%、8.55%;DK2算法以及K2算法的贝叶斯网络预测的风速3最大误差分别为3.26%、4.92%;DK2算法以及K2算法的贝叶斯网络预测的负荷最大误差分别为3.57%、5.76%。风速和负荷的预测误差都较小,光照强度的预测误差都相对较大。这是因为光伏电站1的概率密度曲线在光照强度0附近波动较剧烈,导致2种算法预测所得的光照强度的误差都相对较大。

通过比较图6—图9,从概率密度、累积分布、最大误差三方面对源荷样本进行检验,结果表明基于DK2算法的贝叶斯网络能够准确对源荷进行预测,预测模型的准确性得到验证。由图9可知,DK2算法比K2算法误差较小,验证DK2算法的优越性,为后续准确完成合环电流概率潮流计算奠定基础。

4.2 半不变量法准确性验证

以贵州某地区10 kV配电网系统为例,对半不变量法的准确性进行验证。

图10为10 kV馈线a、b的负荷分布,且分别在

2 条母线上考虑接入 DG,即光伏以及风电。其中,光伏接入 10 kV 馈线 a 的节点 6、16 和 10 kV 馈线 b 上的节点 5、17,风电接入 10 kV 馈线 a 的节点 3、8 和 10 kV 馈线 b 上的节点 14、16。

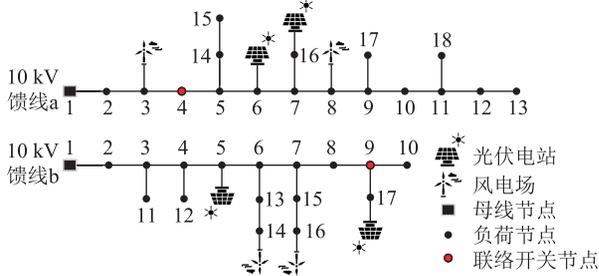


图 10 10 kV 馈线 a、b 负荷分布

Fig.10 Load distribution of 10 kV feeder lines a and b

首先,通过 DK2 算法描述获得 1 000 组光照强度、风速以及负荷样本,并作为输入对 DiGSILENT 模型进行仿真。其次,统计 DiGSILENT 仿真模型获得的合环稳态电流以及合环冲击电流数据,得到合环稳态电流以及合环冲击电流的累积分布曲线。同时,将 DK2 算法描述的样本用 MATLAB 仿真计算,再依据采用 Cholesky 分解方法的半不变量法(方法一)、未采用 Cholesky 分解方法的半不变量法(方法二)、蒙特卡洛法(方法三)计算馈线 a 的合环稳态电流以及合环冲击电流的累积分布曲线,如图 11—图 13 所示。

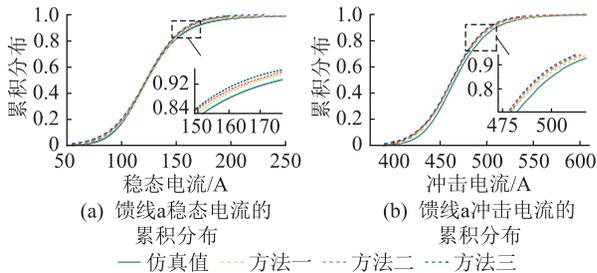


图 11 馈线 a 稳态电流和冲击电流的累积分布

Fig.11 Probability cumulative distribution of steady state and inrush currents in feeder a

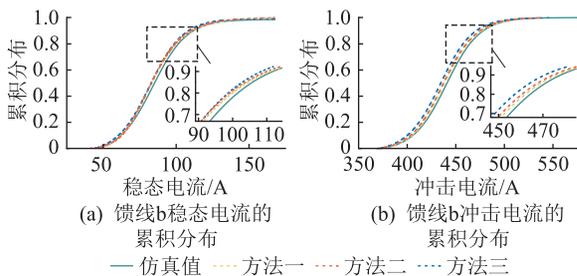


图 12 馈线 b 稳态电流和冲击电流的累积分布

Fig.12 Probability cumulative distribution of steady state and inrush currents in feeder b

由图 11—图 13 可知,与蒙特卡洛法以及未采

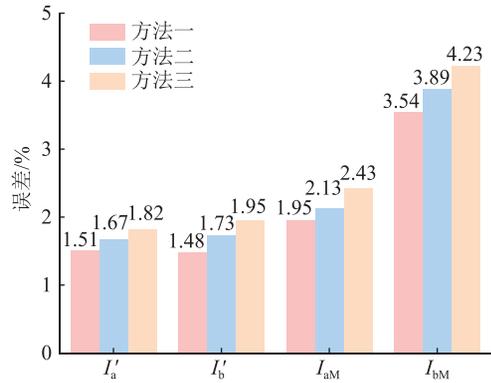


图 13 计算值与仿真值的最大误差

Fig.13 Maximum error between calculated and simulated value

用 Cholesky 分解方法的半不变量法对比,采用 Cholesky 分解方法的半不变量法计算的累积分布曲线更好地贴合于仿真得到的累积分布曲线。图 13 中,相较于蒙特卡洛法以及未采用 Cholesky 分解方法的半不变量法,采用 Cholesky 分解方法的半不变量法计算的累积分布曲线与仿真值的最大误差值更小,且均不超过 4%。综上所述,合环电流概率分布采用 Cholesky 分解方法的半不变量法进行计算时,误差较小,有较高的准确性。

4.3 合环安全性评估校验

校验采用半不变量法计算的合环电流概率分布的安全性。已知 10 kV 的馈线 a 以及馈线 b 的最大载流量: $I_{max,a} = 220 A, I_{max,b} = 125 A$; 10 kV 的馈线 a 以及馈线 b 的电流 I 段保护整定值: $I_{set1,a} = 2.3 kA, I_{set1,b} = 1.5 kA$ 。计算得出合环电流安全性评估指标如表 1 所示。

表 1 合环安全性评估

Table 1 Loop closing safety assessment

合环电流	合环成功率/%		最大越限率/%		平均越限率/%	
	计算	仿真	计算	仿真	计算	仿真
I'_a	94.92	93.18	14.09	13.58	4.32	4.12
I'_b	95.85	96.78	13.60	12.54	4.05	3.82
I_{aM}	≈ 100		—		—	
I_{bM}	≈ 100		—		—	

由表 1 可知,采用半不变量法计算的合环电流安全性指标结果与仿真结果偏差在电网经验误差 5% 范围内,准确度较高,对于主动配电网合环操作,可以有效地进行安全性评估。采用文中方法进行合环操作安全性评估所需时间为 2.65 s,能够满足工程中对时效性的要求。

5 结论

文中提出基于 DK2-PLF 的主动配电网馈线合

环电流评估研究方法。首先,采用 DK2 算法的贝叶斯网络对源荷相关性样本进行描述;然后,用半不变量法计算合环电流的累积分布概率;最后,以合环成功率和越限程度评价指标进行安全性评估。得到以下结论:

(1) DK2 算法的贝叶斯网络的源荷预测数据相比于 K2 算法误差较小,能保持源荷数据原有的相关性,保证主动配电网概率潮流计算的数据准确性。

(2) 在使用 Cholesky 分解方法处理获得的源荷相关性样本后,半不变量法的计算精度高,比未采用 Cholesky 分解方法的半不变量法以及蒙特卡洛法的误差小,符合主动配电网合环安全性评估要求。

(3) 基于 DK2-PLF 的主动配电网馈线合环电流评估方法,采用 Cholesky 分解方法的半不变量法计算的合环电流安全性指标结果与仿真结果偏差在电网经验误差 5% 范围内,准确度较高,对于主动配电网合环操作,可以有效地进行安全性评估。

参考文献:

- [1] 衣秀清,顾洁,刘书琪. 考虑需求响应的配电网弹性提升优化[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(4):29-37.
YI Xiuqing, GU Jie, LIU Shuqi. Optimization of distribution network resilience enhancement considering demand response[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4):29-37.
- [2] 李俊林,韩捷,谢聪,等. 多应用场景低压配网无缝合环转电解决方案[J]. 电力建设,2022,43(7):113-120.
LI Junlin, HAN Jie, XIE Cong, et al. Solutions for seamless closed-loop load transfer of low-voltage distribution network in multiple application scenarios[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(7):113-120.
- [3] 刘艳茹,刘洪,谷毅,等. 考虑多种终端配置的中低压配电网供电可靠性协同评估[J]. 电力建设,2022,43(2):54-62.
LIU Yanru, LIU Hong, GU Yi, et al. Cooperative evaluation of power supply reliability of medium and low voltage distribution network considering multiple terminal configurations[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(2):54-62.
- [4] 纪焕聪,夏成军,赖胜杰,等. 基于改进极限梯度提升算法的配电网合环转供电影响因素评估[J]. 南方电网技术,2023,17(6):18-25.
JI Huancong, XIA Chengjun, LAI Shengjie, et al. Influencing factors assessment of power transfer from loop closing in distribution network based on XGBoost algorithm[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(6):18-25.
- [5] 黎静华,骆怡辰,杨舒惠,等. 可再生能源电力不确定性预测方法综述[J]. 高电压技术,2021,47(4):1144-1155.
LI Jinghua, LUO Yichen, YANG Shuhui, et al. Review of uncertainty forecasting methods for renewable energy power[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4):1144-1155.
- [6] RAMADHANI U H, SHEPERO M, MUNKHAMMAR J, et al. Review of probabilistic load flow approaches for power distribution systems with photovoltaic generation and electric vehicle charging[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 120:106003.
- [7] FRÍAS-PAREDES L, MALLOR F, GASTÓN-ROMEO M, et al. Assessing energy forecasting inaccuracy by simultaneously considering temporal and absolute errors[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 142:533-546.
- [8] HUANG Q, LI J H, ZHU M S. An improved convolutional neural network with load range discretization for probabilistic load forecasting[J]. Energy, 2020, 203:117902.
- [9] 王洪涛,李晓刚,邹斌. 基于贝叶斯网络刻画风-光-荷相关性的配电网概率潮流计算[J]. 中国电机工程学报,2019,39(16):4753-4763.
WANG Hongtao, LI Xiaogang, ZOU Bin. Probabilistic load flow calculation of distribution system based on Bayesian network to depict wind-photovoltaic-load correlation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16):4753-4763.
- [10] 周冠波. 地区电网合环转电风险评估与对策研究[D]. 广州:华南理工大学,2011.
ZHOU Guanbo. Study on risk assessment and countermeasures of switching from closed loop to power in regional power grid[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2011.
- [11] 付轲,蔡泽祥,邱建,等. 10 kV 电网电磁合环操作安全性评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2010,22(4):71-76.
FU Ke, CAI Zexiang, QIU Jian, et al. Safety assessment methods of loop closing operation in 10 kV distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2010, 22(4):71-76.
- [12] FENG W, SHI Q X, CUI H T, et al. Optimal power allocation strategy for black start in VSC-MTDC systems considering dynamic impacts[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 193:107023.
- [13] KIM S, HUR J. A probabilistic modeling based on Monte Carlo simulation of wind powered EV charging stations for steady-states security analysis[J]. Energies, 2020, 13(20):5260.
- [14] MORALES J M, BARINGO L, CONEJO A J, et al. Probabilistic power flow with correlated wind sources[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4(5):641.
- [15] CARPINELLI G, CARAMIA P, VARILONE P. Multi-linear Monte Carlo simulation method for probabilistic load flow of distribution systems with wind and photovoltaic generation systems[J]. Renewable Energy, 2015, 76:283-295.
- [16] XIAO H, PEI W, WU L, et al. A novel deep learning based probabilistic power flow method for multi-microgrids distribution system with incomplete network information[J]. Applied Energy, 2023, 335:120716.
- [17] 周自强,张焰,郭强,等. 基于概率潮流的 10 kV 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 Tech-

- nology, 2019, 43(4):1421-1429.
- [18] 刘健,孙泉,张小庆,等. 配电网合环分析与合环条件判断[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11):130-135.
LIU Jian, SUN Quan, ZHANG Xiaoqing, et al. Analysis on and criteria for loop closing operation for distribution grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11):130-135.
- [19] 李晓柯,李祥发. 配电网合环冲击电流的暂态过程分析与仿真[J]. 机电工程, 2010, 27(5):67-70.
LI Xiaoke, LI Xiangfa. Transient analysis and simulation of surge current due to closing loop in distribution network[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2010, 27(5):67-70.
- [20] KRAPU C, STEWART R, ROSE A. A review of Bayesian networks for spatial data[J]. ACM Transactions on Spatial Algorithms and Systems, 2023, 9(1):1-21.
- [21] HECKERMAN D, GEIGER D. Likelihoods and parameter priors for Bayesian networks[EB/OL]. 2021; 2105.06241. <https://arxiv.org/abs/2105.06241v2>.
- [22] 李晓晴,于海征. 贝叶斯网络结构学习的双重 K2 算法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(24):10602-10610.
LI Xiaoqing, YU Haizheng. Double K2 algorithm for Bayesian network structure learning[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(24):10602-10610.
- [23] HUANG Q, WEI S Y. Improved quantile convolutional neural network with two-stage training for daily-ahead probabilistic forecasting of photovoltaic power[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 220:113085.

作者简介:



黄跃

黄跃(2000),男,硕士在读,研究方向为配电网规划与运行(E-mail: 2093719775@qq.com);

荣娜(1979),女,博士,讲师,研究方向为新能源规划;

陈世威(1998),男,硕士在读,研究方向为配电网规划与运行。

Active distribution network feeder loop closing current assessment based on DK2-PLF

HUANG Yue¹, RONG Na¹, CHEN Shiwei¹, GUO Yuanping²

(1. College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Power Grid Planning Research Center, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

Abstract: The research of loop closing current assessment has great significance for distribution network feeder loop closing operation to supply power. In order to enhance the accuracy of active distribution network feeder loop closing current calculation, an active distribution network feeder loop closing current assessment research method based on double K2 algorithm and probability load flow (DK2-PLF) is proposed in this paper, which also considers the prediction and distribution characteristics of source-load data. Firstly, Bayesian network based on DK2 algorithm is suggested to characterize the correlation of source-load samples. Secondly, the Cholesky decomposition method is proposed to deal with the predictive source-load samples, and the cumulative probability distributions of the loop closing current are calculated by cumulant method. Thirdly, the security assessment of the loop closing current is evaluated in terms of the success rate and the degree of exceeding the limit. Finally, taking a city in Guizhou as an example, the following conclusions are drawn from the study of 10 kV distribution system. Comparing from the aspects of probability density, cumulative distribution, and maximum error, the probability density and cumulative distribution errors of the DK2 algorithm are smaller than those of the K2 algorithm's predicted values, which verifies the superiority of DK2 algorithm. Comparing from the aspects of cumulative distribution, and maximum error, the cumulative distribution error of the cumulant method with Cholesky decomposition is smaller than that of the cumulant method without Cholesky decomposition and Monte Carlo method. The cumulant method with Cholesky decomposition meets the requirements of active distribution network feeder loop closing current assessment. Comparing from the aspects of loop closing success rate and the degree of exceeding the loop closing limit, the safety index of loop closing current computed by the cumulant method deviates from the simulation results is within 5% of the grid empirical error, which indicates that the active distribution network feeder loop closing current assessment method based on DK2-PLF can provide a reference for loop closing assisted decision-making.

Keywords: distribution network loop closing operation; double K2 (DK2) algorithm; probability forecast; probability load flow; indicators for loop closing current assessment; DIGSILENT simulation

(编辑 吴昊)