

基于半不变量随机潮流的电网连锁故障预防

邓慧琼^{1,2}, 邹磊^{1,2}, 沈俊富^{1,2}

(1. 智能电网仿真分析与综合控制福建省高校工程研究中心(福建理工大学), 福建 福州 350118;

2. 福建理工大学电子电气与物理学院, 福建 福州 350118)

摘要:针对电力系统中负荷随机波动导致的连锁故障现象,提出了一种基于半不变量随机潮流的电力系统连锁故障预防方法。根据系统中支路电流与节点电压的关系,得到支路电流与节点电压灵敏度矩阵,依据该灵敏度矩阵以及潮流雅可比矩阵得到了支路电流与节点注入功率的线性关系,结合半不变量法给出了支路电流概率密度函数的数学表达。考虑到电力系统的安全性,定义了电力系统安全裕度指标,并给出了优化模型。以 IEEE39 节点系统为例结合粒子群算法进行了仿真,结果表明:该方法用来预防电力系统连锁故障以及提高电力系统安全性是有效的。

关键词:电力系统;连锁故障;随机潮流;半不变量;粒子群算法

中图分类号:TM711 **文献标志码:**B **文章编号:**1001-9898(2026)01-0009-08

Prevention of Cascading Failure in Power Grid Based on Semi-invariant Probabilistic Power Flow

DENG Huiqiong^{1,2}, ZOU Lei^{1,2}, SHEN Junfu^{1,2}

(1. Simulation Analysis and Integrated Control of Smart Grid Engineering Research Center of Colleges and Universities in Fujian Province, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China; 2. School of Electronic, Electrical Engineering and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: A method for preventing cascading failure in power systems based on semi-invariant probabilistic power flow is proposed to address the phenomenon of cascading failure caused by random load fluctuations in the power system. According to the relationship between branch current and node voltage in the power system, the sensitivity matrix of branch current and node voltage is obtained. Based on this sensitivity matrix and the power flow Jacobian Matrix, the linear relationship between branch current and node injection power is obtained. The mathematical expression of the probability density function of branch current is given by combining the semi-invariant method. Considering the safety of the power system, a power system security margin index for the power system has been defined, and an optimization model has been proposed. Taking the IEEE 39-bus system as an example, simulations are carried out using the particle swarm optimization (PSO) algorithm to solve the proposed optimization model.

Key words: power system; interlocking failure; probabilistic power flow; semi-invariant; particle swarm optimization algorithm

0 引言

国内外发生的多次大停电事故表明连锁故障是导致大停电的主要原因之一。在连锁故障发展的初期,电力系统往往受到几个关键元件的影响,输电线路则作为其中关键元件之一,当某些线路因

短路或其他原因出现故障,使得线路继电保护装置发生动作,故障支路退出运行后,系统发生潮流转移,剩余支路的继电保护装置相继出现动作,切断其他未故障支路,进而引发连锁故障,最终造成大范围的停电事故。在传统电力系统分析中,负荷波动以及电网运行方式的变化等因素会给系统造成

收稿日期:2024-12-27 修回日期:2025-06-20

作者简介:邓慧琼(1972—),男,副教授,研究方向为电力系统连锁故障分析与预防。

基金项目:福建省自然科学基金资助项目(2022J01948)。

一定程度上的不确定性,这对电力系统的安全稳定运行以及连锁故障的预防带来新的挑战^[1]。

目前,关于电力系统连锁故障控制的研究大多从事故前和事故中对其做出预防^[2]。针对事故前的预防,文献[3]指出在系统拓扑结构、电网参数以及初始故障位置确定的前提下,是否会激发连锁故障主要取决于系统的初始潮流状态。基于该结论,文献[4]根据偏移阻抗继电器动作特性提出了一种衡量电力系统安全性的指标,考虑到电网的电压稳定水平,给出了兼顾电压稳定以及系统安全性的多目标连锁故障预防模型。文献[5]根据加权潮流熵指标筛选初始故障,兼顾了系统的安全性与经济性给出了目标连锁故障预防模型。以上模型虽然给出了连锁故障预防措施,但并未考虑系统中可能出现的负荷波动而带来的潮流不确定性问题。

针对电力系统潮流不确定性问题,主要采用概率潮流来解决,包括模拟法、近似法和解析法。文献[6]考虑到含风电系统连锁故障的预防,利用蒙特卡洛概率潮流的方法,对初始故障后的剩余支路进行筛选,根据剩余支路跳闸的概率提出了衡量系统安全性的裕度指标,并给出了优化模型。该模型虽然考虑到了系统的潮流不确定性,但蒙特卡洛模拟法需要大量样本数据,且计算时间较长。文献[7]利用半不变量法结合 Gram-Charlier 级数计算概率潮流,并将蒙特卡洛模拟法概率潮流为基准组对比,结果表明半不变量法具有很高的准确性,文献[8]基于半不变量理论推导输入与输出状态变量的概率特征,提出了一种计及风电、光伏及储能系统不确定性的半不变量概率潮流计算方法。

本文考虑到负荷波动导致的潮流不确定性,提出了利用半不变量法的概率潮流计算对电网连锁故障进行预防。首先将支路电流用复数的形式展开,并给出支路电流与节点注入功率之间的线性关系。然后,利用半不变量结合 Gram-Charlier 级数展开得到系统中支路电流的概率密度函数,基于此定义了电网安全裕度指标,并给出了考虑安全性的电网连锁故障预防控制模型。最后,通过 IEEE39 节点系统结合粒子群算法对该模型进行求解,仿真结果验证了该连锁故障预防控制模型的有效性。

1 支路电流概率密度函数

假设电网中某一支路 L_{ij} ,首节点 i 的电压为 $U_i \angle \theta_i$,末节点 j 的电压为 $U_j \angle \theta_j$,支路导纳为 $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$, G_{ij} 、 B_{ij} 分别为支路 L_{ij} 的电导与电纳。此时支路 L_{ij} 上的电流 I_{ij} 以向量的形式可表示为:

$$\dot{I}_{ij} = (\dot{U}_i - \dot{U}_j) Y_{ij} \quad (1)$$

将式(1)展开,分别得到支路电流实部与虚部为:

$$\begin{cases} \text{Re}(\dot{I}_{ij}) = U_i (G_{ij} \cos \theta_i - B_{ij} \sin \theta_i) \\ \quad - U_j (G_{ij} \cos \theta_j - B_{ij} \sin \theta_j) \\ \text{Im}(\dot{I}_{ij}) = U_i (G_{ij} \sin \theta_i + B_{ij} \cos \theta_i) \\ \quad - U_j (G_{ij} \sin \theta_j + B_{ij} \cos \theta_j) \end{cases} \quad (2)$$

若某时刻电网中的潮流改变,可将式(2)中的支路电流实部与虚部分别对节点 i 与节点 j 的电压幅值与相角在基准点处泰勒展开,并略去二阶及以上项可求得支路电流实部与虚部各自的增量:

$$\begin{cases} \text{Re}(\Delta \dot{I}_{ij}) = -U_i (G_{ij} \sin \theta_i + B_{ij} \cos \theta_i) \Delta \theta_i \\ \quad + U_i (G_{ij} \cos \theta_i - B_{ij} \sin \theta_i) \Delta U_i / U_i \\ \quad + U_j (G_{ij} \sin \theta_j + B_{ij} \cos \theta_j) \Delta \theta_j \\ \quad - U_j (G_{ij} \cos \theta_j - B_{ij} \sin \theta_j) \Delta U_j / U_j \\ \text{Im}(\Delta \dot{I}_{ij}) = U_i (G_{ij} \cos \theta_i - B_{ij} \sin \theta_i) \Delta \theta_i \\ \quad + U_i (G_{ij} \sin \theta_i + B_{ij} \cos \theta_i) \Delta U_i / U_i \\ \quad - U_j (G_{ij} \cos \theta_j - B_{ij} \sin \theta_j) \Delta \theta_j \\ \quad - U_j (G_{ij} \sin \theta_j + B_{ij} \cos \theta_j) \Delta U_j / U_j \end{cases} \quad (3)$$

进一步地将式(3)简化后可写成:

$$\begin{cases} \text{Re}(\Delta \dot{I}_{ij}) = a \cdot \Delta \theta_i + b \cdot \frac{\Delta U_i}{U_i} + c \cdot \Delta \theta_j + d \cdot \frac{\Delta U_j}{U_j} \\ \text{Im}(\Delta \dot{I}_{ij}) = e \cdot \Delta \theta_i + f \cdot \frac{\Delta U_i}{U_i} + g \cdot \Delta \theta_j + h \cdot \frac{\Delta U_j}{U_j} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中的各个系数 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 、 g 、 h 可由式(3)求得。

若一电网中共有 n 个节点 b 条支路。其中,有 J 个 PQ 节点,编号为 $1, 2, \dots, j, N-J-1$ 个 PV 节点,编号为 $J+1, J+2, \dots, N-1$; 1 个平衡节点,编号为 N ; b 条支路的编号分别为 $1, 2, \dots, b$ 。则可将上式用矩阵形式表达:

$$\begin{pmatrix} \text{Re}(\Delta \dot{I}_{ij}) \\ \text{Im}(\Delta \dot{I}_{ij}) \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{li} & b_{li} & \cdots & c_{lj} & d_{lj} \\ e_{li} & f_{li} & \cdots & g_{lj} & h_{lj} \\ \vdots & & & & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \theta_1 \\ \frac{\Delta U_1}{U_1} \\ \vdots \\ \Delta \theta_i \\ \frac{\Delta U_i}{U_i} \\ \Delta \theta_j \\ \frac{\Delta U_j}{U_j} \\ \Delta \theta_{j+1} \\ \Delta \theta_{j+2} \\ \vdots \\ \Delta \theta_{n-1} \end{pmatrix} \quad (5)$$

将上式化简后可得:

$$\Delta I = \mathbf{S} \mathbf{i} \cdot \Delta X \quad (6)$$

式中: ΔI 为支路电流的增量; $\mathbf{S} \mathbf{i}$ 为灵敏度矩阵,其元素可由式(3)–(4)求得; ΔX 为系统状态变量的增量。电力系统功率修正方程的矩阵表达为:

$$\Delta W = \mathbf{J} \mathbf{a} \cdot \Delta X \quad (7)$$

式中: ΔW 为节点注入功率的增量; $\mathbf{J} \mathbf{a}$ 为雅可比矩阵。

根据式(7)又可将 ΔX 和 ΔW 的表示为:

$$\Delta X = \mathbf{J} \mathbf{a}^{-1} \cdot \Delta W \quad (8)$$

由式(6)和式(8)可以得到电网中支路电流增量 ΔI 和节点注入功率增量 ΔW 之间的关系为:

$$\Delta I = \mathbf{S} \mathbf{i} \cdot \mathbf{J} \mathbf{a}^{-1} \cdot \Delta W \quad (9)$$

半不变量又称累积量,是表征随机变量统计特性的一种数字特征^[9]。若 X 与 Y 是两个独立的随机变量,对于任意常数 a 和 b ,随机变量 $Z = aX + bY$ 的第 t 阶半不变量可表示为:

$$K_t(Z) = a_k^t K_t(X) + b_k^t K_t(Y), \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

式中: $K_t(Z)$ 、 $K_t(X)$ 、 $K_t(Y)$ 分别为随机变量 Z 、 X 、 Y 的第 t 阶半不变量; a_k^t 、 b_k^t 分别为系数 a_k 、 b_k 的 t 次幂。当输入随机变量相互独立,并且输出随机变量与输入随机变量呈线性关系时,可基于输入随机变量的各阶半不变量来求得输出随机变量的各阶半不变量,而输入随机变量的各阶半不变量则又可由其各阶矩求得。

随机变量 X 的 t 阶原点矩为:

$$\alpha_t = \int_{-\infty}^{+\infty} x^t f(x) dx, \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

式中: α_t 为随机变量 X 的第 t 阶原点矩; $f(x)$ 为随机变量 X 的概率密度函数,当 $t=1$ 时,即为 X 的数学期望。

随机变量 X 的第 t 阶中心矩为:

$$\beta_t = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \alpha_1)^t f(x) dx, \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

式中: β_t 为随机变量 X 的第 t 阶中心矩。

随机变量的前 6 阶半不变量可由其各阶矩表示如下^[10]:

$$\begin{cases} K_1 = \alpha_1 \\ K_2 = \beta_2 \\ K_3 = \beta_3 \\ K_4 = \beta_4 - 3\beta_2^2 \\ K_5 = \beta_5 - 10\beta_2\beta_3 \\ K_6 = \beta_6 - 15\beta_2\beta_4 - 10\beta_3^2 + 30\beta_2^3 \end{cases} \quad (13)$$

Gram-Charlier 级数根据 Hermite 多项式的正交性展开,是一种近似表示概率分布的方法,常用于电力系统随机模拟。基于 Gram-Charlier 级数展开随机变量的概率密度函数 $f(x)$ 可表示为^[11]:

$$f(x) = \varphi(\bar{x}) \left[1 + \sum_{i=3}^n \frac{g_i}{t!} H_i(\bar{x}) \right] \quad (14)$$

式中: $\bar{x}$ 为规格化后的随机变量; $\varphi(\bar{x})$ 为标准正态分布的概率密度函数; g_t 为 t 阶规格化后的半不变量; $H_t(\bar{x})$ 为 t 阶 Hermite 多项式。

半不变量的规格化方式由下式给出:

$$g_t = \frac{K_t}{\sigma^t} = \frac{K_t}{K_2^{t/2}} \quad (15)$$

式中: g_t 为 t 阶规格化后的半不变量; K_t 为第 t 阶半不变量; σ 为随机变量的标准差。

若随机变量 X 的期望和标准差分别为 μ 和 σ ,则 X 的标准化形式为:

$$\bar{X} = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (16)$$

前 6 阶 Hermite 多项式为:

$$\begin{cases} H_1(x) = x \\ H_2(x) = x^2 - 1 \\ H_3(x) = x^3 - 3x \\ H_4(x) = x^4 - 6x^2 + 3 \\ H_5(x) = x^5 - 10x^3 + 15x \\ H_6(x) = x^6 - 15x^4 + 45x^2 - 15 \end{cases} \quad (17)$$

根据式(9)可知, ΔI 与 ΔW 呈线性关系, 基于半不变量的线性特性, 可以得到 ΔI 的第 k 阶半不变量为:

$$\Delta I^{(t)} = \mathbf{S} \mathbf{i}^{(t)} \cdot (\mathbf{J} \mathbf{a}^{-1})^{(t)} \cdot \Delta W^{(t)}, \quad t = 1, \dots, n \quad (18)$$

式中: $\Delta I^{(t)}$ 、 $\Delta W^{(t)}$ 分别为 ΔI 与 ΔW 的第 t 阶半不变量; $\mathbf{S} \mathbf{i}^{(t)}$ 、 $(\mathbf{J} \mathbf{a}^{-1})^{(t)}$ 分别为 $\mathbf{S} \mathbf{i}$ 矩阵与 $\mathbf{J} \mathbf{a}$ 逆矩阵元素的 t 次幂。根据式(14)以及式(18)即可得到 ΔI 的概率密度函数。

2 电网安全裕度指标

假设在某时刻, 电网中的某一支路发生初始故障被切除且电网的潮流重新分布后, 对于电网中的剩余支路 L_{ij} 是否会发生连锁跳闸, 可通过式(19)判断^[12]:

$$I_{ij \cdot \text{dist}} = |\dot{I}_{ij \cdot \text{set}}| - |\dot{I}_{ij}| \quad (19)$$

式中: $\dot{I}_{ij}$ 是电网潮流重新分布后支路 L_{ij} 的电流; $\dot{I}_{ij \cdot \text{set}}$ 是支路 L_{ij} 上后备保护的电流整定值; $I_{ij \cdot \text{dist}}$ 是衡量 $\dot{I}_{ij \cdot \text{set}}$ 和 $\dot{I}_{ij}$ 之间电气距离的量。当 $I_{ij \cdot \text{dist}} > 0$ 时, 支路 L_{ij} 不会发生连锁跳闸; 而当 $I_{ij \cdot \text{dist}} \leq 0$ 时, 支路 L_{ij} 由后备保护予以切除, 也即 L_{ij} 将发生连锁跳闸; 其中, $I_{ij \cdot \text{dist}} = 0$ 是一种特殊情形, 在这种情形下, 支路 L_{ij} 刚好处于发生连锁跳闸的边界状态。

将支路电流以复数 $x + jy$ 的形式表示, 则支路 L_{ij} 电流的幅值可表示为 $|\dot{I}_{ij}| = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。假定支路 L_{ij} 的电流保护动作值 $|\dot{I}_{ij \cdot \text{set}}| = 6.5$, 可用一圆域来表示电流保护的動作区域。如图 1 所示, 横坐标代表电流实部, 纵坐标代表电流虚部。

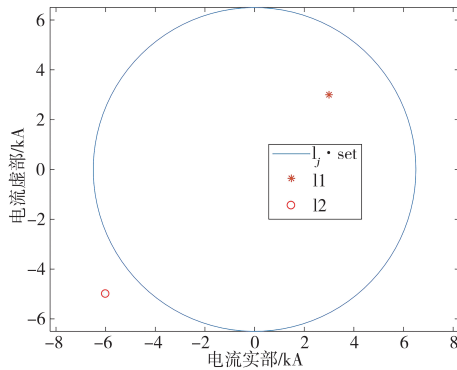


图 1 支路电流保护动作值范围

图 1 中, 当支路 L_{ij} 的电流 $\dot{I}_{ij}$ 对应的坐标点落在圆域内部时, 如图 1 中的点 I1, 则 $\dot{I}_{ij}$ 的值一定不

会超出整定值 $\dot{I}_{ij \cdot \text{set}}$ 的值, 根据式(19)可判断支路不会发生跳闸; 当支路 L_{ij} 的电流 $\dot{I}_{ij}$ 对应的坐标点落在圆域外部时, 如图 1 中的点 I2, 则 $\dot{I}_{ij}$ 的值一定超出整定值 $\dot{I}_{ij \cdot \text{set}}$ 的值, 支路一定会发生跳闸。

将支路电流的实部与虚部分别视为随机变量 X 与 Y , 根据式(5)可知, 由于支路电流实部与虚部的取值只与节点注入功率以及矩阵的元素有关, 可以认为 X 与 Y 是相互独立的随机变量, 因此, 可由 X 与 Y 各自的密度函数求得 X 与 Y 的联合密度函数^[13]:

$$f_{XY} = f_X \cdot f_Y \quad (20)$$

式中: f_{XY} 为 X 与 Y 的联合密度函数; f_X 、 f_Y 分别为随机变量 X 、 Y 的概率密度函数。

图 2 为支路 L_{ij} 电流的联合概率密度函数曲线, x 轴为支路电流实部, y 轴为支路电流虚部, z 轴为概率密度值。

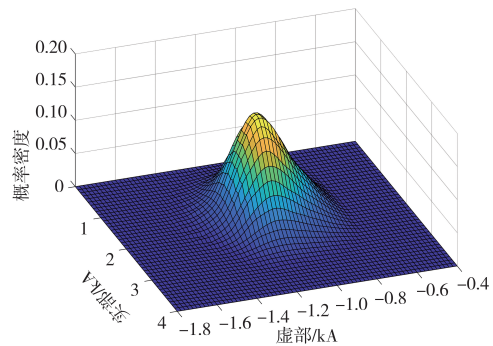


图 2 支路电流联合概率密度

将图 2 中概率密度值大于 0 的部分在 xoy 面作投影, 如图 3 所示, 实线为投影区域边界, 在投影边界以及投影区域内部取 N 个离散点, 每个离散点的坐标都表示系统在该状态下支路电流可能的取值。

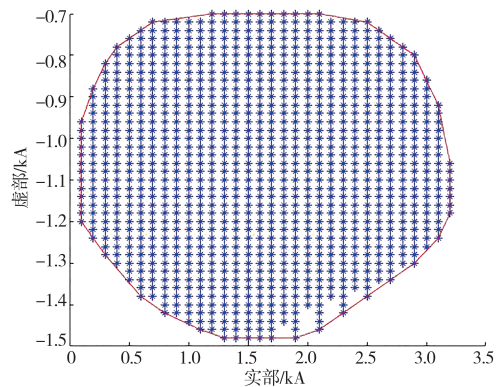


图 3 支路电流联合概率密度投影区域

若投影区域内部以及边界上所有的离散点坐标值都满足式(21),则支路 L_{ij} 一定不会发生跳闸。

$$x_\tau^2 + y_\tau^2 < |\dot{I}_{ij, \text{set}}|, \quad \tau = 1, 2, \dots, N \quad (21)$$

式中: x_τ, y_τ 为离散点坐标; $|\dot{I}_{ij, \text{set}}|$ 为支路 L_{ij} 电流保护整定值; N 为离散点的数量。定义支路安全裕度为:

$$D = \begin{cases} \sum_{\tau=1}^N |\dot{I}_{\text{set}}| - \sqrt{x_\tau^2 + y_\tau^2}, & x_\tau^2 + y_\tau^2 < |\dot{I}_{\text{set}}| \\ d, & x_\tau^2 + y_\tau^2 \geq |\dot{I}_{\text{set}}| \end{cases} \quad (22)$$

式中: D 为支路安全裕度; $|\dot{I}_{\text{set}}|$ 为电流保护整定值; N 为离散点数量。

若存在一离散点坐标不满足式(21),则该支路可能会出现跳闸的情况,该情形下,支路就没有安全性可言,支路安全裕度值为负值 d 。若所有离散点都满足式(21),则支路安全裕度 D 表示所有电流保护整定值与离散点坐标值之差的和, D 的值越大,说明支路电流离保护动作边界值越远,支路也就越安全。

若电网中共有 b 条支路,其中某一支路因故障断开,可求得剩余线路的支路安全裕度 D 。本文将系统中最小的支路安全裕度 D 作为衡量电网是否安全的指标并定义电网安全裕度为:

$$Se = \min(D_l), \quad l = 1, 2, \dots, b-1 \quad (23)$$

式中: Se 为电网安全裕度; D_l 为线路 l 的支路安全裕度。

3 考虑负荷随机性以及电网安全性的连锁故障预防控制模型

3.1 负荷与发电机出力概率模型

目前,多数有关概率潮流的文献均将负荷预测结果看作一个随机变量^[14],并采用正态分布近似反映负荷的不确定性^[15],因此,本文采用正态分布反应负荷的随机部分:

$$\begin{cases} f(P_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_{P_L}} \exp\left[-\frac{(P_L - \mu_{P_L})^2}{2\delta_{P_L}^2}\right] \\ f(Q_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_{Q_L}} \exp\left[-\frac{(Q_L - \mu_{Q_L})^2}{2\delta_{Q_L}^2}\right] \end{cases} \quad (24)$$

式中: P_L, Q_L 分别为负荷的有功功率和无功功率; $\mu_{P_L}, \mu_{Q_L}, \delta_{P_L}, \delta_{Q_L}$ 分别为负荷有功功率、无功功率的均值和标准差。

常用的发电机组模型是两状态发电机组模型^[10]。即发电机组只有正常运行与故障停运两种状态。

为了简化分析,本文假设发电机组始终处于正常运行状态,并且发电机组出力为常数。

$$\begin{cases} P_{Gi} = c_{Gi1}, i = 1, \dots, N_G \\ Q_{Gi} = c_{Gi2}, i = 1, \dots, N_G \end{cases} \quad (25)$$

式中: P_{Gi}, Q_{Gi} 为节点 i 上发电机有功和无功出力; c_{Gi1}, c_{Gi2} 为常数; N_G 为系统中发电机的数量。

3.2 约束条件

在初始故障发生前、后,系统应满足如下的潮流约束关系:

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (26)$$

式中: P_i 为节点 i 上的节点注入有功功率; Q_i 为节点 i 上的节点注入无功功率; n 为系统中节点的数量。

上式写成缩略形式可表示为:

$$\begin{cases} h_0(x) = 0 \\ h_1(x) = 0 \end{cases} \quad (27)$$

式中: $h_0(x)$ 为初始故障发生前的等式约束; $h_1(x)$ 为初始故障发生后的等式约束; x 为系统的状态变量。

在初始故障发生前、后,系统还应满足如下不等式关系:

$$\begin{cases} P_{Gi \cdot \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \cdot \max}, i = 1, \dots, N_G \\ Q_{Gi \cdot \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \cdot \max}, i = 1, \dots, N_G \\ P_l \leq P_{l \cdot \max}, l = 1, 2, \dots, b \\ U_{i \cdot \min} \leq U_i \leq U_{i \cdot \max}, i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (28)$$

式中: P_{Gi}, Q_{Gi} 分别为节点 i 上发电机有功和无功出力; $P_{Gi \cdot \max}, P_{Gi \cdot \min}$ 分别为节点 i 上的发电机有功出力上、下限; $Q_{Gi \cdot \max}, Q_{Gi \cdot \min}$ 分别为节点 i 上的发电机无功出力上、下限; N_G 为发电机的数量; P_l 为线路 l 的传输有功功率; $P_{l \cdot \max}$ 为线路 l 的传输功率上限; b 为系统中线路的数量; U_i 为节点 i 电压, $U_{i \cdot \max}, U_{i \cdot \min}$ 分别为节点 i 电压的上、下

限; N 为系统中节点的数量。上式写成缩略形式可表示为:

$$\begin{cases} g_0(x) \leq 0 \\ g_1(x) \leq 0 \end{cases} \quad (29)$$

式中: $g_0(x)$ 为初始故障发生前的不等式约束; $g_1(x)$ 为初始故障发生后的不等式约束。

3.3 模型与算法

本文将电网安全裕度 Se 作为目标函数, 目标函数 f 为:

$$f = \max(Se) \quad (30)$$

加上等式与不等式约束, 下式构建了完整的连锁故障预防控制模型:

$$\begin{cases} f = \max(Se) \\ \text{s.t.} \\ h_0(x) = 0 \\ h_1(x) = 0 \\ g_0(x) \leq 0 \\ g_1(x) \leq 0 \\ D_l > 0, \quad l = 1, 2, \dots, b-1 \\ I_{l, dist} > 0, \quad l = 1, 2, \dots, b-1 \end{cases} \quad (31)$$

本文采用粒子群算法对该预防控制模型进行求解, 该算法易于编程实现, 计算简单快速。基本粒子群算法按照下式进行迭代计算:

$$\begin{cases} v_{\lambda}^{k+1} = \omega v_{\lambda}^k + c_1 r_1 (p_{\text{best}} - \mathbf{w}_{\lambda}^k) + c_2 r_2 (g_{\text{best}} - \mathbf{w}_{\lambda}^k) \\ \mathbf{w}_{\lambda}^{k+1} = \mathbf{w}_{\lambda}^k + v_{\lambda}^{k+1} \end{cases} \quad (32)$$

式中: $\mathbf{w}_{\lambda}^k$ 为粒子 λ 在第 k 次的迭代位置, 由发电机有功出力组成的一个列向量; v_{λ}^k 为粒子在第 k 次的迭代速度, 一般要求满足 $v_{\min} \leq v_{\lambda}^k \leq v_{\max}$; $v_{\min}$ 与 $v_{\max}$ 分别为粒子速度的最小值与最大值, 本文中的粒子速度的限制值由初始状态下发电机有功出力求得; $p_{\text{best} \cdot \lambda}$ 为粒子 λ 自身所经历的最优解; g_{best} 为整个粒子群所经历的最优解; ω 为惯性系数, 一般从 0.9 到 0.1 按线性方式递减; c_1 、 c_2 为加速常数, 其值一般取为 2; r_1 、 r_2 为 $[0, 1]$ 区间上分布均匀的随机数。

为了便于求解预防控制模型, 给出惩罚函数:

$$f_1 = \frac{1}{f} + \sum_k \frac{1}{\alpha_k} [\min(0, -a(x))]^2 + \sum_k \frac{1}{\beta_k} [b(x)]^2 \quad (33)$$

式中: f_1 为惩罚函数; $a(x)$ 为初始故障前、后系统

的不等式约束; $b(x)$ 为初始故障前、后系统的等式约束; α_k 、 β_k 均为惩罚因子, 为一个很小的正数。

粒子群算法的流程如图 4 所示。

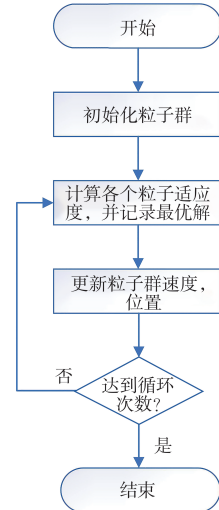


图 4 粒子群算法流程

4 算例分析

为了验证该预防控制模型的有效性, 本文采用 IEEE39 节点系统进行仿真, 如图 5 所示。该系统共有 39 个节点, 46 条支路, 其中 1~29 节点为 PQ 节点; 30, 32~39 节点为 PV 节点; 31 节点为平衡节点。对于 PQ 节点, 负荷有功功率、无功功率波动部分的均值分别取系统初始状态下负荷有功功率、无功功率的 10%。负荷有功功率、无功功率波动部分的标准差分别取系统初始状态下负荷有功功率、无功功率的 1%。对于 PV 节点, 发电机无功出力取系统初始状态下的值。采用标幺值计算时, 系统基准容量为 100 MVA, 电压基准值为 100 kV。

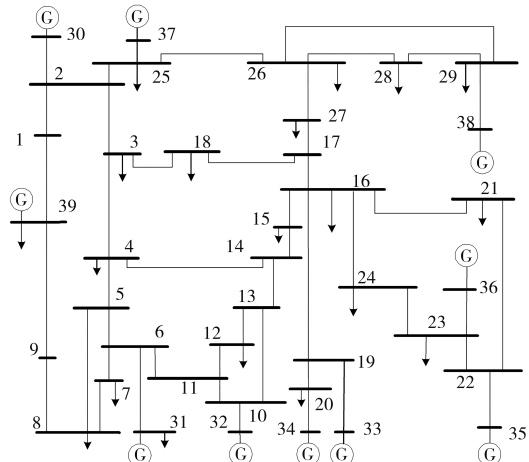


图 5 IEEE39 节点系统

设初始故障支路为 L_{1-2} ,通过粒子群算法对发电机出力进行优化。表 1 给出了发电机有功出力初始值与优化后的值。

表 1 优化前、后的发电机有功出力 单位:MW

节点号	初始值	优化后
30	250	397.78
32	650	871.59
33	632	717.67
34	508	568.75
35	650	390.81
36	560	640.75
37	540	772.46
38	830	1 158.64
39	1 000	910.64

图 6 给出了初始故障支路为 L_{1-2} 时,粒子群算法迭代次数与电网安全裕度之间的关系曲线。在进行了近 30 次迭代后,电网安全裕度趋于平稳,并且安全裕度由优化前的 114.57 提高至优化后的 198.94。

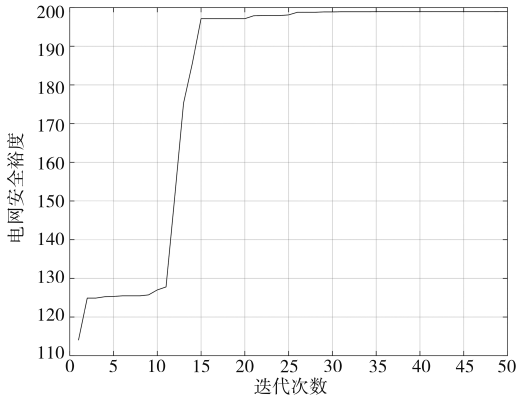


图 6 迭代次数与电网安全裕度

为了验证本文所提出的电网安全裕度的合理性,需要验证发电机出力优化后系统的安全性相较于优化出力前更强。对负荷节点有功、无功功率进行随机抽样,并计算系统中最小的 I_{dist} 。图 7 给出了节点 15 有功功率的概率分布函数。负荷有功、无功功率波动的均值取 IEEE39 节点基态数据的 10%,负荷有功、无功功率波动的标准差取基态数据的 1%。

假定初始故障支路为 L_{1-2} ,验证步骤如下:

1)对负荷有功功率和无功功率随机抽样一次,得到负荷功率具体值,发电机有功出力采用表 1 中的数据。

2)分别计算发电机出力优化前与优化后系统最小的 I_{dist} 值。

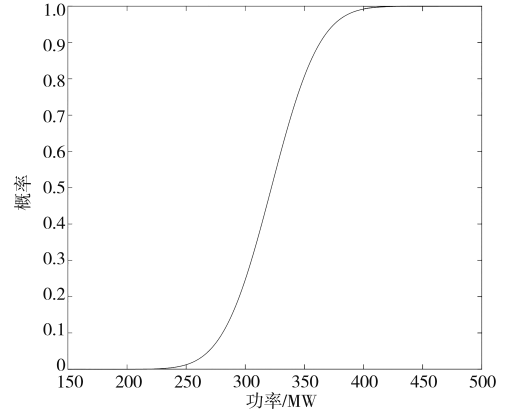


图 7 节点 15 有功功率的累计分布曲线

3)重复步骤 1)与 2),得到优化前与优化后系统最小 I_{dist} 的概率分布。

图 8 与图 9 给出了初始故障支路为 L_{1-2} 支路,负荷随机抽样 1 000 次,发电机出力优化前、后系统最小 I_{dist} 的概率分布。

可以明显看出,优化前电网中最小的 I_{dist} 均小于优化后最小的 I_{dist} ,该结果表明在发电机出力优化后,电网对于负荷波动的抗干扰性更强,也验证了本文所提出的电网安全裕度指标的合理性。

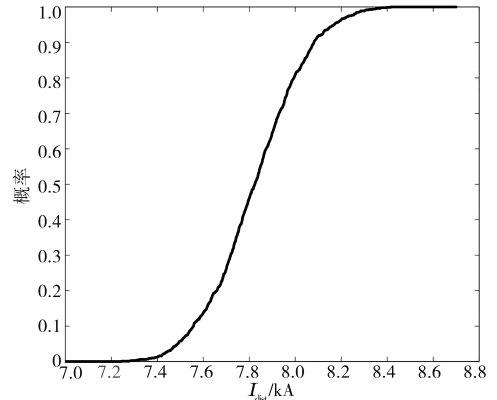


图 8 优化出力前系统中最小 I_{dist} 的累计分布曲线

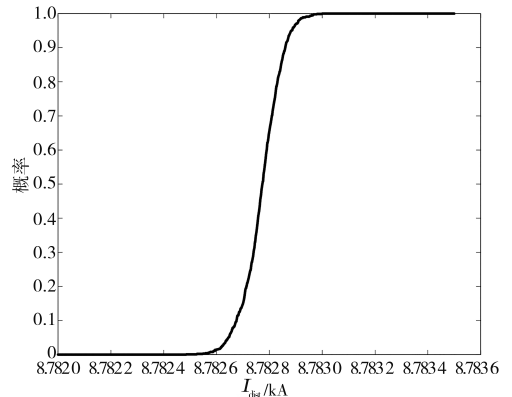


图 9 优化出力后系统中最小 I_{dist} 的累计分布曲线

5 结论

针对负荷波动导致潮流不确定引发的电力系统连锁故障现象,定义了评价电网安全性的电网安全裕度指标,给出了考虑安全性的电网连锁故障预防控制模型,结合粒子群算法以及 IEEE39 节点系统的仿真,得到以下结论。

1)提出的电网安全裕度指标能合理的量化电网的安全性,可以科学的评价电网对于负荷波动的抗干扰性。

2)给出了考虑负荷随机性的电网连锁故障预防控制模型,并验证了该模型的有效性。

3)提出的考虑负荷随机性的电网连锁故障预防控制模型为今后研究电网连锁故障的预防提供了新的方法和思路。

参考文献:

- [1] 刘 宇,高山,杨胜春,等.电力系统概率潮流算法综述[J].电力系统自动化,2014,38(23):127-135.
- [2] 钱宇骋,陈 忠,杨 为,等.电力系统连锁故障研究综述[J].山东电力技术,2018,45(12):1-9.
- [3] 邓慧琼,李 争,孙丽华,等.电网连锁故障的激发因素研究[J].河北科技大学学报,2010,31(3):222-226.
- [4] 邓慧琼,陈世举,王晓铭,等.兼顾电压稳定的电网安全裕度指标研究[J].河北电力技术,2023,42(4):29-34.

(上接第 8 页)

- Omni-Scale CNNs: a simple and effective kernel size configuration for time series classification[C]//ICLR.10th International Conference on Learning Representations (ICLR 2022), s.l.: International Conference on Learning Representations, 2022:1-17.
- [18] HU J, SHEN L, ALBANIE S. Squeeze-and-excitation networks[J]. IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence. 2020, 42(8): 2011-2023.
- [19] RICHSTEIN J. Verifying the goldbach conjecture up to 4 center dot 10¹⁴ [J]. Mathematics of Computation, 2001, 70(236): 1745-1749.
- [20] 张 雪,田 岚,曾 鸣,等.基于梯度幅值方向调整的心电信号多任务分类算法[J].计算机科学,2024,51(12):174-180.
- [21] 吴瑞琪,周 毅.知识融入多源多任务学习的眼底图像分类方法[J/OL].计算机工程与应用,1-12[2024-12-11].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20240522.1258.004.html.
- [22] 陈子璇,席燕辉,沈 银.基于卡尔曼滤波和深度置信网络的复合电能质量扰动分类[J].电力系统保护与控制,2022,

- [5] 邓慧琼,罗 杰,王晓铭,等.考虑安全性和经济性的连锁故障预防控制策略[J].电力建设,2022,43(5):100-108.
- [6] 邓慧琼,钟运恒,黄 靖.计及脆弱支路筛选的含风电电网连锁故障预防策略[J].太阳能学报,2024,45(6):544-555.
- [7] ZHANG P, LEE T S. Probabilistic Load Flow Computation Using the Method of Combined Cumulants and Gram-Charlier Expansion[J]. IEEE Transactions on Power Systems: A Publication of the Power Engineering Society, 2004, 19(1): 676-682.
- [8] 曹宏宇,梁言贺,刘惠颖,等.考虑风-光-储不确定性的新型电力系统概率潮流计算[J].电测与仪表,2024,61(06):87-93.
- [9] 甘国晓.电力系统连锁故障分析与紧急控制研究[D].杭州:浙江大学,2019.
- [10] 戴小青.电力系统概率潮流新算法及其应用[D].北京:华北电力大学(北京),2006.
- [11] 王成山,郑海峰,谢莹华,等.计及分布式发电的配电系统随机潮流计算[J].电力系统自动化,2005,(24):39-44.
- [12] 邓慧琼.考虑连锁跳闸的电网安全裕度研究[J].福建工程学院学报,2016,14(03):255-261.
- [13] 朱德刚,李文辉,花永健.两种独立性定义的等价性[J].高等数学研究,2020,23(1):120-121.
- [14] 安 琪.可再生能源大量接入背景下菏泽电网随机潮流研究[D].北京:华北电力大学,2018.
- [15] 韩宏志,杨 洋,郜 宁,等.基于正态分布的典型负荷日拟合方法[J].分布式能源,2020,5(4):69-73.

本文责任编辑:秦明娟

50(7):81-90.

- [23] WANG S X, CHEN H W. A novel deep learning method for the classification of power quality disturbances using deep convolutional neural network[J]. Applied Energy, 2019, 235(2): 1126-1140.
- [24] RADHAKRISHNAN P, RAMAIYAN K, VINAYAGAM A, et al. A stacking ensemble classification model for detection and classification of power quality disturbances in PV integrated power network[J]. Measurement, 2021(175): 1-16.
- [25] TODESCHINI G, KHETA K, GIANNETTI C. An image-based deep transfer learning approach to classify power quality disturbances[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 213(12): 1-9.
- [26] DONG Y L, CAO H Q, XU G P, et al. A Novel Method for multiple power quality disturbances classification using a multi-task convolution neural network[C]//Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2019 4th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE). Chengdu, China, 2019: 274-278.

本文责任编辑:王洪娟