

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.02.026

基于脆弱支路筛选的电网连锁故障多目标预防策略

邓慧琼, 曾凡淦, 张晓飞, 郑玉燧, 李培强, 李建兴

(福建工程学院电子电气与物理学院, 福建 福州 350118)

摘要:针对电力系统中由线路故障引发的连锁故障现象,文中提出了一种基于脆弱支路筛选的电网连锁故障多目标预防策略。首先,提出一种改进的支路安全指标和系统安全指标,并引入泰尔熵指数对电力系统中各支路进行脆弱性评估,以此量化某支路故障退出运行后对电网运行安全性的影响;然后,根据支路脆弱性排序筛选出发生初始故障退出运行后对电网运行安全性影响较严重的几条支路,建立预想事故集;最后,建立兼顾系统安全指标和电网电压稳定,且能应对多种初始故障场景的电力系统连锁故障预防控制模型,并使用非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)求解该模型。基于IEEE 39节点系统进行仿真分析,结果表明所提预防策略能获得更安全合理的发电机组出力方案,且证明了支路负载率差异对脆弱支路辨识的重要性。

关键词:连锁故障;泰尔熵;脆弱支路;电压稳定;预防控制;非支配排序遗传算法(NSGA-II)

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)02-0223-09

0 引言

现代电力系统日益扩大化和复杂化,在满足国民日渐增长的用电需求和高速发展的经济负荷需求的同时,其自身的运行安全问题也日益突出^[1-2]。连锁故障已成为现代电力系统安全稳定运行的一大威胁,其往往是由电网中某些脆弱线路故障后退出运行,影响电网剩余支路导致的^[3]。因此,如何有效识别出电网中的脆弱支路并采取有效的预防控制策略,对于保障电力系统安全稳定运行具有重要意义。

电力系统脆弱支路识别分为结构性脆弱识别和运行状态性脆弱识别。其中,结构性脆弱识别主要是基于拓扑的复杂网络分析来进行脆弱支路的辨识,例如电气介数^[4]、线路效能^[5]、有功传输距离^[6]、风险评估^[7]等。运行状态性脆弱识别则是研究电网中各个运行状态变量偏离正常状态的程度,是电网运行时各电气参数与网络结构共同作用的结果^[8]。文献[9-11]基于潮流分布特性,运用熵理论进行脆弱支路的辨识;文献[12]考虑支路电压等级不同的特性,阐述了电压等级差异对支路脆弱性的影响。

目前针对连锁故障的控制,根据控制时机大致可分为事故前的预防控制和事故中的阻断控制。文献[13]通过计算剔除作用微小的控制变量,减少计算量以提升计算的效率;文献[14]将受端电网根

据电压等级进行分层,并设置不同的目标函数建立优化切负荷方案,在有效消除线路过负荷的同时减少计算时间;文献[15]综合考虑运行风险和经济效益,建立了电力系统预防控制模型。

上述结构性脆弱识别方法可有效评估电网中元件的结构重要度,但忽略了电网运行的特征,容易导致脆弱支路漏选;状态性脆弱识别方法则未考虑各支路负载率不同的属性,且都以支路潮流作为运行变量,具有一定的局限性。同时,上述预防控制策略只能应对选定的一种初始故障场景,且仅考虑了系统安全裕度或是综合经济性和运行风险进行建模,未考虑预防控制中发电机组出力调整对电网电压稳定水平的影响。而在连锁故障预防控制中,首先应保证的是系统运行稳定性,经济性往往是次要的。

基于上述分析,文中首先基于继电保护动作为,结合其动作方程和电网潮流的调整来描述连锁故障过程,并提出一种支路安全指标以及系统安全指标,进而引入泰尔熵指数构建考虑负载率差异的电网脆弱支路识别模型。其次,通过该模型筛选出脆弱性较高的几条支路建立预想事故集,进行重点预防;最后,以提高系统安全指标和电压稳定裕度为目标,对发电机组出力方案进行优化调整,使系统能应对预想事故集中的多种初始故障场景,在提高系统应对连锁故障的安全水平时兼顾电压稳定水平。通过IEEE 39节点系统算例仿真验证了文中脆弱支路识别模型的科学性,同时其结果也表明所提预防模型能有效降低系统发生连锁故障的可能性。

收稿日期:2022-09-19;修回日期:2022-12-15

基金项目:福建省自然科学基金资助项目(2022J01948);福建省科技计划资助项目(KY310254)

1 安全指标的建立

许多连锁故障事故都是由初始故障切除,电网潮流重新分配后某些线路过负荷,其距离保护Ⅲ段不合理动作造成的,而距离保护在大规模输电电网装配的后备保护配置中占比超过70%^[16],故文中以距离保护Ⅲ段为例进行分析。

1.1 支路安全指标

电网连锁故障是指在初始故障切除、电网潮流重新调整后,系统剩余支路因测量阻抗进入动作区而发生跳闸,导致新的停运故障出现。所以文中将通过计算支路测量阻抗与保护动作边界的距离来衡量该支路对系统安全性的影响。

文中选用国内应用最为广泛的准四边形阻抗继电器作为距离保护Ⅲ段的保护装置,其动作特性如图1所示。其中, $X_1 = (X_{set} \cot \alpha_4 - R_{set}) \tan \alpha_3 / (1 + \cot \alpha_4 \tan \alpha_3)$; $\alpha_1 - \alpha_4$ 为各线段的整定偏移角; R_{set} 、 X_{set} 分别为整定电阻值和整定电抗值。

通过改进文献[16]中的测量阻抗与阻抗继电器动作边界距离的表达式,提出一种支路安全指标。将测量阻抗 Z_m 中的测量电阻 R_m 、测量电抗 X_m 与保护动作边界的距离分开计算,记为 D_R 和 D_X ,其表达式分别如式(1)、式(2)所示。

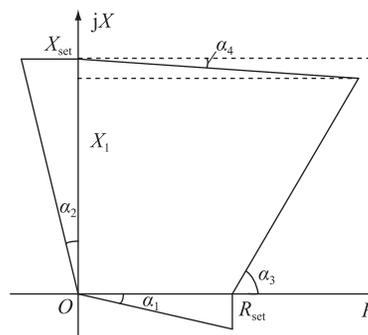


图1 准四边形阻抗继电器动作特性

Fig.1 Action characteristics of quasi-quadrilateral impedance relay

在电网某时刻支路 k 因发生初始故障被切除后,定义系统剩余支路 l 的支路安全指标为 D_{zl} ,如式(3)所示。其中, D_{Rl} 为测量电阻 R_m 与横坐标方向动作边界的距离; D_{Xl} 为测量电抗 X_m 与纵坐标方向动作边界的距离。

由式(1)、式(2)可知,当 Z_m 处于保护动作边界时, D_{zl} 为0;当 Z_m 处于保护动作边界内时, D_{zl} 为负值;当 Z_m 处于保护动作边界外时, D_{zl} 为正值。从连锁故障的角度来看, D_{zl} 的取值实质上反映了支路 k 故障断开后对支路 l 造成的影响严重程度, D_{zl} 越小,说明支路 l 的测量阻抗距离保护动作边界越近,其受到的扰动越严重。

$$D_R = \begin{cases} R_m - X_m \cot \alpha_3 - R_{set} & R_m \geq (R_{set} + X_m \cot \alpha_3 - X_m \tan \alpha_2)/2; 0 < X_m \leq X_1 \\ -(R_m + X_m \tan \alpha_2) & R_m < (R_{set} + X_m \cot \alpha_3 - X_m \tan \alpha_2)/2; 0 < X_m \leq X_1 \\ R_m - (X_{set} - X_m) \cot \alpha_4 & R_m \geq [(X_{set} - X_m) \cot \alpha_4 - X_m \tan \alpha_2]/2; X_1 < X_m \leq X_{set} \\ -(R_m + X_m \tan \alpha_2) & R_m < [(X_{set} - X_m) \cot \alpha_4 - X_m \tan \alpha_2]/2; X_1 < X_m \leq X_{set} \\ R_m - R_{set} & R_m \geq R_{set}/2; -R_{set} \tan \alpha_1 \leq -R_m \tan \alpha_1 \leq X_m \leq 0 \\ -R_m & 0 \leq R_m < R_{set}/2; -R_{set} \tan \alpha_1 \leq -R_m \tan \alpha_1 \leq X_m \leq 0 \\ R_m - R_{set} & R_m \geq R_{set} + X_1 \cot \alpha_3; X_m < -R_{set} \tan \alpha_1 \\ -(R_m + R_{set} \tan \alpha_2) & R_m < -X_{set} \tan \alpha_2; X_m > X_{set} \\ R_m - (R_{set} + X_1 \cot \alpha_3) & R_m > R_{set} + X_1 \cot \alpha_3; X_m > X_1 \end{cases} \quad (1)$$

$$D_X = \begin{cases} X_m + R_m \tan \alpha_4 - X_{set} & X_m \geq (X_{set} - R_m \tan \alpha_4 - R_m \tan \alpha_1)/2; 0 < R_m \leq R_{set} \\ -(X_m + R_m \tan \alpha_1) & X_m < (X_{set} - R_m \tan \alpha_4 - R_m \tan \alpha_1)/2; 0 < R_m \leq R_{set} \\ X_m + R_m \tan \alpha_4 - X_{set} & X_m \geq [X_{set} - R_m \tan \alpha_4 + (R_m - R_{set}) \tan \alpha_3]/2; \\ & R_{set} < R_m \leq R_{set} + X_1 \cot \alpha_3 \\ -[X_m - (R_m - R_{set}) \tan \alpha_3] & X_m < [X_{set} - R_m \tan \alpha_4 + (R_m - R_{set}) \tan \alpha_3]/2; \\ & R_{set} < R_m \leq R_{set} + X_1 \cot \alpha_3 \\ X_m - X_{set} & X_m \geq X_{set}/2; -X_{set} \tan \alpha_2 - X_m \tan \alpha_2 \leq R_m \leq 0 \\ -X_m & X_m < X_{set}/2; -X_{set} \tan \alpha_2 - X_m \tan \alpha_2 \leq R_m \leq 0 \\ -(X_m + R_{set} \tan \alpha_1) & X_m < -R_{set} \tan \alpha_1; R_m > R_{set} + X_1 \cot \alpha_3 \\ X_m - X_{set} & X_m > X_{set}; R_m < -X_{set} \tan \alpha_2 \\ X_m - X_1 & X_m > X_1; R_m > R_{set} + X_1 \cot \alpha_3 \end{cases} \quad (2)$$

$$D_{Zl} = D_{Rl} + D_{Xl} \quad (3)$$

1.2 系统安全指标

理论上,支路安全指标小的支路在受到扰动时更易发生故障,对系统运行安全性和稳定性的影响较大。因此,文中定义系统安全指标 M 为剩余支路的安全指标中的最小值:

$$M = \min_{i \in C} D_{Zl} \quad C = \{1, 2, \dots, L\}; l \neq k \quad (4)$$

式中: C 为系统支路集合; L 为系统支路数。

2 支路安全指标泰尔熵模型

泰尔熵指数是衡量个人之间或者区域之间收入差距的一种指数,其满足不平等指标所具有的 4 个特征:均值独立、庇古-道尔顿条件、数量规模独立以及可分解性。其中,可分解性操作简易,可以同时衡量同一属性和不同属性中的均衡性问题,为准确判断不均衡来源提供依据,运算效率高^[17]。

文中利用泰尔熵指数的可分解性,在考虑支路负载率差异的基础上,以剩余支路安全指标来衡量初始故障支路退出运行后对系统剩余支路的影响,建立了考虑支路负载率差距的支路安全指标泰尔熵模型,具体模型如下。

取 D_{Zl} 的倒数 x_{Zl} 来表征剩余支路 l 的受扰严重程度, x_{Zl} 越大,代表该支路受扰程度越严重。

$$x_{Zl} = 1/D_{Zl} \quad (5)$$

对各支路 x_{Zl} 进行数据标准化:

$$x_l = \frac{x_{Zl} - \min(x_{Z1}, \dots, x_{ZL})}{\max(x_{Z1}, \dots, x_{ZL}) - \min(x_{Z1}, \dots, x_{ZL})} \quad l \neq k \quad (6)$$

式中: x_l 为支路 l 数据标准化后的受扰程度。

系统发生故障后,电网潮流重新分配,各支路潮流都发生了变化,若支路在系统基态情况下为重载支路,则潮流变化对支路的安全指标影响比其为轻载支路更加严重,同时对系统运行稳定性的影响也更为严重。因此,文中将支路按其基态负载率分为轻载、中度负载和重载 3 种情况,分别对应 $\mu_{l0} \in (0, 0.3]$ 、 $\mu_{l0} \in (0.3, 0.6]$ 和 $\mu_{l0} \in (0.6, 1.0]$ 。支路基态负载率及各负载率组别的支路的受扰程度总和可表示为:

$$\mu_{l0} = |P_{l0}/P_{lmax}| \quad l \in C \quad (7)$$

$$\begin{cases} x_{(1)} = \sum_l x_l & \mu_{l0} \in (0, 0.3] \\ x_{(2)} = \sum_l x_l & \mu_{l0} \in (0.3, 0.6] \\ x_{(3)} = \sum_l x_l & \mu_{l0} \in (0.6, 1.0] \end{cases} \quad (8)$$

式中: μ_{l0} 为支路基态负载率; P_{l0} 、 P_{lmax} 分别为支路

l 的基态有功功率及其上限; $x_{(r)}$ 为负载率位于组别 r 的支路的受扰程度总和,其中 $r = 1, 2, 3$ 表征负载率标识,轻载为 1,中度负载为 2,重载为 3。

为便于表述,将系统基态运行状态表示为 S_0 ,将系统发生初始故障后的运行状态表示为 S_1 。由于当系统运行于状态 S_1 时,负载率较高的支路的剩余消纳能力较低,更容易发生支路过载,故文中在泰尔熵的计算公式中,采用当前运行状态负载率进行加权修正。

$$\mu_l = |P_l/P_{lmax}| \quad l \in C; l \neq k \quad (9)$$

式中: μ_l 为支路当前负载率; P_l 为支路 l 当前的有功功率。

假设当某电力系统运行于状态 S_0 时共有 q 个负载率组别、 L 条支路,其中负载率组别 r 有 L_r 条支路。定义支路 k 断开后,系统的支路安全指标泰尔熵模型为:

$$T_k = T_{kw} + T_{kb} = \sum_{r=1}^q \frac{x_{(r)}}{x_A} T_r + \sum_{r=1}^q \frac{x_{(r)}}{x_A} \ln \left(\frac{x_{(r)}/x_A}{L_r/L} \right) \quad (10)$$

负载率组别 r 内的泰尔熵指数 T_r 为:

$$T_r = \sum_{l=1}^{L_r} \frac{\mu_l x_l}{x_{(r)}} \ln \left(\frac{x_l/x_{(r)}}{1/L_r} \right) \quad l \neq k \quad (11)$$

式中: T_k 为支路安全指标泰尔熵; T_{kw} 为负载率组别内支路受扰程度不均衡度,权重为当前支路负载率以及各负载率组别的支路的受扰程度总和占系统剩余支路的受扰程度总和的比重; T_{kb} 为负载率组别之间的支路受扰程度不均衡度; x_A 为系统剩余支路的支路受扰程度总和。

由泰尔熵指数的定义可知,当支路 k 断开后,支路安全指标泰尔熵 T_k 越大,说明系统剩余支路受扰程度越不均衡,此时少数支路受扰程度较严重,导致其支路安全指标较低,系统发生连锁故障的概率较高;反之亦然。

文中提出的支路安全指标泰尔熵使用支路安全指标表征支路的受扰程度,考虑了系统各支路基态负载率的差异,并采用当前运行状态支路负载率对其进行加权修正,相比于传统信息熵模型,考虑得更加全面,且表征的物理意义也更符合电力系统的实际运行情况。

3 考虑电压稳定的预防连锁故障模型

电网在初始故障后因潮流转移而发生的连锁故障往往取决于电网的节点注入功率,调整发电机的节点注入功率可以预防连锁故障的发生或提高电网对于连锁故障的安全裕度。与此同时,当电网

的节点注入功率改变时,电网的电压稳定水平也会有所变化。为保证电网的安全稳定运行,在考虑连锁故障的预防模型时也要兼顾电网的电压稳定问题。文中主要研究如何通过预防控制方法提高电网对于连锁跳闸的安全裕度,避免电网触发连锁故障,对于预防控制不能奏效而须采用切负荷等紧急控制措施的情形,限于篇幅,文中暂不考虑。

3.1 对保证电网电压稳定水平的考虑

文中通过雅可比矩阵的最小特征值大小来度量系统工作点的静态电压稳定裕度。特征值分析法实质上是传统灵敏度判据在雅可比矩阵中的扩展分析,与电压灵敏度指标相比,更能反映系统的实际^[18]。对潮流方程雅可比矩阵 J 进行特征值分解:

$$J = VAU^T = \sum_{y=1}^m v_y \sigma_y u_y^T \quad (12)$$

将式(12)代入潮流线性化形式,有:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \sum_{y=1}^m \sigma_y^{-1} u_y v_y^T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: V 、 U 为正交矩阵; A 为特征值的对角矩阵; m 为潮流方程雅可比矩阵的阶数; σ_y 为第 y 阶特征值; v_y 、 u_y 分别为左、右特征向量; $\Delta\theta$ 、 ΔU 、 ΔP 、 ΔQ 分别为相角、电压、节点有功功率、节点无功功率的变化量向量。由式(13)可知,若存在一个接近于 0 的特征值,则任意小的功率变化都会引起状态变量很大的变化^[18]。

文中比较系统当前运行状态中各特征值 σ_y 的大小,并取最小特征值,以此表示系统当前静态电压稳定裕度 λ 。 λ 越小,表示系统当前静态电压稳定程度越低,反之亦然。

$$\lambda = \min_{y \in m} |\sigma_y| \quad (14)$$

3.2 预防控制模型的建立

若预防控制模型只能应对一种初始故障场景,则预防效果较薄弱,故文中由支路安全指标泰尔熵筛选出退出运行后对系统影响较严重的几条支路建立预想事故集,进行连锁故障的预防控制,使优化后的发电机组出力方案能应对多种初始故障场景。目标函数 f_1 和 f_2 如式(15)所示,优化目标为使 f_1 和 f_2 的数值尽量大。

$$\begin{cases} f_1 = \sum_j^n (M_j - (\min(0, g_j)))^2 \\ f_2 = \sum_j^n (\lambda_j - (\min(0, q_j)))^2 \end{cases} \quad (15)$$

式中: n 为预想事故集中预想事故数目; M_j 、 λ_j 分别为发电机组出力调整后预想事故集中第 j 个预想

事故发生后的系统安全指标与电压稳定裕度; $g_j = M_j - M_{j0}$, $q_j = \lambda_j - \lambda_{j0}$, g_j 、 q_j 分别为预想事故 j 的系统安全指标约束与电压稳定裕度约束, M_{j0} 、 λ_{j0} 分别为在初始发电机组出力方案下预想事故 j 发生后的系统安全指标与电压稳定裕度。

在预防控制模型中,系统发生故障前后都必须满足电网的电气约束关系。

将电网初始故障切除前、后的电网潮流约束分别表示为 h_0 和 h_1 ,其中 x 为系统状态变量。

$$\begin{cases} h_0(x) = 0 \\ h_1(x) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

预防控制模型中的不等式约束为:

$$\begin{cases} P_{Gimin} \leq P_{Gi} \leq P_{Gimax} & i = 1, 2, \dots, N_g \\ Q_{Gimin} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gimax} & i = 1, 2, \dots, N_g \\ U_{imin} \leq U_i \leq U_{imax} & i = 1, 2, \dots, N \\ |P_l| \leq P_{lmax} & l \in C \end{cases} \quad (17)$$

式中: P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为节点 i 上的发电机有功出力和无功出力; N_g 为系统发电机数目; P_{Gimax} 、 P_{Gimin} 分别为节点 i 上的发电机有功出力上、下限值; Q_{Gimax} 、 Q_{Gimin} 分别为节点 i 上的发电机无功出力上、下限值; U_i 为节点 i 的电压向量模值; U_{imax} 、 U_{imin} 分别为节点 i 的电压模值上、下限值; N 为系统节点数目。

将式(17)简化表示为:

$$\begin{cases} g_0(x) \leq 0 \\ g_1(x) \leq 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中: g_0 、 g_1 分别为系统发生初始故障前、后的不等式约束。

综合式(15)一式(18),给出考虑多种初始故障场景的连锁故障预防分析模型为:

$$\begin{cases} f_1 = \sum_j^n (M_j - (\min(0, g_j)))^2 \\ f_2 = \sum_j^n (\lambda_j - (\min(0, q_j)))^2 \\ h_0(x) = 0 \\ h_1(x) = 0 \\ g_0(x) \leq 0 \\ g_1(x) \leq 0 \end{cases} \quad (19)$$

3.3 预防控制策略流程

文中所提的预防控制策略首先通过计算各支路退出运行后的支路安全指标泰尔熵,筛选出脆弱性较高的数条支路构建预想事故集;然后以提高系统安全指标和电压稳定水平为目标,对发电机组出力方案进行优化;最后在优化解集中选出最佳折衷解。具体流程如图 2 所示。

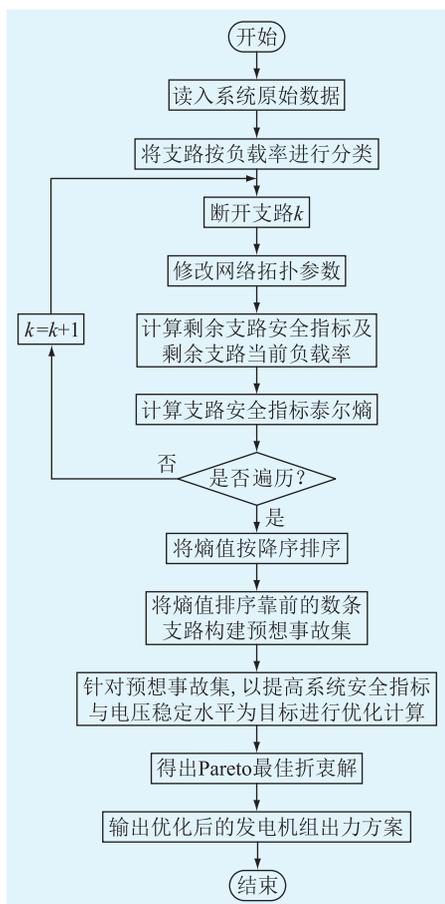


图2 预防控制策略流程

Fig.2 Flow chart of preventive control strategy

4 预防模型的求解策略

4.1 NSGA-II

文中采用非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)进行求解。该算法提出一种快速非支配排序,使 Pareto 支配排序的时间复杂度较 NSGA 降低;还提出一种拥挤度和拥挤度比较算子,并引入精英策略,增加了 Pareto 解集的多样性,扩大了采样空间。因此 NSGA-II 在多目标优化问题中被广泛应用,适用于文中模型。

4.2 Pareto 折衷解

文中采用熵权法对 Pareto 解集进行分析与决策。熵权法是一种客观赋权法,根据多个目标函数观测值所提供的信息确定目标权重。若某个目标的熵值越小,则说明该目标的变异程度越大,所提供的信息量越多,在综合评价中该目标所起作用越大,权重也越大,反之亦然^[19-20]。

假设共有 o 个样本,每个样本有 p 个目标函数值,则 x_{tw} 为第 t 个样本的第 w 个目标函数值 ($t = 1, 2, \dots, o; w = 1, 2, \dots, p$)。

对样本进行标准化处理,如式(20)所示。

$$a_{tw} = \frac{x_{tw} - \min(x_{1w}, \dots, x_{ow})}{\max(x_{1w}, \dots, x_{ow}) - \min(x_{1w}, \dots, x_{ow})} \quad (20)$$

式中: a_{tw} 为经数据标准化后的第 t 个样本的第 w 个目标函数值; x_{ow} 为第 o 个样本的第 w 个目标函数值。

计算第 w 个目标函数下第 t 个样本所占比重 P_{tw} 为:

$$P_{tw} = a_{tw} / \sum_{t=1}^o a_{tw} \quad (21)$$

第 w 个目标函数的信息熵为:

$$e_w = -\frac{1}{\ln o} \sum_{t=1}^o P_{tw} \ln P_{tw} \quad (22)$$

第 w 个目标函数的熵权为:

$$H_w = (1 - e_w) / \sum_{w=1}^p (1 - e_w) \quad (23)$$

第 t 个样本的综合评价值为:

$$S_t = \sum_{w=1}^p H_w P_{tw} \quad (24)$$

其中综合评价值最大的样本即为选出的最佳折衷解。

5 算例分析

为验证文中方法的有效性和正确性,采用 IEEE 39 节点系统作为算例系统进行实验分析,系统网络如图 3 所示。

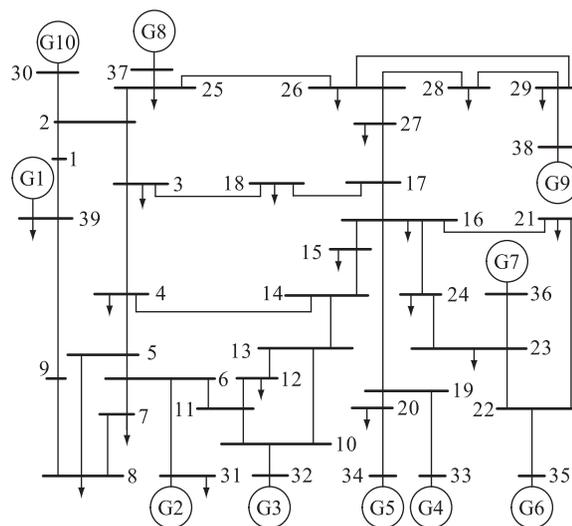


图3 IEEE 39 节点系统拓扑

Fig.3 Topology of IEEE 39-node system

5.1 脆弱支路识别

该系统共有 39 个节点,46 条支路,其中 L22、L37—L46 断开时,与之相连的发电机将退出运行,电网会解列为 2 个孤立的网络,故文中不对以上 11 条支路进行开断分析。

先将 IEEE 39 节点系统剩余的 35 条支路按照

基态负载率分为3个负载率组别,其中轻载支路为L1、L2、L4、L5、L6、L7、L8、L13、L14、L15、L19、L21、L24、L25、L26、L28、L30、L31、L32、L33、L35、L36;中度负载支路为L3、L9、L10、L11、L12、L16、L17、L18、L20、L23、L29、L34;重载支路为L27。支路潮流量和支路安全指标泰尔熵计算结果如图4—图7所示。

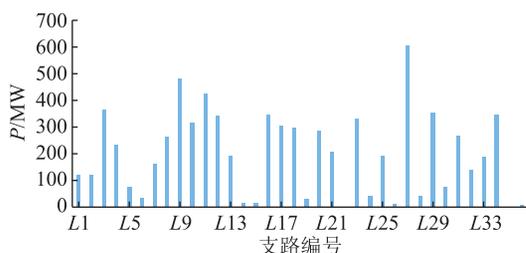


图4 系统支路潮流量

Fig.4 Flow volume of system branches

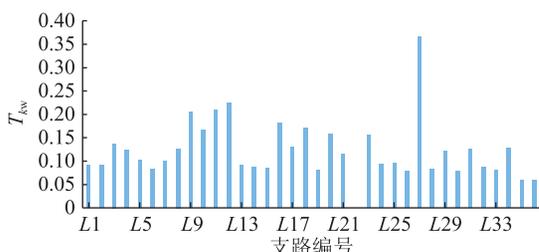


图5 负载率组别内支路安全指标泰尔熵指数

Fig.5 The Theil entropy index of the branch safety index in the load rate group

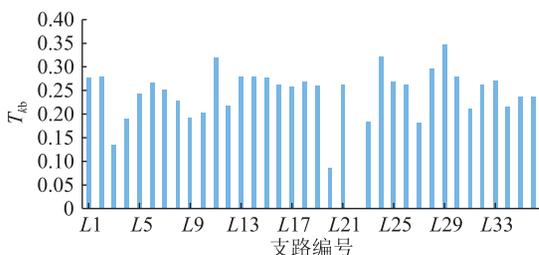


图6 负载率组别之间的支路安全指标泰尔熵指数

Fig.6 The Theil entropy index of branch safety index between load rate groups

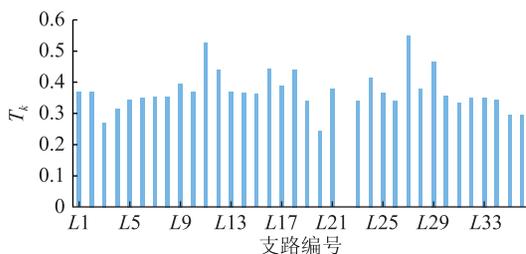


图7 系统支路安全指标泰尔熵指数

Fig.7 The Theil entropy index of system branch safety index

由图5和图6可知,负载率组别之间的支路安全指标泰尔熵指数明显大于负载率组别内的支路

安全指标泰尔熵指数。以L29为例,其负载率组别内的支路安全指标泰尔熵指数为0.1208,而负载率组别之间的支路安全指标泰尔熵指数为0.3461,约占系统支路安全指标泰尔熵指数的73.65%,说明当L29断开后,剩余系统的支路受扰程度不均衡度主要来源于基态负载率组别之间的差异。由图7可知,系统支路安全指标泰尔熵指数较大的支路,基本上都是承载潮流量较大的支路,说明承载潮流量较大的支路断开后,系统剩余支路受扰程度更加不均衡,造成某些支路潮流增长过多,其测量阻抗向保护动作边界逼近,进而可能退出运行。

文献[21]通过计算线路的功率介数筛选脆弱支路;文献[9]用支路传输裕度比对潮流熵进行改进,以此衡量支路停运造成的潮流转移影响;文献[22]则以功率过载量来描述这种状态的变化特征;而文中采用支路安全指标泰尔熵进行脆弱支路识别。由于文献[9]、文献[22]中均筛选排序靠前的10条支路,为便于对比分析,文中也筛选出排序靠前的10条支路,4种方法的对比结果见表1。

表1 支路脆弱性排序对比

Table 1 Comparison of branch vulnerability ranking

排序序号	文中方法	文献[21]	文献[9]	文献[22]
1	L27	L27	L27	L27
2	L11	L29	L18	L18
3	L29	L3	L23	L22
4	L16	L12	L29	L37
5	L12	L11	L17	L29
6	L18	L9	L16	L17
7	L24	L16	L9	L12
8	L9	L17	L11	L23
9	L17	L23	L38	L16
10	L21	L10	L12	L31

由表1可知,文中识别出的脆弱支路主要集中于负载较重的支路上,符合电网实际运行状况。且文中排序所得前10条支路与另外3种方法的识别结果高度重合,文献[21]中有7条重合,文献[9]中有8条,文献[22]中有6条。而在文献[9]和文献[22]与文中结果不同的少数支路中,分别有一条已经被文中方法剔除的变压器支路,即L38和L37。另外,4种方法均认为L27断开对系统造成的风险最严重。由图4可知,L27的基态有功功率为609MW,为重载支路,若其因故障断开,将使L29潮流越限而退出运行,进而引起L28和L24相继断开,系统发生连锁故障,最终导致机组G6、G7与系统断开。而文中方法与其他3种方法的差异主要在于脆

弱支路的排序上。由于文中还考虑了潮流重新分配后对剩余支路消纳能力的影响,克服了文献[21]传统潮流熵中潮流转移量无法体现支路负载率偏高危险性的缺点,而文献[22]的方法只考虑了发生功率过载的支路,忽略了其余接近过载的支路,因此容易遗漏一些高危支路。例如文中方法排序第二的L11,从仿真结果看,L11同时为节点7和8上的负荷输送电能且基态有功功率较高,为426 MW。当其因故障退出运行时,L9、L10承载的潮流均有大幅度的增长,其中L9的有功功率增长至878 MW,稍有扰动,很可能发生潮流越限,甚至引发连锁故障。相较于上述3种方法,文中所提评估指标能有效分辨出支路的受扰程度不均衡度的影响因素。

5.2 预防控制

文中首先计算各支路的支路安全指标泰尔熵指数,并取熵值排名靠前的10条支路(实际应用时可根据实际情况进行选择),以其单一退出运行的初始故障场景建立预想事故集;并通过NSGA-II优化发电机组出力方案。算例中设置种群数目为300,进化代数为300,交叉概率为1,变异概率为1/30。表2为发电机有功出力调整,优化结果如图8、图9和表3所示。

表2 调整前后发电机有功出力
Table 2 Active power output of generators before and after adjustment MW

发电机编号	有功出力	
	调整前	调整后
G1	1 000.000	1 515.899
G2	572.800	290.722
G3	650.000	313.121
G4	632.000	662.780
G5	508.000	528.791
G6	650.000	675.372
G7	560.000	455.304
G8	540.000	707.452
G9	830.000	906.249
G10	250.000	94.311

由图9和表3可以看出,发电机出力调整后,10种初始故障场景的系统安全指标均提高了20%以上,尤其是脆弱性排名前三的支路的系统安全指标分别提高了94.84%、95.89%、33.76%。而各支路电压稳定裕度在节点注入功率改变后也能维持稳定,且均有所提升,经验证,发电机组出力方案调整后,系统运行于正常状态时的系统安全指标和电压稳定裕度分别为1.7417和0.6675,较调整前的结果1.2265和0.6526均有所提升。且该发电机出力方

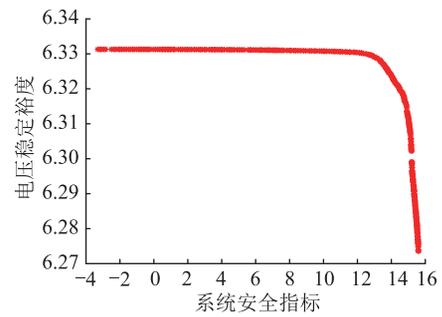


图8 Pareto 解集

Fig.8 Pareto solution set

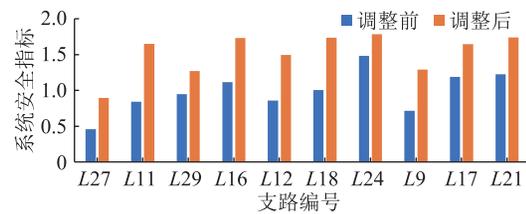


图9 调整前后系统安全指标对比

Fig.9 Comparison of system security indicators before and after adjustment

表3 调整前后系统安全指标与电压稳定裕度
Table 3 System safety index and voltage stability margin before and after adjustment

初始故障支路编号	调整前		调整后	
	系统安全指标	电压稳定裕度	系统安全指标	电压稳定裕度
L27	0.459 7	0.639 2	0.895 7	0.652 4
L11	0.841 6	0.638 7	1.648 6	0.655 4
L29	0.950 0	0.647 3	1.270 7	0.659 9
L16	1.114 8	0.600 7	1.732 9	0.610 9
L12	0.857 2	0.562 2	1.495 3	0.570 2
L18	1.003 2	0.594 1	1.717 0	0.612 9
L24	1.482 2	0.642 4	1.785 5	0.654 4
L9	0.715 9	0.577 6	1.291 7	0.596 3
L17	1.186 8	0.608 1	1.644 5	0.625 1
L21	1.226 5	0.647 9	1.741 7	0.661 3

案在正常运行状态和10种初始故障场景中均未出现越限的情况。综上,文中预防控制模型能应对预想事故集中的多种初始故障场景,且可在提高系统对连锁故障的安全水平时,兼顾电压稳定水平。

6 总结

针对电力系统中由于线路故障导致的连锁故障,提出一种基于脆弱支路筛选且兼顾电压稳定的电网连锁故障预防策略,达到多方面预防连锁故障的研究成果。

(1) 文中提出的支路安全指标能用来衡量支路安全裕度以及系统安全裕度。

(2) 支路安全指标泰尔熵模型同时考虑了支路基态负载率对支路受扰程度的影响以及发生初始故障后的支路负载率对剩余系统运行安全性的影响,评估结果更加贴近电网实际运行情况。

(3) 电网发生初始故障后,剩余支路的受扰程度不均衡度主要是来自于各负载率组别之间的差异。

(4) 文中所提的预防策略能在提升系统安全指标时,兼顾电网电压稳定水平,且优化后的发电机组出力方案能应对多种初始故障场景,具有实用性。

致 谢

本文得到福建省高校工程研究中心开放基金项目(KF-X19016, KF-D21009)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 严道波,文劲宇,杜治,等. 2021年得州大停电事故分析及其对电网规划管理的启示[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(9):121-128.
YAN Daobo, WEN Jinyu, DU Zhi, et al. Analysis of Texas blackout in 2021 and its enlightenment to power system planning management[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9):121-128.
- [2] 李琳,冀鲁豫,张一驰,等. 巴基斯坦“1·9”大停电事故初步分析及启示[J]. 电网技术,2022,46(2):655-663.
LI Lin, JI Luyu, ZHANG Yichi, et al. Preliminary analysis and lessons of blackout in Pakistan power grid on January 9, 2021[J]. Power System Technology, 2022, 46(2):655-663.
- [3] 邓慧琼,陈心耘,吴俊媛,等. 兼顾电压稳定和连锁故障触发的电网预防策略研究[J]. 智慧电力,2022,50(1):1-6.
DENG Huiqiong, CHEN Xinyun, WU Junyuan, et al. Prevention strategy of power grid considering voltage stability and cascading outage triggering[J]. Smart Power, 2022, 50(1):1-6.
- [4] 陈绍南,梁朔,李珊,等. 基于电气中心性指标的电网脆弱性评估[J]. 供用电,2021,38(8):70-76.
CHEN Shaonan, LIANG Shuo, LI Shan, et al. Power grid vulnerability evaluation based on electrical centrality indicators[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(8):70-76.
- [5] 吴晨,韩海腾,祁万春,等. 基于改进线路效能的电网脆弱性辨识方法研究[J]. 电力工程技术,2018,37(5):64-68.
WU Chen, HAN Haiteng, QI Wanchun, et al. Vulnerability identification in power systems based on an improved line-efficiency evaluation approach[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(5):64-68.
- [6] 王红壮,刘天琪,何川,等. 基于改进脆弱线路辨识的关键输电断面确定方法[J]. 现代电力,2020,37(3):294-302.
WANG Hongzhuang, LIU Tianqi, HE Chuan, et al. Key transmission section determination method based on improved vulnerable line identification[J]. Modern Electric Power, 2020, 37(3):294-302.
- [7] 黎寿涛,夏成军,钟明明,等. 基于故障链聚类算法的电网关键线路辨识[J]. 电力工程技术,2022,41(1):84-92.
LI Shoutao, XIA Chengjun, ZHONG Mingming, et al. Critical line identification of power grid based on fault chain clustering algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1):84-92.
- [8] 林攀,吴佳毅,黄涛,等. 电力系统脆弱性评估综述[J]. 智慧电力,2021,49(1):22-28.
LIN Pan, WU Jiayi, HUANG Tao, et al. Overview of vulnerability assessment for power systems[J]. Smart Power, 2021, 49(1):22-28.
- [9] 张才斌,游昊,李本瑜,等. 计及拓扑结构和运行状态的支路重要度评估方法[J]. 电力系统自动化,2017,41(7):15-20.
ZHANG Caibin, YOU Hao, LI Benyu, et al. Assessment method of branch importance considering topological structure and operation state[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7):15-20.
- [10] 李美成,梅文明,刘永强,等. 基于改进负载潮流熵指标准确辨识电网脆性支路的方法[J]. 电网技术,2019,43(3):1026-1033.
LI Meicheng, MEI Wenming, LIU Yongqiang, et al. Accurate identification method of brittle branches in power grid based on improved load flow entropy indexes[J]. Power System Technology, 2019, 43(3):1026-1033.
- [11] 何培颖,房鑫炎. 基于连锁过载故障发生机理的关键线路辨识[J]. 电力系统及其自动化学报,2018,30(8):76-80.
HE Peiyong, FANG Xinyan. Identification of critical lines based on the developing mechanism of cascading overload fault[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(8):76-80.
- [12] 张弘历,李华强,杨植雅,等. 基于潮流增长率泰尔熵的脆弱支路辨识[J]. 电网技术,2017,41(7):2340-2346.
ZHANG Hongli, LI Huaqiang, YANG Zhiya, et al. Identification of vulnerable line based on the theil entropy of flow growth rate[J]. Power System Technology, 2017, 41(7):2340-2346.
- [13] 任建文,魏俊姣,谷雨峰. 基于多目标粒子群优化算法的连锁跳闸预防控制[J]. 电力自动化设备,2016,36(7):53-59.
REN Jianwen, WEI Junjiao, GU Yufeng. Preventive control based on multi-objective particle swarm optimization algorithm for cascading trips[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7):53-59.
- [14] 王增平,朱劭璇,王彤,等. 受端电网分层优化切负荷策略[J]. 电工技术学报,2020,35(5):1128-1139.
WANG Zengping, ZHU Shaoxuan, WANG Tong, et al. Research on stratified optimal load shedding strategy for receiving end power grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(5):1128-1139.
- [15] 杨珺,姜凯,李扬. 基于运行风险的电力系统预防-校正协调控制策略[J]. 控制与决策,2017,32(7):1301-1305.
YANG Jun, JIANG Kai, LI Yang. Prevention-correction coordinated control strategy for power system based on operational risk[J]. Control and Decision, 2017, 32(7):1301-1305.
- [16] 戴志辉,刘讓,焦彦军. 基于保护动作概率模型的距离保护误动识别[J]. 中国电机工程学报,2015,35(23):6057-6065.

- DAI Zhihui, LIU Xuan, JIAO Yanjun. Misoperation identification of distance protection based on protection operation probability model [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35 (23): 6057-6065.
- [17] 吴敏洁,徐常萍,唐磊. 制造业泰尔熵指数及其对全要素生产率 TFP 的影响研究[J]. 统计与决策, 2018, 34(21): 130-134.
- WU Minjie, XU Changping, TANG Lei. Study on Theil entropy index of manufacturing industry and its influence on TFP [J]. Statistics & Decision, 2018, 34(21): 130-134.
- [18] 汤涌. 电力系统电压稳定性分析[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- TANG Yong. Analysis of power system voltage stability [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [19] 王浩翔,赵冬梅,陶然,等. 基于分解的多目标进化算法的含 MMC-HVDC 交直流混合系统最优潮流研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(17): 3691-3702.
- WANG Haoxiang, ZHAO Dongmei, TAO Ran, et al. Study on optimal power flow for AC/DC hybrid system incorporating MMC-HVDC based on MOEA/D [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(17): 3691-3702.
- [20] 刘小龙,李欣然,刘志谱,等. 基于负荷重要性和源-荷互补性的离网系统终端电/热/冷负荷投切策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 552-564.
- LIU Xiaolong, LI Xinran, LIU Zhipu, et al. Research on power/heating/cooling load switching strategy of off-grid system based on load importance and source load complementarity [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 552-564.
- [21] 王涛,高成彬,顾雪平,等. 基于功率介数的电网关键环节辨识[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1907-1913.
- WANG Tao, GAO Chengbin, GU Xueping, et al. Power betweenness based identification of power grid critical links [J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1907-1913.
- [22] 刘利民,刘俊勇,魏震波,等. 基于协同效应分析的输电线路脆弱评估方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 30-37.
- LIU Limin, LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. Transmission line vulnerability assessment based on synergetic effect analysis [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 30-37.

作者简介:



邓慧琼

邓慧琼(1972),男,博士,副教授,研究方向为电力系统连锁故障分析与预防(E-mail: denghuiqiong66@126.com);

曾凡淦(1998),男,硕士在读,研究方向为电力系统连锁故障分析与预防;

张晓飞(1995),男,硕士在读,研究方向为电网运行与优化。

A multi-objective prevention strategy for grid cascading failure based on vulnerable lines screening

DENG Huiqiong, ZENG Fangan, ZHANG Xiaofei, ZHENG Yuyi, LI Peiqiang, LI Jianxing

(School of Electronic, Electrical Engineering and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: A multi-objective prevention strategy for grid cascading failures based on the screening of vulnerable branches is proposed in this paper for the phenomenon of cascading failures triggered by line faults in power systems. Firstly, an improved line safety index and system safety index are proposed, and the Theil entropy index is introduced to assess the vulnerability of each line in the power system to quantify the impact on grid operational safety after a line fault being withdrawn from the operation. Then, several branches that have a seriously negative impact on grid operational safety after an initial fault being withdrawn from the operation are screened according to the line vulnerability ranking to establish a set of expected incidents. Finally, a cascading failures prevention and control model for power systems is established which takes into account the system safety index and grid voltage stability, as well as the ability of coping with various initial fault scenarios. The model is solved by using the non-dominated sorting genetic algorithm- II (NSGA- II). The simulation analysis based on the IEEE 39-node system shows that the proposed prevention strategy leads to a safe and reasonable generator output solution, and it demonstrates the importance of line load factor differences in the identification of vulnerable lines.

Keywords: cascading failure; Theil entropy; vulnerable lines; voltage stability; preventive control; non-dominated sorting genetic algorithm- II (NSGA- II)

(编辑 陆海霞)