

基于概率及结构重要度的电力系统事故链模型与仿真

王 涛¹,王兴武¹,顾雪平¹,贾京华²

(1. 华北电力大学 电气与工程学院,河北 保定 071003;

2. 河北电力调度通信中心,河北 石家庄 050021)

摘要: 通过分析电力系统连锁故障的一般演化规律,在已有的事故链模型基础上,提出一种同时考虑事故概率重要度和设备在网络中的结构重要度的事故链中间环节的预测指标。采用离差最大化的灰色关联度算法综合考虑各类指标,构建电网连锁故障的事故链搜索模型。采用 IEEE-RTS 系统仿真得到风险值较大的事故链集合,仿真结果验证了所提模型的有效性。

关键词: 电力系统; 连锁故障; 大停电; 事故链; 故障分析; 多属性决策; 模型; 仿真

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.07.009

0 引言

随着全球经济的发展和人们对电力需求的日益增加,现代电力系统的规模越来越大,其复杂程度也不断增加。此时,电网事故所波及的范围更广,后果更为严重^[1-4]。这种大停电事故多由连锁故障发展而成,如 2003 年的北美 8·14 大停电^[5]等。

预先建立连锁故障的分析模型,对连锁故障发展路径进行搜索,分析搜索到的故障序列并给出合理的预防控制措施^[6],这对于有效地预防连锁故障大停电事故具有重大意义。

目前,国内外关于电网连锁故障的研究方法可分为模式搜索法、模型分析法和风险评估法^[7]。模

式搜索法^[8-9]主要通过建立合理的电网模型和算法,对电网的连锁故障过程进行模拟。模型分析法有 2 个分支:一个是基于复杂系统理论的建模研究,有关学者抽象出了自组织临界模型、OPA 模型、CASCADE 模型、隐性故障模型^[10]、分支过程模型等;另外一个基于复杂网络理论的建模研究,具有代表性的模型有小世界网络模型和无标度网络模型。风险评估理论是一种将灾害的可能性和严重度相结合的理论,使运行人员能够检查出设备在使用过程中存在的风险,从而选择合适的安全控制措施。

基于电网事故链^[11-13]模型的连锁故障分析方法是模式搜索法的一种,与普通的模式搜索法相比,采用事故链分析模型可以直观地模拟电网连锁故障的发展路径,一目了然地将最终结果呈现出来,符合电网连锁故障的一般演化过程。本文在事故链模型分析方法基础上,提出了一种新的风险指标作为事故链中间环节的触发指标,不仅考虑了事故发

收稿日期:2012-08-21;修回日期:2013-05-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51077052);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(13MS108)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51077052) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(13MS108)

Advanced active power control strategy based on additional signal for VSC-HVDC transmission system

REN Jingguo¹,LI Kejun¹,NIU Lin²,ZHAO Jianguo^{1,2},YU Dayang¹,REN Jinggang³,LIANG Yongliang¹

(1. School of Electrical Engineering,Shandong University, Ji'nan 250061,China;2. State Grid of China Technology College,Ji'nan 250002,China;3. Dongying Power Supply Company,Dongying 257091,China)

Abstract: An advanced active power control strategy based on additional signal is proposed,which guarantees the DC voltage control and achieves active power balance during the big disturbance in VSC-HVDC transmission system. The variation characteristics of DC voltage and active power under fault situations are briefly analyzed,the power characteristic curve of advanced controller is given and the computational formula for the maximal working range of DC voltage at the constant active power control end is derived. The design of outer-loop active power controller is introduced,the computational formula of active power correction is derived and the operating principle of the controller is analyzed for normal and faulty operating conditions of VSC-HVDC system. Simulative study with PSCAD/EMTDC verifies that,the proposed control strategy maintains the DC voltage within the range of safe operation during the transient disturbances of grid voltage sag or leading inversion station breakdown.

Key words: voltage source converter; HVDC power transmission; flexible HVDC; power control; voltage control

生的概率重要度,也同时考虑了电气设备在电网中的结构重要度,以系统解列或潮流不收敛作为结束判据,采用基于离差最大化的灰色关联度算法对多属性指标进行计算,通过对 IEEE-RTS 系统进行仿真,验证了该方法的有效性。

1 基于事故链的连锁故障分析模型

设一个大停电事故由事件 T_1 开始, T_1 诱发了事件 T_2 的发生, T_2 又导致了事件 T_3 的发生,依此类推 T_{r-1} 连锁诱发了事件 T_r ,最后导致区域 A_k 发生大停电事故,则区域 A_k 的大停电事故可以表示为:

$$L_k = (T_1, T_2, \dots, T_r)$$

其中, r 重序元 L_k 为导致事故 A_k 发生的事故链; $T_i (i=1, 2, \dots, r)$ 为构成事故链的事件要素, T_1 称为事故链的初始环节, $T_2, \dots, T_r$ 称为事故链的中间环节,并且 T_{i-1} 诱发了 T_i 事件发生,可以看出 $T_i (i=1, 2, \dots, r)$ 中任何一个环节不发生就不会导致事故 A_k 的发生。因此,大停电事故的预防需要提前预测并搜索事故链 L_k ,并在一个适当的事件 T_j 后采取切负荷等措施抑制 T_{j+1} 事件的发生,即切断该条事故链,抑制连锁故障的进一步蔓延,从而达到预防控制大停电事故的目的^[14-15]。

2 事故链的搜索过程

2.1 初始环节的选取

连锁故障的发生都是从一个初始故障开始,然后随着后继故障的发生,电网进入不可控的连锁反应阶段,最终导致大停电事故发生。从国内外历次大停电事故可以看出,在系统负荷水平较高的情况下,与系统关联性较强且负载率高的输电线路故障更容易引发电网连锁故障,同时考虑每条输电线路的历史统计故障率,定义线路初始故障风险指标。

定义线路 i 的负载率 m_i 、系统负荷水平 μ 、支路 i 的关联系数 γ_i 分别为:

$$m_i = \left| \frac{F_{i0}}{F_{imax}} \right| \quad (1)$$

$$\mu = \frac{\sum_{i \in I} F_{i0}}{\sum_{i \in I} F_{imax}} \quad (2)$$

$$\gamma_i = \left| \frac{F_{i0}}{S_L} \right| \left(\sum_{j=1}^{i-1} \left| \frac{\Delta F_j}{F_{j0}} \right| + \sum_{j=i+1}^n \left| \frac{\Delta F_j}{F_{j0}} \right| \right) \quad (3)$$

其中, F_{i0} 为线路 i 的初始传输功率, F_{imax} 为线路 i 传输功率的极限值, F_{j0} 为线路 j 的初始传输功率, S_L 为系统的总负荷, n 为线路的总条数, I 为网络中线路集合, ΔF_j 为线路 i 断开后线路 j 上传输功率的变化量。

定义线路 i 的初始故障指标为:

$$\lambda_i = \alpha_i m_i \mu \gamma_i \quad (4)$$

其中, α_i 为线路 i 的历史统计故障率。

2.2 中间环节的预测

连锁故障大停电事故的一般发展过程表现为:系统出现故障后,运行状态的变化使得系统最优潮流重新分配,故障线路所带潮流按一定比例分配到其他输电线路,造成新的输电线路过载,触发保护动作将其切除,潮流的进一步转移导致输电线路相继过载,最终导致了连锁故障大停电事故的发生。电网中各条线路具有不同的结构重要度,结构重要度大的线路故障更容易导致连锁故障的发生,中间环节的预测原则是使事故链朝着大停电的方向发展,所以必须提出一个同时考虑线路故障概率重要度和线路结构重要度的风险指标作为中间环节的预测指标。

2.2.1 线路故障的概率重要度

经验表明,线路负载率越高、传输功率波动越大,越容易发生故障。本文选取中间环节线路故障的概率重要度的影响因素为:线路的负载率、线路潮流的变化量、线路隐性故障概率、线路历史统计故障率。

假设事故链的 T_{j-2} 环节故障线路为 $i-2$, T_{j-1} 环节故障线路为 $i-1$, T_j 环节故障线路为 i , T_{j+1} 作为预测环节,待预测的线路是 $i+1$ 。

a. 线路潮流的变化量。

$$\beta_{i+1} = \left| \frac{F_{j-1}^{i+1} - F_{j-1}^{i+1}}{F_{j-1}^{i+1}} \right| + \left| \frac{F_{j-2}^{i+1} - F_{j-2}^{i+1}}{F_{j-2}^{i+1}} \right| \quad (5)$$

其中, F_{j-1}^i, F_{j-1}^{i+1} 分别为该事故链在 T_{j-1} 环节发生后线路 i 和 $i+1$ 上的复功率, F_{j-2}^i, F_{j-2}^{i+1} 分别为该事故链在 T_{j-2} 环节发生后线路 $i-1$ 和 $i+1$ 上的复功率。 β_{i+1} 越大,则表明待预测线路 $i+1$ 与该事故链前一环节失效线路的相关性越强,受其影响程度也越大。

b. 隐性故障。

隐性故障是保护的一种误动作,后果是导致被保护元件的不恰当切除。本文在仿真中规定只有与上一级断开线路直接相连的线路才有可能发生隐性故障,其他线路不会发生隐性故障,且只考虑一重隐性故障。另外,考虑到潮流波动越大的线路发生隐性故障的概率越高,定义线路发生隐性故障的概率为:

$$h_{i+1} = \left| \frac{P_j^{i+1} - P_{j0}^{i+1}}{P_{max}^{i+1} - P_{j0}^{i+1}} \right| \cdot \left| \frac{P_j^{i+1} - P_{j-1}^{i+1}}{P_{max}^{i+1} - P_{j-1}^{i+1}} \right| \quad (6)$$

其中, h_{i+1} 为线路 $i+1$ 的隐性故障概率, P_j^{i+1} 为事故链在 T_j 环节发生后线路 $i+1$ 上的有功功率, P_{j0}^{i+1} 为线路 $i+1$ 的初始有功功率, P_{j-1}^{i+1} 为事故链在 T_{j-1} 环节发生后线路 $i+1$ 上的有功功率, P_{max}^{i+1} 为线路 $i+1$ 上允许流动的有功功率极限值。

通过上述影响因素的量化,可得到该事故链在 T_j 环节失效线路 $i+1$ 发生故障的概率重要度指标:

$$p_{i+1}=w_1m_{i+1}+w_2\beta_{i+1}+w_3h_{i+1}+w_4\alpha_{i+1} \quad (7)$$

其中, m_{i+1} 为线路 $i+1$ 的负载率, α_{i+1} 为线路 $i+1$ 的历史统计故障率, w_1, w_2, w_3, w_4 为这 4 个分立指标的权重。

2.2.2 线路的结构重要度

电网中不同位置的线路具有不同的结构重要度,线路介数、关联系数都能从网络拓扑上表征该线路的重要程度。本文选取线路结构重要度影响因素为:线路介数 b_i 、支路关联系数 γ_i 、线路断开后母线电压的变化量 u_i 。

a. 线路介数。

线路介数指该输电线路被电网中所有发电机母线与负荷母线之间所构成的最短路径经过的次数,能够反映该输电线路在电网拓扑结构上的重要程度。定义式如下:

$$b_i = \frac{\sum_{k \neq j \in V} N_{kj}(i)}{\sum_{k \neq j \in V} N_{kj}} \quad (8)$$

其中, i 为线路编号, $\sum_{k \neq j \in V} N_{kj}$ 为网络中所有发电机母线与负荷母线之间所构成最短路径的数量, V 为网络中节点集合, $\sum_{k \neq j \in V} N_{kj}(i)$ 为网络中所有发电机母线与负荷母线之间最短路径中经过输电线路 i 的次数。

b. 线路断开后母线电压的变化量。

$$u_i = \sum_{k=1}^H \frac{U_k - U_{k0}}{U_{k0}} \quad (9)$$

其中, i 为线路编号, H 为节点总数, U_k 为线路 i 断开后节点 k 的电压值, U_{k0} 为节点 k 的初始电压值。

通过上述影响因素的量化,可得到线路 i 在网络中的结构重要度指标:

$$q_i = w_1b_i + w_2\gamma_i + w_3u_i \quad (10)$$

获得线路断开的概率重要度和结构重要度后,可得到中间环节的预测指标:

$$Y_i = p_{i+1}q_i \quad (11)$$

2.2.3 中间环节触发方式

事故链中间环节的触发有显式触发方式和隐式触发方式 2 种。根据连锁故障的演化特征,电网中发生第 i 重故障以后,后继第 $i+1$ 重故障的发生可能具有必然的原因,如第 i 重故障导致了局部电压崩溃或线路潮流过载等问题,称为显式触发方式;同时第 $i+1$ 重故障的发生也可能具有隐式的原因,如第 i 重故障导致了系统中继电保护装置的拒动或误动等问题,称为隐式触发方式。由于显示触发方式是必然发生的事件,在仿真中规定显式触发方式的优先级高于隐式触发方式。

2.3 事故链搜索结束判据

通过分析国内外历次大停电事故,发现连锁故障大停电的发展过程中往往伴随着线路潮流越限、母线电压波动等现象,最终导致系统解列或失稳。系统解列后必然会导致各子系统的功率不平衡,出现一系列电压波动和频率波动,严重时导致潮流不收敛或大停电事故的发生;另外,为了确保各子系统的继续正常运行,需要采取相应的切机切负荷操作,这些控制措施也可能导致大面积停电事故。值得注意的是,系统解列后即使没有大量的负荷损失,电网也进入了极不安全的运行状态,存在大停电事故的隐患,已经构成系统重大安全事故等级,所以仿真中以系统解列或潮流无解作为结束判据。

3 采用基于离差最大化的灰色关联度算法进行多属性指标计算

概率重要度指标和结构重要度指标分别考虑了不同的影响因素,每一个影响因素作为一种属性,均属于多属性决策问题。离差最大化算法以所有属性的总离差最大为目标函数,从而给各个属性赋权值,可以根据系统不同的运行状态赋予不同的权值,是一种客观赋权法,避免了人为主观因素造成的影响;关联度定量地描述了各属性之间相互关联的情况,将复杂的多属性问题转化为简单的相似度问题,更容易理解。采用基于离差最大化的灰色关联度算法可以有效地权衡各个属性对总目标的作用大小,最终给出合理的决策结果。

设共有 n 条输电线路作为系统的评价对象,根据式(7)知:线路 i 的概率重要度指标包含 4 个属性,分别为线路的负载率 m_i 、潮流的变化量 β_i 、隐性故障概率 h_i 、历史统计故障率 α_i 。下面给出采用该算法计算概率重要度指标的步骤。

a. 确定参考序列。

第 i 个被评价对象可描述为 $x_i = \{m_i, \beta_i, h_i, \alpha_i\}$, $i=1, 2, \dots, n$ 。在 n 个被评价对象中选出各属性的最优值组成参考序列 $x_0 = \{m_0, \beta_0, h_0, \alpha_0\}$, x_0 构成了一个相对理想化的最优样本,是综合评价的标准。

b. 比较数列集及其规范化。

n 个评价对象的属性值构成的矩阵 X 称为比较数列集。

$$X = \begin{bmatrix} m_1 & \beta_1 & h_1 & \alpha_1 \\ m_2 & \beta_2 & h_2 & \alpha_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_n & \beta_n & h_n & \alpha_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

为了便于后续描述,记 $X = (x_{ij})_{n \times 4}$ 。

由于各属性没有统一的度量标准,需要在进行

灰色关联度分析前对原始比较数列集中的数据运

用公式 $x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}}$ 进行规范化,处理得到规

范化比较数列集 $X' = (x'_{ij})_{n \times 4}$ 。

c. 用离差最大化算法确定属性权重。

根据文献[16-17]中推导得到的属性权重计算式为:

$$w_j = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n |x'_{ij} - x'_{kj}|}{\sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n |x'_{ij} - x'_{kj}|} \tag{13}$$

d. 计算关联度矩阵。

灰色关联度矩阵 $\xi = (\xi_{ij})_{n \times 4}$ 。

$$\xi_{ij} = \frac{\Delta(\min) + \rho \Delta(\max)}{\Delta_{ij} + \rho \Delta(\max)} \tag{14}$$

$$\Delta_{ij} = |x'_{0j} - x'_{ij}| \quad j = 1, 2, 3, 4 \tag{15}$$

$$\Delta(\max) = \max_{1 \leq i \leq n} \max_{1 \leq j \leq 4} (\Delta_{ij}) \tag{16}$$

$$\Delta(\min) = \min_{1 \leq i \leq n} \min_{1 \leq j \leq 4} (\Delta_{ij})$$

其中, ξ_{ij} 为第 i 个评价对象与最优参考序列间的关联度; ρ 为分辨系数,用来削弱 $\Delta(\max)$ 过大而使关联系数失真的影响,人为引入这个系数是为了提高关联系数之间的差异显著性, $0 < \rho < 1$, 通常取 $\rho = 0.5$ 。

e. 计算概率重要度指标。

$$p_i = \sum_{j=1}^4 w_j \xi_{ij} \tag{17}$$

其中, w_j 为第 j 个属性的权重。按照式(17)可计算出线路故障的概率重要度指标。

同理,按照类似步骤也可求出线路的结构重要度指标,从而得到事故链中间环节的预测指标值。

4 算例分析

采用 IEEE-RTS 系统作为算例,IEEE-RTS 系统如图 1 所示,共有 10 台发电机、24 个节点、38 条输电线路。

使用 MATLAB 编程实现初始故障指标和中间环节预测指标的计算。 T_j 环节失效后,计算其他非故障线路的指标 Y_i ,并从大到小对线路进行排序。若有线路的负载率大于 1,则启动显式触发切除负载率最高的线路;若电网中所有线路的负载率均小于 1,则启动隐式触发,认为指标 Y_i 最大的线路是下一级的故障线路,反复进行此过程,直到系统解列或潮流不收敛后停止搜索。仿真流程图如图 2 所示。

通过 MATLAB 程序计算各条线路的初始故障风险指标值,表 1 给出了初始故障风险指标较大的线路集。

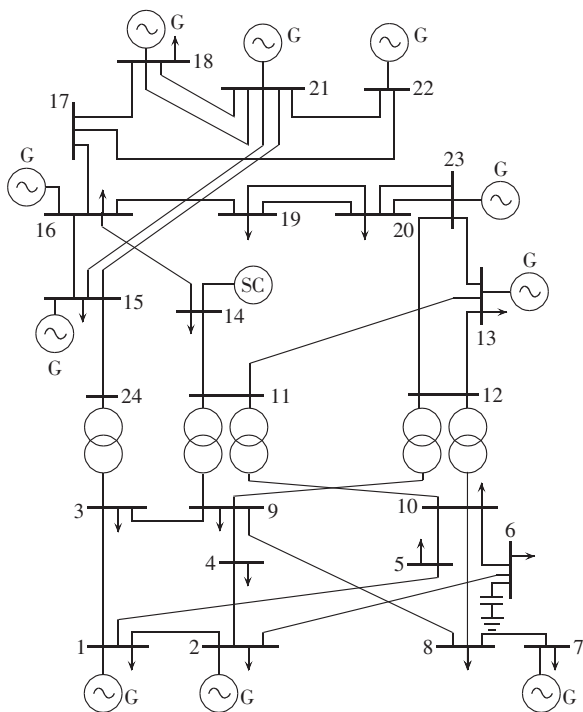


图 1 IEEE-RTS 系统图

Fig.1 IEEE-RTS system

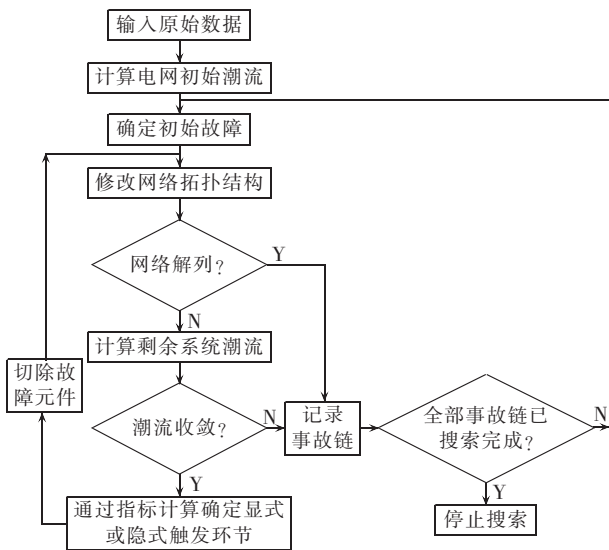


图 2 基于事故链模型的电网连锁故障仿真流程图

Fig.2 Flowchart of power system cascading failure simulation based on fault chain model

表 1 初始故障线路集

Tab.1 Initial faulty line set

线路	线路始端节点	线路末端节点	线路负载率	支路关联系数	历史统计故障率	初始故障指标
L23	14	16	0.599 4	4.411 4	0.380 0	0.254 6
L27	15	24	0.359 2	2.693 6	0.410 0	0.100 5
L28	16	17	0.543 4	1.535 3	0.350 0	0.074 0
L21	12	23	0.374 6	1.101 7	0.520 0	0.054 4
L22	13	23	0.369 2	1.015 4	0.490 0	0.046 5
L10	6	10	0.464 6	0.688 3	0.330 0	0.026 7
L19	11	14	0.277 7	0.947 6	0.390 0	0.026 0
L25	15	21	0.363 1	0.324 5	0.410 0	0.012 2

第 1 次仿真中,线路 L23(14-16)(括号内前、后数据分别为线路始端节点号、线路末端节点号,后同)作为初始故障切除后,通过 MATLAB 程序计算其余各条输电线路的负载率 m_i 、潮流的变化量 β_i 、隐性故障概率 h_i 、线路历史统计故障率 α_i 、线路介数 b_i 、支路关联系数 γ_i 以及线路断开后母线电压的变化量 u_i ,前 4 个参数作为概率重要度的影响因素,通过上面提出的概率重要度的计算步骤可以得到各条线路的概率重要度 p_i ;后 3 个参数作为线路结构重要度的影响因素,将其作为 3 种属性,每条线路作为一个对象,构成比较数列集,采用与概率重要度计算相同的步骤计算出各条线路的结构重要度 q_i ,通过定义式(11)可以计算出中间环节预测指标值 Y_i 。从计算结果中筛选出排在前面的 3 条线路,如表 2 所示,表中 L7 为 L7(4-9)。由计算结果可知没有严重过载的线路,所以启动隐式触发方式,线路 L27(15-24)的指标值最大,所以将线路 L27 作为下一级故障线路切除,然后再重复同样的步骤计算此状态下剩余各条线路的指标值 Y_i ,从计算结果中筛选出排在前面的 3 条线路,如表 3 所示。由表 3 可以看出,线路 L29(16-19)处于严重过载状态,所以启动显式触发方式切除线路 L29,当线路 L29 被切除后,电网解列为两部分,其中一部分主要为负荷区,电源供电不足而发生大停电事故,停止搜索,得到一条完整的故事链:L23-L27-L29。依此类推,根据表 1 中的初始故障线路集可搜索得到相应的事故链集合,如表 4 所示。

由图 1 可以看出,线路集(L23(14-16)、L27(15-24)、L29(16-19))、(L21(12-23)、L22(13-23)、L23(14-16))与(L25(15-21)、L26(15-21)、L28(16-17))分别构成 3 个输电断面,其中某条线路故障退出运行后,其上流过的潮流会大量地转移到同一输电断面的其他线路上,从而造成连锁过载形成一条事故链;另外线路 L23(14-16)同时处于 2 个输电断面

表 2 切除初始故障线路 L23 后其余线路的各个指标值
Tab.2 Indicator values of rest lines after tripping out initial faulty line L23

线路	m_i	β_i	h_i	α_i	p_i	b_i	γ_i	u_i	q_i	Y_i
L27	0.645	0.308	0	0.410	0.624	0.228	0.592	0.508	0.474	0.373
L7	0.788	0.274	0	0.020	0.620	0.228	0.580	0.416	0.460	0.370
L29	0.766	0.704	0.485	0.340	0.847	0.351	0.342	0.058	0.410	0.342

表 3 切除线路 L23 和线路 L27 后其余线路各个指标值
Tab.3 Indicator values of rest lines after tripping out line L23 and line L27

线路	m_i	β_i	h_i	α_i	p_i	b_i	γ_i	u_i	q_i	Y_i
L29	1.407	1.655	0	0.340	0.807	0.351	0.342	0.058	0.410	0.326
L19	0.393	0.055	0	0.390	0.460	1.000	0.316	0.078	0.636	0.296
L7	0	1.219	4.191	0.020	0.473	0.228	0.580	0.416	0.460	0.282

表 4 根据初始故障集搜索得到的事故链集合
Tab.4 Searched fault chain set based on initial faulty line set

事故链
L23(14-16)-L27(15-24)-L29(16-19)
L27(15-24)-L23(14-16)-L29(16-19)
L28(16-17)-L24(15-16)
L21(12-23)-L23(14-16)-L22(13-23)
L22(13-23)-L23(14-16)-L21(12-23)
L10(6-10)-L5(8-10)-L23(14-16)-L29(16-19)
L19(11-14)-L23(14-16)-L29(16-19)
L25(15-21)-L28(16-17)-L26(15-21)

上,并且初始潮流较大,从表 4 中可以看出,该线路出现在多条事故链中,成为比较关键的输电线路;由于 IEEE-RTS 属于小系统,同时断开很少的输电线路就会导致大停电事故的发生。上述分析表明,仿真得到的事故链集合比较合理,验证了本文所提出方法的有效性。

5 结论

针对电力系统极为严重的大停电事故,本文在分析连锁故障特征的基础上,基于电网的事故链分析模型,提出了一种新的风险指标作为事故链中间环节的预测指标,同时考虑了线路故障的概率重要度和线路在电网中的结构重要度,使连锁故障朝着大停电的方向发展,采用基于离差最大化的灰色关联度算法计算多属性指标,搜索出风险值较高的事故链集合,为预防大停电事故的发生提供了依据。最后,通过 IEEE-RTS 系统的仿真,证明了该方法的有效性。

参考文献:

[1] 甘德强,胡江溢,韩祯祥. 2003 年国际若干停电事故思考[J]. 电力系统自动化,2004,28(3):1-4,9.
GAN Deqiang,HU Jiangyi,HAN Zhenxiang. Thought on the 2003 blackouts across several continents[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(3):1-4,9.

[2] U.S.-Canada Power System Outage Task Force. Final report on the August 14th,2003 blackout in the United States and Canada:causes and recommendations[R]. [S.l.]:US-Canada Power System Outage Task Force,2004.

[3] 陈德树. 大电网安全保护技术初探[J]. 电网技术,2004,28(9):14-17,27.
CHEN Deshu. Preliminary research on security protection technology of large-scale power grid[J]. Power System Technology, 2004,28(9):14-17,27.

[4] BILLIONTON R,SALVADERI L,MECALLEY J D,et al. Reliability issues in today's electric power utility environment[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1997,12(4):1708-1714.

[5] 印永华,郭剑波,赵建军,等. 美加“8·14”大停电事故初步分析及应吸取的教训[J]. 电网技术,2003,27(10):8-11.
YIN Yonghua,GUO Jianbo,ZHAO Jianjun,et al. Preliminary analysis of large scale blackout in inter connected North

- America power grid on August 14 and lessons to be drawn[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 8-11.
- [6] 曹一家, 王光增. 电力系统复杂性及其相关问题研究[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(2): 5-10.
- CAO Yijia, WANG Guangzeng. Research on power system complexity and related topics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 5-10.
- [7] 占勇, 程浩忠, 熊虎岗. 电力网络连锁故障研究综述[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(9): 93-98.
- ZHAN Yong, CHENG Haozhong, XIONG Hugang. Review of cascading failures in electric power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(9): 93-98.
- [8] 李生虎, 丁明, 王敏, 等. 考虑故障不确定性和保护动作性能的电网连锁故障模式搜索[J]. 电网技术, 2004, 28(13): 27-31.
- LI Shenghu, DING Ming, WANG Min, et al. Search of power system chained failure mode considering uncertainty of element fault and performance of protective relaying[J]. Power System Technology, 2004, 28(13): 27-31.
- [9] 邓慧琼, 艾欣, 张东英, 等. 基于不确定多属性决策理论的电网连锁故障模式搜索方法[J]. 电网技术, 2005, 29(13): 50-55.
- DENG Huiqiong, AI Xin, ZHANG Dongying, et al. Search technique for power system cascading outages based on uncertain multiple attribute decision-making[J]. Power System Technology, 2005, 29(13): 50-55.
- [10] 杨明玉, 田浩, 姚万业. 基于继电保护隐性故障的电力系统连锁故障分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 1-5.
- YANG Mingyu, TIAN Hao, YAO Wanye. Analysis of power system cascading failure based on hidden failures of protective relaying[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 1-5.
- [11] 罗毅, 王英英. 电网连锁故障的事故链模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24): 1-5.
- LUO Yi, WANG Yingying. Fault chains model for cascading failure of grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(24): 1-5.
- [12] 王安斯, 罗毅, 涂光瑜, 等. 用于预防控制的电力系统连锁故障事故链在线生成方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2446-2451.
- WANG Ansi, LUO Yi, TU Guangyu, et al. Online determination method of fault chains of power system cascading failure available for prevention control[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2446-2451.
- [13] 罗金山, 罗毅, 涂光瑜, 等. 基于随机 Petri 网模型的地区电网事故链监控研究[J]. 继电器, 2006, 34(7): 32-37.
- LUO Jinshan, LUO Yi, TU Guangyu, et al. Study on fault chains monitoring in regional power network by using a SPN model[J]. Relay, 2006, 34(7): 32-37.
- [14] 王英英. 基于事故链的电力系统连锁故障风险评估与预防控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- WANG Yingying. Risk assessment and prevention control of cascading failures in power system based on fault chains[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
- [15] 宋福龙, 罗毅. 基于事故树分析法的电力系统事故链监控研究[J]. 继电器, 2006, 34(2): 29-34.
- SONG Fulong, LUO Yi. FTA-based fault chain monitoring research in power system[J]. Relay, 2006, 34(2): 29-34.
- [16] 王应明. 运用离差最大化方法进行多指标决策与排序[J]. 系统工程与电子技术, 1998, 20(7): 24-26.
- WANG Yingming. Using the method of maximizing deviations to make decision for multiindices[J]. Systems Engineering and Electronics, 1998, 20(7): 24-26.
- [17] 徐泽水. 不确定多属性决策方法及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 22-26.

作者简介:

王 涛(1976-), 男, 陕西西安人, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统安全防御与恢复控制、智能技术在电力系统中的应用(E-mail: wtwxx@126.com);

王兴武(1988-), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全防御与恢复控制;

顾雪平(1964-), 男, 河北石家庄人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为电力系统安全稳定评估与控制、电力系统安全防御与恢复控制、智能技术在电力系统中的应用;

贾京华(1963-), 男, 河北保定人, 高级工程师, 主要从事电网运行方式技术的管理工作。

Power system fault chain model and simulation based on probability and structural importance

WANG Tao¹, WANG Xingwu¹, GU Xueping¹, JIA Jinghua²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Hebei Power Dispatch and Communication Center, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: The general evolution pattern of power system cascading failure is analyzed and a prediction index is proposed for the intermediate events of fault chain based on the present fault chain model, which considers both the probability importance of fault and the structural importance of equipment in network. The grey rational algorithm with maximum deviation is used to comprehensively consider various indicators and a fault chain search model is built for power system cascading failure. Simulation on IEEE-RTS system is carried out to obtain the fault chain set with larger risk value and the simulative result verifies the effectiveness of the proposed model.

Key words: electric power systems; cascading failure; large scale blackout; fault chain; failure analysis; multiple attribute decision making; models; computer simulation