

基于综合脆性关联度的连锁故障预测与冲击辨识

吕歆瑶, 李华强, 郑 国, 周晓雨

(四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 提出了一种连锁故障预测的方法。所提方法综合考虑连锁故障过程中各支路的状态脆性关联度与结构脆性关联度, 在电气结构的基础上构建了反映各支路综合脆性关联度的连锁故障预测指标。将熵理论引入综合预测指标, 构建脆性关联熵确定故障线路对系统的冲击程度, 辨识出极易引发灾难性后果的初始故障及对系统影响极为严重的连锁故障序列。仿真结果证明了所提方法的有效性。

关键词: 电气结构; 结构脆性关联度; 状态脆性关联度; 脆性关联熵; 连锁故障预测; 冲击辨识; 故障分析
中图分类号: TM 71 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.12.017

0 引言

近年来, 随着人民经济和科技水平的高速发展, 现代社会对电力系统的要求越来越高。电网建设的相对滞后使电力系统的运行方式越来越接近其稳定极限。此时, 系统中某个元件故障后引起的扰动很容易导致电网中发生连锁故障, 最后导致大停电事故^[1-3]。因此, 如何从复杂电网整体运行情况出发, 深入研究电网连锁故障的发生机理并寻找最有可能发生的连锁故障路径及引发灾难性后果的初始故障成为目前电力系统最关心的问题。

迄今为止, 国内外研究人员建立了多种分析连锁故障的方法和模型, 包括模式搜索法、模型分析法等。常见的模式搜索法有解析法^[4]、随机模拟法^[5]、状态空间法^[6]等。模型分析法从复杂网络理论与复杂系统理论出发建立了小世界模型^[7]、WATTS 构造模型^[8]、OPA 模型^[9]、CASCADE 模型^[10]等。上述方法各具特色, 均在连锁故障分析研究上取得了一定的成果。文献[11]基于静态潮流提出一种反映已发生故障对后续故障的影响程度的连锁故障预测方法; 文献[12]提出使用一种连锁故障的关联模型来表征系统中故障元件与其余正常元件之间的相关性, 快速预测后续故障; 文献[13]针对故障过程中常伴随母线低电压和线路过载问题, 提出一种连锁故障预测方法。但以上所述文献均为单一考虑电网状态的连锁故障预测模型, 忽略了实际电网连锁故障过程中电网结构的变化, 对实际电网的研究有一定的片面性。文献[14]结合脆弱性, 提出使用表征系统当前运行状态与临界状态的距离指标预测下一级故障, 并用电气介数作为权重建立综合预测指标。虽然该模型同时考虑了电网的结构与状态, 但由于连锁故障级间故障联系紧密, 该综合预测指标忽略了故障之间的关联性, 不能全面反映系统中正常元件受故障元件的影响, 用这种方法预测出来的故障序列具有一

定的局限性。上述方法的初始故障选取均具有一定的随机性, 没有关注不同的初始故障引起的灾难性后果, 也没有考虑不同连锁故障序列对系统的冲击程度。而在连锁故障过程中, 故障后会对系统造成巨大冲击的元件正是系统运行人员所重点关注的对象。

针对以上问题, 本文从系统学角度出发, 旨在建立一种同时考虑电网结构与状态的支路综合关联度的连锁故障预测模型。首先, 提出使用电气结构取代电网纯线路连接, 弥补了经典网络模型不能很好地结合基尔霍夫定律的问题, 能更真实反映网络的动力学特性。其次, 引入脆性理论深入分析连锁故障的发生机理, 提出连锁故障的发展主要决定于各支路之间的综合脆性关联程度, 建立结合电气结构与电网运行状态的支路综合脆性关联指标。该方法弥补了关联模型中只考虑功率变化的不足, 很好地结合了电网电气结构的变化, 全面反映了故障元件与系统中其余元件的关联程度, 能有效地预测下一级故障。本文还引入熵理论, 建立连锁故障间的脆性关联熵, 从全系统的角度辨识极易引发灾难性后果的初始故障以及对系统冲击极为严重的连锁故障序列, 很好地为系统运行人员提供了重点监控对象。最后, 以 IEEE 30 节点系统为例, 用本文建立的模型进行仿真分析, 并与传统方法作对比, 验证了本文方法的有效性。

1 电气结构模型

从复杂网络出发, 现代电力系统在仅考虑输电线路拓扑连接的前提下提出多种研究电网结构的模型^[15-16], 但这些模型不能反映节点间的电气耦合程度, 与实际电网存在差异^[17]。文献[18]基于电气学, 提出电气结构模型。图 1 为 IEEE 30 节点系统的电气结构拓扑图。

图 1 中, 用两节点间的等效阻抗表示节点间的电气距离, 连接线的粗细代表节点间等效阻抗的大小。支路 ij 的等效阻抗 $Z_{eq,ij}$ 数值上等于从节点 i 注入单位电流源后节点 i 与 j 之间的电压 U_{ij} :

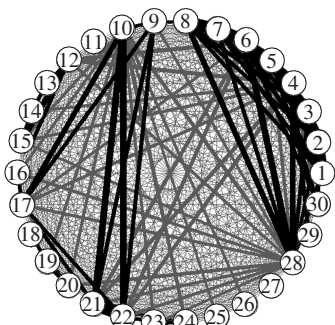


图 1 IEEE 30 节点系统电气结构拓扑图

Fig.1 Electrical topology of IEEE 30-bus power system

$$Z_{eq,ij} = U_{ij} / I_{ij} = U_{ij} \quad (1)$$

$Z_{eq,ij}$ 可用系统节点阻抗矩阵元素表达^[19]:

$$Z_{eq,ij} = (Z_{ii} - Z_{ij}) - (Z_{ij} - Z_{jj}) \quad (2)$$

其中, Z_{ij} 为系统节点阻抗矩阵第 i 行第 j 列元素。 $Z_{eq,ij}$ 越小(表现在图 1 中为连接线越粗),则区域中有越多的并联支路来分担转移潮流,可以让潮流均匀分布,电网鲁棒性较高,能有效抵御扰动。

为量化电气结构中的电气连接情况,对一个 N 节点的电力网络,定义电网的电气连接度为所有支路的等效阻抗之和:

$$Z_G = \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N Z_{eq,ij} \quad (3)$$

电气连接度 Z_G 可以直观地体现系统电气结构的均匀程度。 Z_G 的值越小,代表系统电气结构中并联支路越多,承受潮流转移的能力越强,且结构分布越均匀;而 Z_G 的值越大,代表系统电气结构中并联支路越少,承受潮流转移的能力越弱,且结构分布不太均匀。

从系统学的角度出发,考虑全电网的运行情况,支路 L_i 的电气结构重要度定义为:

$$\Delta Z_G^i = (Z_{G-i} - Z_G) / Z_G \quad (4)$$

其中, Z_{G-i} 为移除支路 L_i 后电网的电气连接度。式(4)通过系统电气连接度 Z_G 的变化来表征支路 L_i 在网络电气结构中位置的重要程度^[20]。 ΔZ_G^i 的值越大,代表支路 L_i 移除后,电气结构中并联支路越少,承受潮流转移的能力越弱,则系统受到的影响越大,即支路 L_i 越重要,发生在该支路上的故障更容易引发全局性的事故,该支路是电网的关键线路。支路电气结构重要度 ΔZ_G^i 注重电网电气特征,弥补了已有模型未考虑基尔霍夫定律的不足^[15],是衡量线路在电气结构中的地位的重要指标。支路的电气结构重要度可以从结构上评估系统的重要线路,为连锁故障中电气结构的变化研究打下基础。

2 基于脆性理论的综合脆性关联模型

复杂系统的脆性定义为^[21]:复杂系统由于受到内、外干扰因素的共同作用,而使其某一子系统崩

溃。该子系统的崩溃又导致其余子系统受到直接或间接的影响,最终使系统发生连锁性崩溃。

复杂电力系统的连锁性崩溃正是处于自组织临界状态的系统的脆性被激发的结果^[22]。电网中元件之间存在不同的关联特性,这种特性随连锁故障的发展而被迭代放大,电网崩溃的可能性也就越大。运用脆性理论中的脆性关联程度可以使电力系统连锁故障预测的研究更加直观而高效,符合实际电网运行情况。对脆性关联度的研究应该从 2 个方面出发:一是电网固有的结构关联程度,二是基于潮流转移的状态关联程度。

2.1 电气结构脆性关联指标

在电网的电气结构中,支路结构关联度可以用支路结构重要度的变化来体现。故障线路的断开导致其余线路在电气结构中的重要程度发生变化,可能使某条在电气结构中相对不重要的线路变成在新的电气结构中相对重要的线路。这种变化过程体现了电气结构在上一级故障后产生的变化,而支路重要程度的变化越大,代表该支路受扰动越大,是现在电气结构中较脆弱的线路。电网正常运行时,由式(4)可得,在 $p-1$ 级故障时,支路 L_i 的电气结构重要度为 $\Delta Z_G^i(p-1)$;当系统发生 p 级故障,支路 L_m 断开后,系统到达一个新的运行状态,在此状态下,支路 L_i 的电气结构重要度如式(5)所示。

$$\Delta Z_G^{i-m}(p) = \frac{Z_{G-i-m}(p) - Z_{G-m}(p)}{Z_{G-m}(p)} \quad (5)$$

其中, $Z_{G-m}(p)$ 为发生 p 级故障后电网的电气连接度; $Z_{G-i-m}(p)$ 为在 p 级故障下,移除支路 L_i 后电网的电气连接度。式(5)表征了支路 L_i 因 p 级故障而达到的新的重要度值。

p 级故障发生后,定义支路 L_m 对支路 L_i 的结构脆性关联度 $Z_{mi}(p)$,它可以反映电网中某一支路故障对其余正常运行支路的冲击程度。

$$Z_{mi}(p) = \Delta Z_G^{i-m}(p) - \Delta Z_G^i(p-1) \quad (6)$$

其中, $\Delta Z_G^i(p-1)$ 为支路 L_i 在电网 $p-1$ 级故障下的结构重要度; $\Delta Z_G^{i-m}(p)$ 为支路 L_i 在电网发生 p 级故障导致支路 m 故障后的结构重要度。

$Z_{mi}(p)$ 由支路 L_i 的结构重要度的变化来衡量。由式(6)可知, $Z_{mi}(p)$ 越大,表明支路 L_i 受支路 L_m 的影响越大,即更容易演变为新的脆性源,激发系统脆性关联,发生连锁故障。

2.2 状态脆性关联指标

考虑系统实际运行状态,潮流转移也是造成电网脆性崩溃的一个重要原因。当系统的脆性源被激发后,由于负荷波动会造成潮流的重新分布,新的潮流分布过程会引起电网中某些元件波动较大、热稳定越限而导致保护装置动作。潮流变化能直观体现

系统的运行状态。

脆性源元件 L_m 故障后,潮流转移造成支路 L_l 的功率变化为:

$$\Delta P_l = P_{l-m} - P_l \quad (7)$$

其中, P_l 为支路 L_l 在电网正常运行时的潮流; P_{l-m} 为支路 L_m 故障后,系统达到新运行状态时支路 L_l 的功率。

ΔP_l 反映了线路的功率变化情况,体现了各支路之间的关联程度。但由于电网中线路的功率传输极限各不一样,越接近功率传输极限的线路在受到扰动时也越容易发生故障。因此,同时考虑线路的功率变化和线路的功率极限逼近程度才能得到全面的支路状态脆性关联指标。

脆性源元件支路 L_m 故障后,支路 L_l 的功率极限逼近程度为:

$$\mu_l = (P_{lmax} - P_{l-m}) / P_{lmax} \quad (8)$$

其中, P_{lmax} 为支路 L_l 的有功功率热稳极限。 μ_l 越小,代表支路 L_l 的功率极限逼近程度越高,支路 L_l 在当前运行状态下越脆弱。

综合考虑线路的潮流变化和功率极限逼近程度,定义 p 级故障下,支路 L_l 的状态脆性关联度为:

$$P_{ml}(p) = \Delta P_l(p) P_m(p-1) - \Delta P_l(p) P_m(p-1) \mu_l(p) \quad (9)$$

其中, $\Delta P_l(p)$ 为 p 级故障下,支路 L_m 故障后潮流转移引起的支路 L_l 的功率变化; $P_m(p-1)$ 为脆性源元件支路 L_m 在 $p-1$ 级故障时本身承担的有功功率; $\mu_l(p)$ 为 p 级故障下,支路 L_l 的功率极限逼近程度。在相同功率变化下,功率极限逼近程度越高的线路越脆弱,即 $\mu_l(p)$ 越小,支路 L_l 越脆弱。同理,在相同功率极限逼近程度下,功率变化越大的线路越脆弱,即 $\Delta P_l(p)$ 越大,支路 L_l 越脆弱。综合以上两方面, $P_{ml}(p)$ 越大,代表该正常运行线路受故障线路的影响越大,该指标可全面评估电网当前状态下最脆弱的支路。

2.3 综合脆性关联指标

连锁故障的发生是系统中各个支路之间的关联性迭代放大的脆性过程,而支路之间的关联性与电网的结构与状态息息相关。

综合考虑电网的电气结构关联性和状态关联性,建立一种支路综合脆性关联指标来预测连锁故障中的下一级故障。

定义支路综合脆性关联度为:

$$S_{ml}(p) = \frac{1}{2} (Z'_{ml}(p) + P'_{ml}(p)) \quad (10)$$

其中, $Z'_{ml}(p)$ 、 $P'_{ml}(p)$ 均为归一化处理后的脆性关联度指标。电气结构脆性关联度反映了线路在网络电气结构中受上一级故障的影响而导致活跃程度的变化。对于拥有相同状态关联程度的支路,在结构方面更活跃的支路更脆弱,即 $Z'_{ml}(p)$ 越大,支路 L_l 更为脆弱。同理,对于相同的电气结构关联的支路,状态

脆性关联度反映了支路在电网运行状态中受上一级故障的影响而导致的潮流变化,包括潮流转移与功率极限逼近程度, $P'_{ml}(p)$ 越大,则支路 L_l 为现在状态下越脆弱的支路。综合两方面因素, $S_{ml}(p)$ 越大,代表该正常运行线路受故障线路影响越大,是当前运行情况下最脆弱的支路。

3 基于综合脆性关联度的连锁故障模型

3.1 连锁故障预测指标

综合电网的电气结构与运行状态,考虑综合脆性关联程度,得到全面预测连锁故障的下一级故障的关联度指标 $S_{ml}(p)$,选择其最大的一条线路作为下一级故障。计及前级故障累积效应,系统发生 p 级故障后, $p+1$ 级故障线路可通过式(11)预测得到:

$$\alpha_{ml}(p+1) = S_{ml}(p) + \frac{S_{ml}(p) - S_{ml}(p-1)}{S_{ml}(p-1)} \quad p=1, 2, \dots \quad (11)$$

其中, $\alpha_{ml}(p+1)$ 为发生 p 级故障后,综合反映系统当前关联状态、历史关联状态和网络电气结构关联性的预测指标,可用于预测连锁故障的脆性发展趋势。等号右侧第 1 项表示在 p 级故障后的综合指标;第 2 项表示 p 级故障后在 $p-1$ 级故障基础上的综合指标变化率。

3.2 连锁故障冲击辨识

系统连锁故障过程中,不同的故障支路带给系统不同的冲击影响,为辨识电网中极易导致灾难性事故的脆性源元件及对系统影响极严重的脆性过程,提出使用脆性关联熵表征故障支路对系统造成的冲击。

熵主要是对系统混乱程度的度量,广泛应用于系统稳定程度和不确定性的描述中^[23]。当系统状态 X_i 出现的概率为 P_i 时,系统熵 H 定义为:

$$H = -C \sum_{i=1}^M P(X_i) \ln P(X_i) \quad (12)$$

其中, C 为常数; M 为状态数。

根据脆性理论提出的脆性关联性^[24]和熵理论,建立电网脆性关联熵。 p 级故障下,支路 L_m 断开,运用支路综合脆性关联指标 $S_{ml}(p)$,定义剩余支路的关联率为:

$$\beta_l(p) = S_{ml}(p) / \sum_{l=1}^{N-1} S_{ml}(p) \quad (13)$$

定义电网脆性关联熵为:

$$H_m(p) = - \sum_{l=1}^{N-1} \beta_l(p) \ln \beta_l(p) \quad (14)$$

$H_m(p)$ 的大小反映了故障支路断开引起的各支路综合脆性关联度变化的分布特性。当各支路脆性关联变化率相等时,脆性关联熵达到最大值。在这种情况下,故障支路引起的考虑结构与状态的综合关联性平均分散到系统中其他各条支路上,产生较小波动,系统均匀运行,受到断线支路的影响最小。因

此,脆性关联熵越小,代表故障支路对系统的冲击程度越大,越可能引发灾难性事故。

脆性关联熵既表征了系统脆性的迭代放大程度,也可以评估系统运行情况的变化。使用式(14),即可算出连锁故障各阶段的脆性关联熵,脆性关联熵可以确定最可能引发灾难性事故的脆性源并得出对系统影响较严重的脆性过程,为系统运行人员提供了重点监测对象。

3.3 连锁故障预测与冲击辨识流程

根据支路综合脆性关联度对系统的连锁故障进行预测并使用脆性关联熵辨识连锁故障的影响程度,计算流程如图 2 所示。其中初始故障的确定为:遍历系统每一条支路,选择 $N-1$ 故障下的支路脆性关联熵最小的 10 条支路。

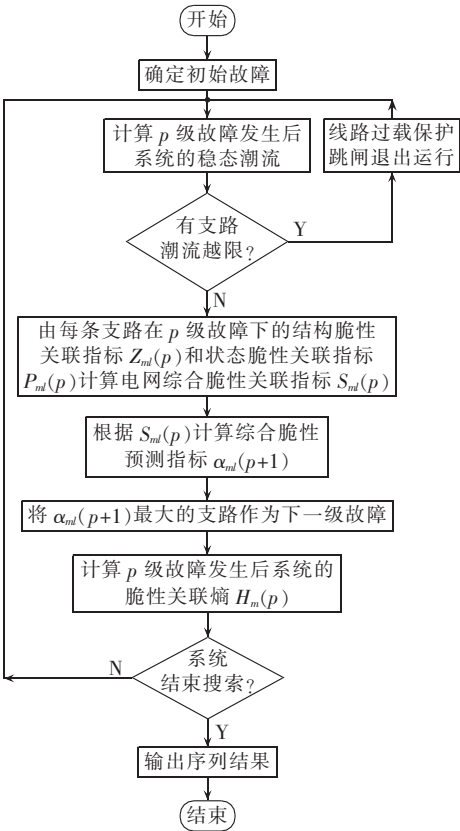


图 2 连锁故障预测与辨识流程图
Fig.2 Flowchart of cascading failure forecast and identification

4 系统仿真

利用 IEEE 30 节点系统来验证本文方法的性能。本文依照除去变压器支路剩余的 37 条支路编号,系统节点支路编号如图 3 所示。

4.1 初始故障辨识

运用系统各支路的 $N-1$ 故障的综合脆性关联熵对引发严重后果的初始故障进行辨识。 $N-1$ 故障支路脆性关联熵如图 4 所示。

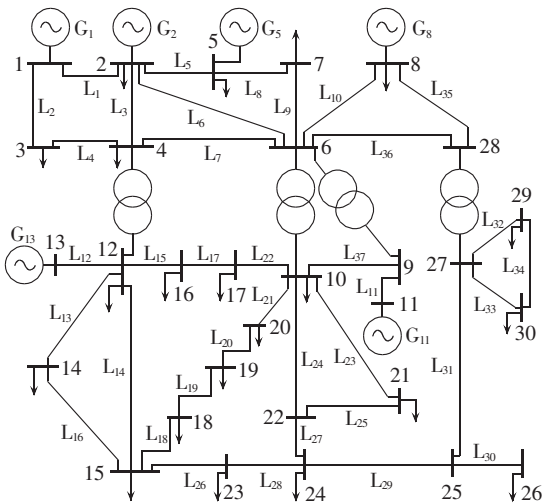


图 3 IEEE 30 节点系统接线图
Fig.3 Wiring diagram of IEEE 30-bus system

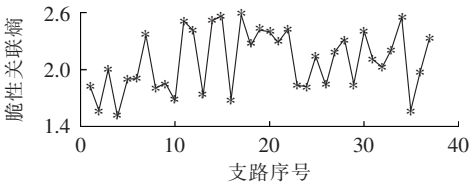


图 4 $N-1$ 故障脆性关联熵
Fig.4 Brittleness relevance entropy of $N-1$ fault

脆性关联熵的值越小,代表该支路故障引发系统关联性分布的不均匀程度越高,故障支路对系统造成的影响越严重,越容易引发连锁故障。表 1 为脆性关联熵最小的 10 条支路。

表 1 $N-1$ 故障中最小的 10 个脆性关联熵
Table 1 Top 10 of minimum brittleness relevance entropy of $N-1$ fault

排序	脆性源	脆性关联熵
1	L ₄	1.508 893
2	L ₂	1.568 508
3	L ₃₅	1.568 695
4	L ₁₀	1.673 552
5	L ₁₆	1.681 472
6	L ₁₃	1.740 977
7	L ₈	1.801 345
8	L ₂₄	1.819 625
9	L ₂₆	1.831 067
10	L ₁	1.832 946

由表 1 可以看出,脆性关联熵较小的支路 L₂、L₈、L₁₀、L₃₅、L₁ 均为发电机出口元件,在系统中承担主要潮流且在电网电气结构中的位置相当重要,一旦发生故障,将直接引起其所连发电机的其他出线重载甚至过载。此类线路对系统造成的冲击集中在该线路附近,系统的关联性分布极不均匀,极易引发电网连锁故障。L₄、L₂₆、L₁₃、L₁₆、L₂₄ 均在电网中处于网络能量传输关键位置的负荷节点。其中,L₄ 故障后,能量传输路径发生变化,L₁ 和 L₃ 受到一个较大的潮流冲

击,极易导致 G_1 平衡节点与电网脱离,造成系统解列。由于 L_{26} 在电气结构中位置关键,当其故障后, G_{13} 向负荷供电路径发生改变,潮流进行大范围转移,对电网其余线路冲击较大。类似的还有 L_{13} 、 L_{16} 、 L_{24} ,它们的断开极易引发连锁故障。

综上,本文方法可较好地辨识引发电网连锁性事故的初始故障,可以评价全网范围内的关键线路。

4.2 连锁故障预测

根据各支路 $N-1$ 故障下的脆性关联熵,选择表 1 中的 5 条线路作为脆性源元件进行后续故障的预测。按本文方法得到脆性过程如表 2 所示。

表 2 连锁故障部分脆性过程及预测指标
Table 2 Some brittle processes and relevant cascading failure forecast indexes

脆性过程	脆性源	$\alpha_{ml}(2)$	2 级故障线路	$\alpha_{ml}(3)$	3 级故障线路
1	L_4	2.000000	L_3	1.987055	L_6
2	L_{10}	1.383486	L_{36}	1.043162	L_{27}
3	L_{13}	1.033784	L_{14}	1.542373	L_{21}
4	L_8	1.585938	L_6	2.000000	L_7
5	L_{26}	1.010638	L_{27}	2.000000	L_{36}

分析表 2 结果可得,在脆性过程 1 与 4 中, L_4 和 L_{36} 故障后,均会导致发电机更换向负荷提供功率的路径, L_3 和 L_6 潮流变化最大且它们都与故障线路在结构上紧密相连,极易发生故障。它们的断开会进一步加剧发电机周围的潮流转移,分别使 L_6 、 L_7 故障断开。在脆性过程 2 中, L_{10} 断开后, L_{36} 承担潮流转移任务重于 L_{35} 且其本身承担的功率传输任务也重于 L_{35} ,而在结构上 L_{36} 与 L_{35} 均与 L_{10} 连接紧密。因此, L_{36} 受 L_{10} 断开影响最大,当 L_{36} 与 L_{10} 都断开后, G_8 通过 L_{35} 、 L_{31} 、 L_{29} 接入电网,而本应通过 L_{10} 、 L_{36} 向负荷节点 29、30、26 传输的功率只能通过 L_{24} 、 L_{27} 传输,潮流发生大范围转移,此时 L_{27} 在电气结构中的重要程度变大,极易发生故障,造成连锁故障的进一步恶化。类似的有脆性过程 3、5,作为初始故障的 L_{13} 、 L_{26} 均为电力系统中承担较重功率传输任务的支路,它们的断开导致附近支路受影响而故障,从而造成潮流大范围转移,连锁故障加速发展。

综上,通过对 IEEE 30 节点系统仿真分析,验证了本文方法使用的综合脆性关联度指标的正确性与实用性。而与文献[14]提出的传统预测方法得到的序列 L_8 - L_{35} - L_{28} 对比,本文得到的序列 L_8 - L_6 - L_7 更符合实际。以 L_8 为初始故障,作为 G_5 的出口线路, L_8 本身承担的向负荷节点 7 传输的功率改由其他路径传输,靠近 L_8 的线路 L_6 作为该区域的重要连接支路,其承担的潮流任务增加且在结构位置上受 L_8 影响较大,显然, L_6 比 L_{35} 更可能为下一级故障,预测结果体现了本文方法的优越性。

4.3 不同连锁故障序列冲击程度辨识

辨识不同连锁故障序列对系统的影响程度,计算各脆性过程的脆性关联熵如表 3 所示。

表 3 各脆性过程脆性关联熵
Table 3 Brittleness relevance entropies of different brittle processes

脆性过程	脆性源	$H_m(1)$	2 级故障线路	$H_m(2)$	3 级故障线路	$H_m(3)$
1	L_4	1.508893	L_3	1.375532	L_6	1.138441
2	L_{10}	1.673552	L_{36}	1.593822	L_{27}	1.245290
3	L_{13}	1.740977	L_{14}	1.607132	L_{21}	1.355172
4	L_8	1.801345	L_6	1.404893	L_7	1.176232
5	L_{26}	1.831067	L_{27}	1.712865	L_{36}	1.361488

分析表 3 可得,当 L_{13} 和 L_{26} 作为初始故障断开后,它们承担的传输任务均可通过其附近的多条路径向负荷节点传输;当 L_4 与 L_{10} 作为初始故障断开后,由于此类线路均为发电机附近承担重要潮流传输任务的线路,其附近仅有 L_1 与 L_{35} 能分担其转移潮流,而同样作为发电机出口元件的 L_8 ,当其作为初始故障断开后,向负荷节点 7 提供的功率可由 G_1 、 G_2 、 G_5 调整,并通过多条路径转移。因此,在发生脆性过程后,脆性过程 1、2 对系统的冲击影响相对严重。当 L_{14} 与 L_{27} 作为 2 级故障断开后,向负荷节点 14、23、24 提供的功率可通过潮流大范围转移来传输,仍有多条承担转移潮流的支路,它们可共同分担传输任务;而当 L_{13} 、 L_{36} 、 L_6 作为 2 级故障断开后,发电机周围仅有极少条线路承担发电机的功率输出,电网负担加剧。因此,在发生 2 级故障后,脆性过程 1、2、4 对系统的冲击影响较严重,可以看出,当发生初始故障后, L_8 与 L_{13} 、 L_{26} 的断开对系统的冲击影响差异不大,但当发生 2 级故障后,由于 L_8 与 L_6 在电网中的关键位置,脆性过程 4 对系统造成的影响明显增大。同理,可得出 3 级故障后,脆性过程 1、2、4 对系统冲击影响最大。综合每个阶段故障元件对系统的冲击影响程度,可知脆性过程 1、2、4 对系统冲击程度最大,应对其对应元件作重点关注。

综上,脆性关联熵不仅可以评估脆性过程中各阶段故障元件对系统的冲击影响,也能评估整个连锁故障序列对系统的影响程度,很好地为系统运行人员提供直观的决策支持。

5 结论

本文提出了一种基于支路综合脆性关联度的连锁故障预测与冲击辨识模型,具体结论如下。

a. 电网中元件之间存在的不同关联特性在连锁故障脆性过程中被迭代放大,最终导致电网连锁性崩溃。综合考虑电网固有的结构脆性关联度和状态脆性关联度可对连锁故障的研究进行完善与发展,

弥补了传统连锁故障预测的关联模型中只考虑状态变化的不足。

b. 支路的综合脆性关联度越大,对应支路受故障元件影响越大,连锁故障的脆性更容易通过此类线路迭代放大,导致对应支路受到故障元件的冲击而断开。该指标对下级故障辨识度高,可得到有效的连锁故障序列。

c. 故障元件断开后,脆性关联熵越小,系统受到的冲击影响越严重。脆性关联熵可以确定最可能引发灾难性事故的脆性源,也可以辨识整个连锁故障序列对系统的冲击影响,为预防电网大停电事故提供了一定参考。

参考文献:

- [1] 石立宝,史中英,姚良忠,等. 现代电力系统连锁性大停电事故机理研究综述[J]. 电网技术,2010,34(3):48-53.
SHI Libao,SHI Zhongying,YAO Liangzhong,et al. A review of mechanism of large cascading failure blackouts of modern power system[J]. Power System Technology,2010,34(3):48-53.
- [2] 毛安家,张戈力,吕跃春,等. 2011 年 9 月 8 日美墨大停电事故的分析及其对我国电力调度运行管理的启示[J]. 电网技术,2012,36(4):74-78.
MAO Anjia,ZHANG Geli,LÜ Yuechun,et al. Analysis on large-scale blackout occurred in South America and North Mexico interconnected power grid on Sept.8,2011 and lessons for electric power dispatching in China[J]. Power System Technology,2012,36(4):74-78.
- [3] 薛禹胜. 综合防御由偶然故障演化为电力灾难——北美“8·14”大停电的警示[J]. 电力系统自动化,2003,27(18):1-5.
XUE Yusheng. The way from a simple contingency to system-wide disaster—lessons from the eastern interconnection blackout in 2003[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(18):1-5.
- [4] KOYAMA Y,SASKI T,IHARA S,et al. Voltage collapse scenario search[C]//International Conference on Power System Technology. Kunming,China;IEEE,2002:344-348.
- [5] RIOS M A,KIRSEHEN D S,JAWAYEER A D,et al. Value of security:modeling time-dependent phenomena and weather conditions[J]. IEEE Trans on Power Systems,2002,17(3):543-548.
- [6] BIE Z,WANG X. Evaluation of power system cascading outages [C]//Proceedings of International Conference on Power System Technology. Kunming,China;IEEE,2002:415-419.
- [7] 丁明,韩平平. 小世界电网的连锁故障传播机理分析[J]. 电力系统自动化,2007,31(18):6-10.
DING Ming,HAN Pingping. Study of failure spreading mechanism in the small-world power grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(18):6-10.
- [8] WATTS D J. A simple model of global cascades on random networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,2002,99(9):5766-5771.
- [9] REN H,DOBSON I,CARRERAS B A. Long-term effect of the $N-1$ criterion on cascading line outages in an evolving power transmission grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2008,23(3):1217-1225.
- [10] DOBSON I,CARRERAS B A,NEWMAN D E. A loading-dependent model of probabilistic cascading failure[J]. Probability in the Engineering and Informational Sciences,2005,19(1):15-32.
- [11] 余晓丹,贾宏杰,陈建华. 电力系统连锁故障预测初探[J]. 电网技术,2006,30(13):20-25.
YU Xiaodan,JIA Hongjie,CHEN Jianhua. A preliminary research on power system cascading contingency forecasting[J]. Power System Technology,2006,30(13):20-25.
- [12] 王英英,罗毅,涂光瑜,等. 电力系统连锁故障的关联模型[J]. 电工技术学报,2012,27(2):204-209.
WANG Yingying,LUO Yi,TU Guangyu,et al. Correlation model of cascading failures in power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(2):204-209.
- [13] 陈媛,卢锦玲,于成洋,等. 复杂电网连锁故障预测[J]. 电力科学与工程,2008,24(3):9-12.
CHEN Yuan,LU Jinling,YU Chengyang,et al. Cascading contingency forecasting of complex power system[J]. Electric Power Science and Engineering,2008,24(3):9-12.
- [14] 王伊渺,李华强,肖先勇,等. 基于电网状态和结构的连锁故障预测[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(20):1-5.
WANG Yimiao,LI Huaqiang,XIAO Xianyong,et al. Cascading failures forecasting based on running state and structure[J]. Power System Protection and Control,2012,40(20):1-5.
- [15] 徐林,王秀丽,王锡凡. 电气介数及其在电力系统关键线路识别中的应用[J]. 中国电机工程学报,2010,30(1):33-39.
XU Lin,WANG Xiuli,WANG Xifan. Electric betweenness and its application in vulnerable line identification in power system [J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(1):33-39.
- [16] 曹一家,陈晓刚,孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识[J]. 电力自动化设备,2006,26(12):1-5,31.
CAO Yijia,CHEN Xiaogang,SUN Ke. Identification of vulnerable lines in power grid based on complex network theory [J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(12):1-5,31.
- [17] 谭玉东,李欣然,蔡晔,等. 基于电气距离的复杂电网关键节点识别[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):146-152.
TAN Yudong,LI Xinran,CAI Ye,et al. Critical node identification for complex power grid based on electrical distance [J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(1):146-152.
- [18] KOC Y,WARNIER M,KOOJJ R,et al. Structural vulnerability assessment of electric power grids[C]//IEEE 11th International Conference on Networking,Sensing and Control. Miami,Florida, USA;IEEE,2014:386-391.
- [19] BOMPARD E,NAPOLI R,XUE F. Analysis of structural vulnerabilities in power transmission grids[J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection,2009,2(1):5-12.
- [20] KOC Y,WARNIER M,MIEGHEM P V,et al. The impact of the topology on cascading failures in a power grid model[J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications,2014,402(10):169-179.
- [21] 韦琦,金鸿章,郭健,等. 基于脆性的复杂系统研究[J]. 系统工程学报,2004,19(3):326-328.
WEI Qi,JIN Hongzhang,GUO Jian,et al. Research on complex system based on brittleness[J]. Journal of Systems Engineering,2004,19(3):326-328.

- [19] LI Q,WANG X,ZHANG L,et al. Modeling methodology for transformer core vibrations based on the magneto-strictive properties[J]. IET Electr Power Appl,2012,6(9):604-610.
- [20] 董其国. 电力变压器故障与诊断[M]. 北京:中国电力出版社,2001:36-85.
- [21] 顾晓安. 电磁场诱发铁磁材料电磁振动机理研究及其应用[D]. 上海:上海交通大学,2003.
- GU Xiaolan. Study on mechanism of the mechanical behavior of ferromagnetic materials under sinusoidal magnetization and its applications[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2003.

作者简介:



李长云

李长云(1974—),男,山东阳谷人,副教授,博士,主要从事高压直流输电、智能微电网技术的教学与科研工作(E-mail:sdlcyee@qdu.edu.cn);

刘亚魁(1990—),男,山东梁山人,硕士研究生,主要从事直流偏磁现象、智能配电网技术的研究工作(E-mail:lykppqq@163.com)。

Analysis of mechanical characteristics of transformer iron core with DC bias

LI Changyun,LIU Yakui

(School of Electrical Engineering and Automation,Qilu University of Technology,Ji'nan 250353,China)

Abstract: DC bias may cause the partial overheat of transformer,exacerbate its vibration and noise and even damage it. According to the energy conservation law,a model of relationship between magnetostriction and DC-bias current is deduced,based on which,the deformation of silicon steel sheet caused by DC bias is analyzed. Simulative study is carried out for the outmost silicon steel of a single-phase three-column transformer and the simulative results prove the correctness of the deduced model and show the iron-core deformation caused by magnetostriction is the key factor exacerbating the transformation vibration.

Key words: electric transformers; transformer iron core; DC bias; mechanical characteristics; magnetostriction; models; computer simulation

(上接第 121 页 continued from page 121)

- [22] 刘文颖,王佳明,谢昶,等. 基于脆性风险熵的复杂电网连锁故障脆性源辨识模型[J]. 中国电机工程学报,2012,32(31):142-149,S19.
- LIU Wenying,WANG Jiaming,XIE Chang,et al. Brittleness source identification model for cascading failure of complex power grid based on brittle risk entropy[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(31):142-149,S19.
- [23] 曹一家,王光增,曹丽华. 基于潮流熵的复杂电网自组织临界态判断模型[J]. 电力系统自动化,2011,35(7):1-6.
- CAO Yijia,WANG Guangzeng,CAO Lihua. An identification model for self-organized criticality of power grids based on power flow entropy[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(7):1-6.
- [24] 韦琦. 复杂系统脆性理论及其在危机分析中的应用[D]. 哈尔

滨:哈尔滨工程大学,2004.

WEI Qi. Brittleness theory of complex system and its application to crisis analysis[D]. Harbin:Harbin Engineering University,2004.

作者简介:



吕歆瑶

吕歆瑶(1991—),女,四川遂宁人,硕士研究生,研究方向为电压稳定及优化(E-mail:lvxinyao2@163.com);

李华强(1965—),男,四川成都人,教授,博士,长期从事电压稳定及优化问题电网稳定与控制研究。

Cascading failure forecast and impact identification based on comprehensive brittleness relevance

LÜ Xinyao,LI Huaqiang,ZHENG Guo,ZHOU Xiaoyu

(School of Electrical Engineering and Information,Sichuan University,Chengdu 610065,China)

Abstract: A method of cascading failure forecast is proposed,which systematically considers the conditional brittleness relevance and structural brittleness relevance of different branches in the cascading failure and establishes the cascading failure forecast index based on the electrical structure to reflect the comprehensive brittleness relevance of each branch. The entropy theory is introduced in the comprehensive forecast index to construct the brittleness relevance entropy for determining the impact of faulty line on system,identifying the initial fault easily causing disaster and detecting the cascading failure sequence seriously impacting on system. The simulative results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: electrical structure; structural brittleness relevance; conditional brittleness relevance; brittleness relevance entropy; cascading failure forecast; impact identification; failure analysis