

基于一、二次系统交互关系的电网连锁故障演化机制分析

金 波,肖先勇,李长松

(四川大学 电气信息学院,四川 成都 610065)

摘要: 基于电网一、二次系统交互关系提出连锁故障演化机制的分析方法。基于一、二次系统相互影响的物理过程,提出交互关系的概念,并分析其在连锁故障演化过程中的机制;为刻画该交互关系,提出保护动作严重度概念,并建立一次系统变权重模型;构建基于交互关系的加权拓扑模型,并利用网络效率指标分析交互关系下的连锁故障演化机制。仿真结果表明:交互关系下的电网更加脆弱;线路运行容量系数越大,连锁故障对网络效率的影响越大;线路运行极限系数越大,电网抵御连锁故障的鲁棒性越强。

关键词: 复杂网络理论;交互;连锁故障;变权重模型;网络效率

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.01.027

0 引言

大停电表明,元件故障会沿电网急速传播而造成连锁跳闸效应,成为威胁系统安全的重要因素^[1]。保护失效的影响已不容小觑^[2-3],其与一次系统间的相互影响特性深刻影响着连锁故障传播过程^[1-4]。因此,提出计及一、二次系统相互关系的连锁故障演化机制分析方法,对研究电网安全具有重要意义。

复杂网络理论是分析连锁故障在电网中演化和传播的代表性方法之一,现有研究主要考虑了网络边、权重等局部特性与网络效率、稳定性等全局特性之间的关系^[5-6],提出了连锁故障演化机制的刻画方法^[5-12]。文献[7]引入网络效率概念,研究了连锁故障在小世界网络上的传播特性^[13-15];文献[8-9]基于网络流动态分配模型,研究了电网的动态特性。但这些研究主要基于无权、无向网络,忽略了电力系统固有的电气特性和动力学特性。为此,文献[10]考虑了相邻线路,提出一种有向复杂网络连锁故障模型;文献[11]提出了一种基于线路电抗的加权拓扑模型。这些研究主要从物理属性出发,对动态运行特性考虑不足。文献[12]提出一种通过修改线路参数表征系统动态运行特性的方法,可见,在研究连锁故障演化机制时,电网物理属性和动态运行特性均有较大影响,因此,综合考虑物理属性和动态特性,是科学揭示电网连锁故障演化机制的必然要求^[16]。

事实上,多数电网安全事故均是一、二次系统共同作用的结果。一次系统发生故障后导致元件参量达到保护系统动作阈值或引起保护不正确动作;保护跳闸后改变电网拓扑结构,从而影响系统运行参量分布,继而又可触发保护动作,可见,一、二次系统之间存在交互关系。文献[17]提出了研究相依网络

的框架和方法,并揭示了相依网络的重要性质,但较少考虑电气特性。对此,文献[18]从二次系统角度研究了监控系统对电力系统的影响,但缺乏对故障演化特性的刻画。因此,电网连锁故障演化过程中有必要考虑一、二次系统的交互关系。

针对以上分析,本文基于复杂网络理论,首先提出了一、二次系统交互关系的概念;然后,为刻画此交互关系,分别从保护动作后对运行参量分布的影响和一次系统自身调节后对保护动作触发的角度出发,定义了保护动作严重度 PTS(Protection Trip Severity)并建立了一次系统变权重模型,该模型综合考虑了电网物理属性和动态运行特性;最后,建立了基于交互关系的加权拓扑模型,并用网络效率指标分析了交互关系下的连锁故障演化机制,且 IEEE 39 节点系统算例验证了所提方法的正确性和有效性。

1 一、二次系统交互关系

继电保护是电网安全的第一道防线^[19],可快速清除或隔离故障,以防止故障蔓延。因此,本文二次系统主要考虑继电保护系统。

继电保护系统与一次系统之间的关系如图 1 所示。一次系统运行参量的改变可能触发保护动作(包含正确动作与不正确动作);保护动作跳闸改变一次系统的拓扑结构,使一次系统运行参量变化,造成新的保护动作。整个物理过程构成“闭环回路”,类似于文献[17-18]的交互系统物理特性,因此本文称此物理过程为一、二次系统交互关系。该交互关系在连锁故障演化过程中的机理如图 2 所示。

图 2 中 1-0 为一次系统初始故障,1-1、2-1 分别表示一次系统在连锁故障第一阶段的状态和二次系统在连锁故障第一阶段的状态,其他类似。初始故障触发二次系统动作,引起一次系统拓扑结构改

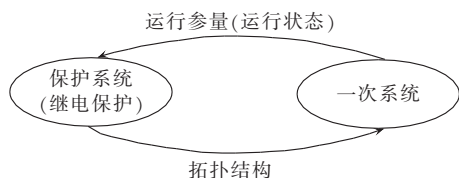


图 1 一、二次系统交互关系示意图

Fig.1 Schematic diagram of interaction between primary and secondary systems

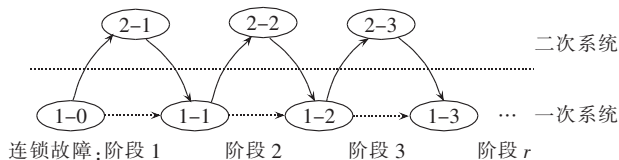


图 2 交互关系在连锁故障演化过程中的机理

Fig.2 Function of interaction during cascading failure evolution

变,从而重新改变运行参数的分布,进而引发下一阶段事件,直至连锁事故终止。为刻画此交互关系,本文分别从保护动作后对一次系统运行参数分布的影响和一次系统触发继电保护动作的角度进行研究。

2 PTS

继电保护为保障电网安全起到了重要作用,且在现代智能电网愈发复杂的动力学特性下更显重要。然而,隐性故障^[3]引起的保护失效使得一、二次系统交互特性对电网的影响更加“严重”,因为 $N-1$ 故障可能造成多个保护跳闸或越级动作^[3],从而引起一次系统运行参数更大范围的变动,继而又触发保护动作,如此交互影响着连锁故障演化过程。因此,在分析连锁故障的演化机制时有必要考虑保护失效产生的影响。由于侧重二次系统对一次系统的影响,因此本文主要从保护动作(包含失效导致的误动)后对一次系统的影响出发。

2.1 事件树

连锁故障多由一系列元件连锁动作引起^[20-22],事件树能较清晰地描述考虑保护失效的连锁过程。线路被切除后,与该线路两端相连线路的保护误动率增加^[3],本文称此类线路为暴露集,表征了保护失效可能发生的位置,并可据此选取下一级故障。为了对应起见,文中继电保护编号与线路编号一致。图 3 为事件树示意图,以说明如何在连锁故障演化过程中考虑保护失效,方框中数字代表一事件。

事件树中:事件 1 为初始事件,其暴露集为 2、3、4,之后以该层事件为初始事件分析引发的暴露集,如此循环,直至满足终止条件^[2],得到事件 1 引发的连锁故障。可详细分析因保护失效导致的连锁跳闸过程,据此定义下节的保护动作后果严重度。

2.2 保护动作后果严重度

保护系统动作(包含失效导致的误动)后可改变

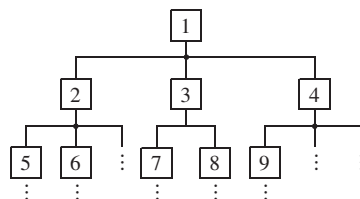


图 3 事件树

Fig.3 Event-tree

一次系统运行状态,电力事故表明^[23]:潮流转移使线路或设备过载导致连锁跳闸是事故扩大的主要原因;停电事故会造成不同程度的负荷损失;电网最终结束于系统失稳,如电压崩溃等。因此,有功功率波动、负荷损失和电压波动可反映保护动作后对运行参量分布的影响。

a. 假设电网中有 n 条线路,保护连锁跳闸后,线路 i 在连锁故障第 j 阶段的有功功率为 $P_{i,j}$,第 $j-1$ 阶段的有功功率为 $P_{i,j-1}$,则保护动作引起有功功率波动的后果严重度 $S_P(j)$ 为:

$$S_P(j) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{P_{i,j-1}} & P_{i,j} > P_{i,j-1} \\ 0 & P_{i,j} \leq P_{i,j-1} \end{cases} \quad (1)$$

b. 假设保护连锁跳闸后,连锁故障第 j 阶段造成的负荷损失为 $P_{\text{loss}}(j)$,则保护动作引起的负荷损失后果严重度 $S_{P_{\text{loss}}}(j)$ 为:

$$S_{P_{\text{loss}}}(j) = \frac{P_{\text{loss}}(j)}{P_{\text{total}}} \quad (2)$$

其中, P_{total} 为总的负荷。

c. 假设电网中有 m 个节点,保护连锁跳闸后,节点 i 在连锁故障第 j 阶段的电压为 $U_{i,j}$ (标么值),则保护动作引起电压波动的后果严重度 $S_U(j)$ 为:

$$S_U(j) = \sum_{i=1}^m |1 - U_{i,j}| \quad (3)$$

综合以上后果严重度得保护连锁跳闸后,连锁故障第 j 阶段的后果严重度 $S(j)$ 为:

$$S(j) = \beta_1 S_P(j) + \beta_2 S_{P_{\text{loss}}}(j) + \beta_3 S_U(j) \quad (4)$$

其中, β_1 、 β_2 、 β_3 为权重系数,且 $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 1$,权重系数的选取与电力系统的要求和研究侧重点有关^[2]。

因此,基于事件树和以上后果严重度定义保护 k 在连锁故障第 j 阶段的 PTS $S_{\text{pf}}(k, j)$ 为:

$$S_{\text{pf}}(k, j) = \sum_{k \in S_{\text{ex}}} S(j) \quad (5)$$

其中, S_{ex} 为到连锁故障第 j 阶段为止包含保护 k 的连锁跳闸集。

PTS 考虑了保护的失效特性,可以量化连锁故障不同阶段下保护动作后对运行参量分布的影响程度,表征了交互关系中二次系统对一次系统参量分布的影响。

3 一次系统特性描述

一次系统兼具物理属性和动态运行特性^[4],线路

阻抗等为其物理属性;故障后潮流转移、FACTS 装置调整线路参数等为其动态运行特性。建立考虑两者的连锁故障分析方法可较好揭示其演化规律。由于连锁跳闸都包含线路故障^[24],本节主要基于线路开断进行分析。

加权网络是现实世界中普遍存在的特性,是对复杂系统的相互作用结构更加细致的刻画^[25];边权的改变,可调整网络结构和功能,从而影响系统行为特性^[25]。因此可用变权重特性表征一次系统特性。

3.1 负载及其转移因子

保护动作跳闸会改变一次系统拓扑结构,从而引起潮流转移并可能导致线路过载,对电能传递产生重大影响。为了简要描述潮流转移过程,本节采用支路开断分布系数^[26]进行刻画。

首先,定义线路 i 的初始负载 $L_i(0)$ 为:

$$L_i(0) = (k_i \sum_{m \in S_i} k_m)^\beta \quad (6)$$

其中, k_i 为线路 i 的介数(通过线路 i 的最短输电电路径条数); S_i 为与线路 i 相邻线路的集合; β 为一可调整的参数,通过调整 β 可调整线路负载强度。该负载虽与实际电网负荷分布不能一一对应,但在一定程度上可描述运行参量的分布情况,因而该负载的分布特性具有实际参考价值^[12]。

线路 i 断开后会引引起线路 j 上的负载发生变化,其变化量设为 $\Delta L_{j-i}(t+1)$,可通过支路开断分布因子^[26] D_{j-i} 算出该变化量为:

$$\Delta L_{j-i}(t+1) = L_i(t) D_{j-i} = L_i(t) \frac{X_{ji}/x_j}{X_{ji}/x_i - 1} \quad (7)$$

其中, D_{j-i} 的物理意义为线路 i 断开后线路 j 上负载变化量占线路 i 断开前负载 $L_i(t)$ 的百分比; X_{ji} 为开断线路 i 所形成端口的输入电抗; X_{ji} 为开断线路 i 所形成端口与网络中任意线路 j 所形成端口之间的转移电抗; x_i, x_j 分别为线路 i, j 的电抗。

3.2 一次系统变权重模型

将线路电抗值作为一次系统边权初值^[11],可刻画一次系统物理属性。为了表征一次系统动态运行特性,首先引入线路运行容量和运行极限参数^[12]。

由线路初始负载定义线路 i 的运行容量 $L(i)$ 和线路运行极限 $L_{\lim}(i)$:

$$L(i) = a_1 L_i(0) \quad (8)$$

$$L_{\lim}(i) = a_2 L_i(0) \quad (9)$$

其中, a_1, a_2 分别为运行容量系数和运行极限系数,且 $a_1 < a_2$ 。

由此提出式(10)所示一次系统变权重模型。

$$w^1(i, j) = \begin{cases} w^1(i, j-1) & l_{oa}(i, j) \leq L(i) \\ w^1(i, j-1) \frac{l_{oa}(i, j)}{L(i)} & L(i) < l_{oa}(i, j) < L_{\lim}(i) \\ \infty & l_{oa}(i, j) \geq L_{\lim}(i) \end{cases} \quad (10)$$

其中, $w^1(i, j-1), w^1(i, j)$ 分别为连锁故障第 $j-1$ 阶段和第 j 阶段中线路 i 对应的一次系统权值,初值为线路电抗值; $l_{oa}(i, j)$ 为连锁故障第 j 阶段中线路 i 的负载,可由式(6)等式右侧和式(7)算出。物理意义为:保护跳开线路后,当线路 i 的负载不大于运行容量时,权值不变;当负载不小于运行极限时,则权值无穷大,表征线路开断运行,以描述线路运行参量达到保护系统动作阈值;当负载介于两者间时,则按比例调整权值,从而改变了网络功能,而在实际电网故障过程中,可通过 FACTS 装置调整线路电抗值,以减小线路负载,从而减缓故障蔓延^[12],因而该模型可模拟一次系统动态运行特性。该式也可反映系统的鲁棒性,当线路运行容量与运行极限接近时,权重可调整的范围变小,则电网减缓故障蔓延的能力减弱,即系统鲁棒性减弱;反之则鲁棒性增强。

式(10)可刻画一次系统运行状态改变后触发保护系统动作的机制。

4 拓扑模型及连锁故障分析

4.1 基于交互关系的拓扑模型

一、二次系统交互特性主要体现于保护动作后对运行参量分布的影响及运行参量的变化对保护动作的触发,而 PTS 和一次系统变权重模型可刻画以上特性。故提出如下—、二次系统交互关系模型。

$$w(i, j) = w^1(i, j) \frac{1}{S_{pt}(i, j)} \quad (11)$$

其中, $w(i, j)$ 为连锁故障第 j 阶段中线路 i 在交互关系下的权值,可更详细刻画连锁故障演化过程中各阶段的交互特性; $S_{pt}(i, j)$ 为连锁故障第 j 阶段中保护 i 的 PTS。该式可刻画—、二次系统交互关系物理过程; PTS 可改变权重分布,从而影响各线路负载,以表征保护动作后改变一次系统运行参量的特性; $w^1(i, j)$ 可刻画一次系统参量变化后对保护系统动作的触发机制。

4.2 连锁故障概率模型

连锁故障演化过程涉及线路过载及保护失效特性^[2-3]。为此,在考虑线路过载和保护隐性故障并存因素下,提出式(12)所示线路故障概率 $p_L(i)$ 模型。

$$p_L(i) = \begin{cases} p_H & l_{oa}(i) \leq L(i) \\ \frac{(1-p_H)[l_{oa}(i)-L(i)]}{L_{\lim}(i)-L(i)} + p_H & L(i) < l_{oa}(i) < L_{\lim}(i) \\ 1 & L_{\lim}(i) \leq l_{oa}(i) \end{cases} \quad (12)$$

其中, p_H 为保护隐性故障概率; $l_{oa}(i)$ 为当前运行状态下线路 i 的负载。该模型物理意义为:当线路负载不大于线路运行容量时其故障概率为 p_H ;当线路负载不小于线路运行极限时其故障概率为 1;当介于两者之间时,故障概率呈线性关系。

4.3 连锁故障严重度

文献[7]提出了网络效率概念,能描述全局性质^[7],与网络上的动力学过程,尤其与传播过程密切相关^[25]。该概念满足连锁故障演化过程物理特性,因此可用网络效率描述连锁故障的严重度。网络效率表达式为:

$$E = \frac{1}{z(z-1)} \sum_{i \neq j \in G} e_{ij} = \frac{1}{z(z-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d_{ij}} \quad (13)$$

其中, G 为系统结构拓扑; z 为节点数; e_{ij} 、 d_{ij} 分别为节点 i 、 j 间的效率和最短路径的权值和, $e_{ij}=1/d_{ij}$, d_{ij} 可根据式(11)求取。可知正常运行状态下 E 为一较大值,随着连锁故障的演化, E 值逐渐变小,反映运行状态偏离正常状态的程度,进一步可刻画连锁故障演化过程中的运行特性,可用式(14)表示。

$$F(j) = \frac{E(j)}{E^0} \quad (14)$$

其中, $E(j)$ 为连锁故障第 j 阶段时的网络效率; E^0 为未发生故障时初始网络效率。

由此,可分析连锁故障演化过程,其分析步骤如下:

a. 计算线路运行容量和运行极限,并选取初始故障;

b. 按式(7)计算各线路负载变化量,并通过式(11)交互关系模型改变相应线路权值;

c. 重新计算各线路负载,与线路运行极限比较并判定是否触发保护动作,若是则跳至步骤**b**,否则继续。

d. 保护跳闸,断开线路,并判断是否满足连锁故障终止条件^[2],若满足则跳至步骤**f**,否则继续;

e. 根据线路故障概率模型,选取故障概率最大^[27]的线路作为下层故障,并跳至步骤**b**;

f. 终止连锁故障演化过程分析,并记录各层故障信息。

本文连锁故障演化机制分析流程如图4所示。

5 仿真与分析

为验证本文方法的正确性,以 IEEE 39 节点系统作为仿真算例,其拓扑结构如图5所示。首先,研究了二次系统动作对一次系统运行参量分布的影响;其次,分析了一、二次系统交互关系下连锁故障演化过程中网络效率的变化情况。其中 $\beta_1=0.4$, $\beta_2=0.35$, $\beta_3=0.25$ ^[2], $p_H=0.0015$ ^[28];运行计算机为 Windows 7 4 GB 内存配置。

5.1 PTS

为描述保护动作在连锁故障演化过程中的作用,基于 PTS 得到图6所示各保护装置情况。

图6中 PTS 为相对值。可见,PTS 值较大的保护对应的线路主要分布于重要外送、联络通道,如保护3、22对应重要外送通道,保护12、20对应重要联

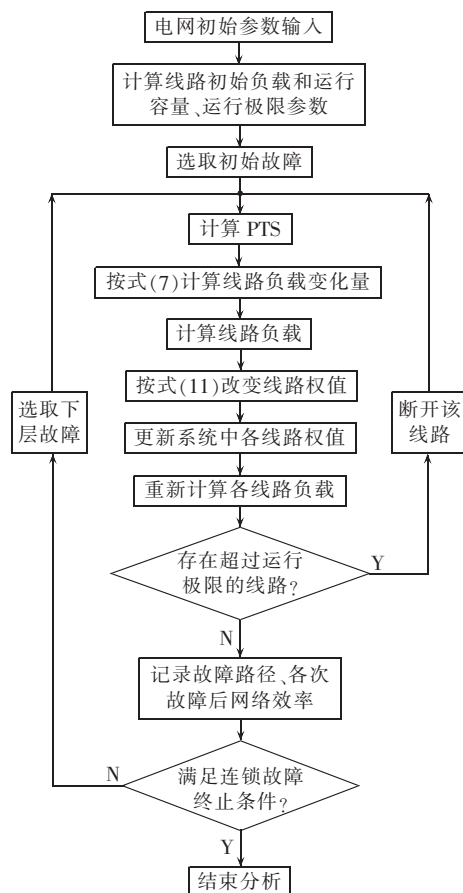


图4 连锁故障演化机制分析流程

Fig.4 Flowchart of mechanism analysis for cascading failure evolution

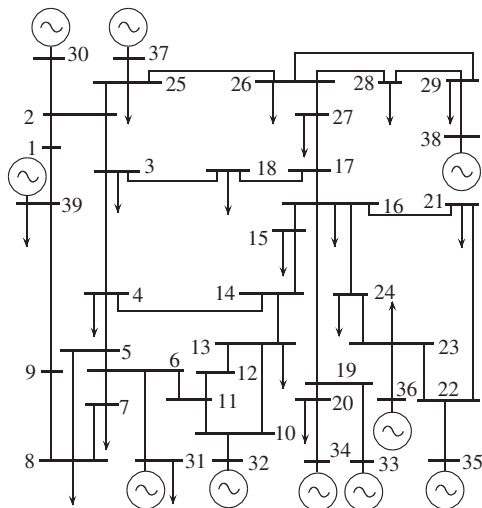


图5 IEEE 39 节点系统

Fig.5 IEEE 39-bus system

络通道。此类保护动作后对一次系统运行参量的影响较大。

5.2 基于网络效率的连锁故障演化机制分析

电网连锁故障一旦发生会对网络效率造成重大影响^[27]。连锁故障中可通过调整参数 β 来调整线路负载,为了简化起见,本文取 $\beta=0.1$ ^[27];根据仿真时间,每间隔 0.5 s 计算一次式(14)中的 F 值。

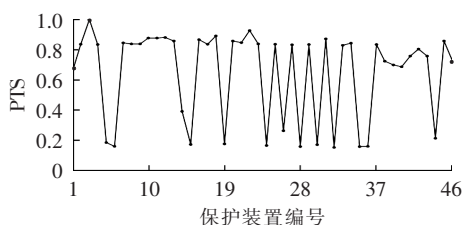


图 6 各保护装置的 PTS

Fig.6 PTS of different protections

5.2.1 交互关系对连锁故障演化机制的影响

一、二次系统交互关系在连锁故障演化过程中起着重要作用,为了研究交互关系对连锁故障演化过程的影响,图 7 给出在不同特性下连锁故障演化过程中的网络效率值,其中 $a_1=1.1, a_2=1.5$ 。图中箭头表示满足连锁故障终止条件的时刻,后同。

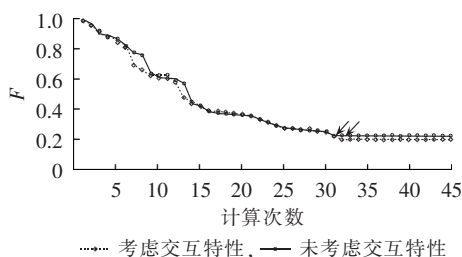


图 7 不同运行特性下网络效率在连锁故障演化过程中的变化情况

Fig.7 Variation of network efficiency during cascading failure evolution for different operating modes

由图 7 可见,交互关系下电网输电效率更差,且其故障时间更长。因为保护失效导致的误动可引起更多元件停运,从而“加重”对电网安全的影响,说明了交互关系下的电网更加脆弱,所得结论与文献[17-18,29]一致,验证了本文所提方法的正确性和有效性。因此在分析连锁故障演化机制对电网安全影响时须考虑一、二次系统交互关系。

5.2.2 线路运行系数对连锁故障演化机制的影响

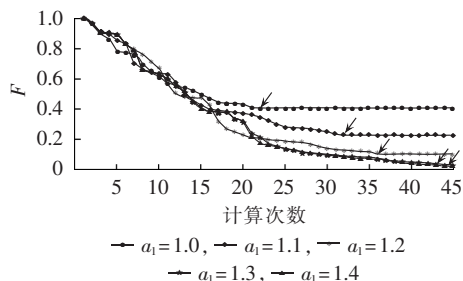
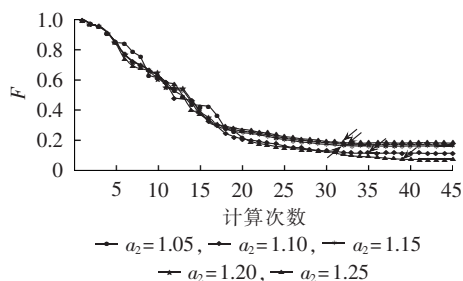
实际运行表明,线路特性在连锁故障演化过程中起着重要作用^[27]。为了研究交互关系下线路运行系数在连锁故障演化过程中的影响情况,图 8、图 9 给出了随机选取初始故障,在不同的线路运行系数下连锁故障演化过程中网络效率的变化情况。

由图 8、图 9 所得结论如下。

a. 连锁故障传播时间越长,其对电力系统造成的影响越大。

b. 线路运行容量系数越大(运行极限系数不变),连锁故障对网络效率的影响越大,故障时间也越长。因为运行容量系数越大,越接近线路运行极限,则系统故障后的调节能力减弱,即减缓故障蔓延的能力减小,因此出现该现象。

c. 线路运行极限系数越大(运行容量系数不变),电网对连锁故障的鲁棒性越好,故障时间也越短。

图 8 不同运行容量系数下网络效率在连锁故障演化过程中的变化情况 ($a_2=1.5, \beta=0.1$)Fig.8 Variation of network efficiency during cascading failure evolution for different operating capacity coefficients ($a_2=1.5, \beta=0.1$)图 9 不同运行极限系数下网络效率在连锁故障演化过程中的变化情况 ($a_1=1.0, \beta=0.1$)Fig.9 Variation of network efficiency during cascading failure evolution for different operating limit coefficients ($a_1=1.0, \beta=0.1$)

因为运行极限系数越大,则系统故障后减缓故障蔓延的能力越强,能较好地满足系统动态平衡特性^[14]。同时,适当增大运行极限系数可提高系统可靠性。

6 结论

本文提出了一、二次系统交互关系的概念,据此建立了加权拓扑模型,并分析了连锁故障演化机制。主要结论如下。

a. 所提 PTS 量化了保护动作对运行参量分布的影响,并可详细刻画连锁故障不同阶段下的交互特性。

b. 为了刻画交互关系中一次系统触发保护动作的机理,建立了一次系统变权重模型,该模型可表征一次系统物理属性和动态运行特性。

c. 分别分析了交互关系下运行容量系数和运行极限系数在连锁故障演化过程中对网络效率变化情况的影响。仿真表明:运行容量系数越大,电网减缓故障蔓延的能力越弱,连锁故障对网络效率的影响越大;运行极限系数越大,电网抵御故障的鲁棒性越强,且适当增大运行极限系数可提高系统可靠性。

电力系统连锁故障演化机制的影响因素复杂且具有高度不确定性^[30],如何使本文方法更符合电力系统实际特性,将是本文下一步研究重点。

参考文献:

[1] 刁塑,刘俊勇,刘友波,等.考虑电网承载结构的连锁故障模拟与

- 预防策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 143-151.
- DIAO Su, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Cascading failure simulation and defense strategy considering grid carrying structure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 143-151.
- [2] YU Xingbin, SINGH C. A practical approach for integrated power system vulnerability analysis with protection failures[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 1811-1820.
- [3] 慕宗江, 徐岩, 仇向东, 等. 基于潮流熵的继电保护定值在线校核评估方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 170-174.
- MU Zongjiang, XU Yan, QIU Xiangdong, et al. Online protection setting assessment based on power flow entropy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 170-174.
- [4] MAHSHID R N, WANG Zhuoyao, GHANI N, et al. Stochastic analysis of cascading-failure dynamics in power grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1767-1779.
- [5] 蔡泽祥, 王星华, 任晓娜. 复杂网络理论及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 114-121.
- CAI Zexiang, WANG Xinghua, REN Xiaona. A review of complex network theory and its application in power systems[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 114-121.
- [6] 魏震波, 苟竞. 复杂网络理论在电网分析中的应用与探讨[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 279-287.
- WEI Zhenbo, GOU Jing. An overview on application of complex network theory in power system analysis[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 279-287.
- [7] LATORA V, MARCHIORI M. Efficient behavior of small world networks[J]. Physical Review Letter, 2001, 87(19): 1-4.
- [8] ADILSON E M, LAI Yingcheng. Cascade-based attacks on complex networks[J]. Physical Review E, 2002, 66(2): 1-4.
- [9] CRUCITTI P, LATORA V, MARCHIORI M. Model for cascading failures in complex networks[J]. Physical Review E, 2004, 69(4): 1-4.
- [10] FANG Xinli, YANG Qiang, YAN Wenjun. Modeling and analysis of cascading failures in directed complex networks[J]. Safety Science, 2014(65): 1-9.
- [11] 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识别[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 theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(12): 1-5, 31.
- [12] 丁明, 韩平平. 加权拓扑模型下的小世界电网脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 20-25.
- DING Ming, HAN Pingping. Vulnerability assessment to small-world power grid based on weighted topological model[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 20-25.
- [13] 李扬, 苏慧玲. $N-k$ 故障下影响电力系统脆弱性的关键线路研究[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3): 60-67.
- LI Yang, SU Huiling. Critical line affecting power system vulnerability under $N-k$ contingency condition[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 60-67.
- [14] XU Qixin, XU Xinjian. Generating weighted community networks based on local events[J]. Chinese Physics B, 2009, 18(3): 933-938.
- [15] 陈华良, 刘忠信, 陈增强, 等. 复杂网络的一种加权路由策略研究[J]. 物理学报, 2009, 58(9): 6068-6073.
- CHEN Hualiang, LIU Zhongxin, CHEN Zengqiang, et al. Research on one weighted routing strategy for complex networks[J]. Acta Phys Sin, 2009, 58(9): 6068-6073.
- [16] SUN Yong, MA Lin, MATHEW J, et al. An analytical model for interactive failures[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2006, 91(5): 495-504.
- [17] BULDYREV S V, PARSHANI R. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks[J]. Nature, 2010, 464: 1025-1028.
- [18] MORRIS R G, BARTHELEMY M. Interdependent networks: the fragility of control[J]. Scientific Reports, 2013, 3(3): 1-5.
- [19] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架(1): 从孤立防线到综合防御[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 8-16.
- XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts part I from isolated defense lines to coordinated defending[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 8-16.
- [20] VAIMAN M, BELL K, CHEN Y, et al. Risk assessment of cascading outages: methodologies and challenges[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 631-641.
- [21] NEWMAN D E, CARRERAS B A, LYNCH V E, et al. Exploring complex systems aspects of blackout risk and mitigation[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2011, 60(1): 134-143.
- [22] HENNEAUX P, LABEAU P E, MAUN J C. Blackout probabilistic risk assessment and thermal effects: impacts of changes in generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4722-4731.
- [23] 汤涌, 卜广全, 易俊. 印度“7.30”、“7.31”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 167-174.
- TANG Yong, BU Guangquan, YI Jun. Analysis and lessons of the blackout in Indian power grid on July 30 and 31, 2012[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 167-174.
- [24] DOBSON I. Estimating the propagation and extent of cascading line outages from utility data with a branching process[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2146-2155.
- [25] 田柳, 狄增如, 姚虹. 权重分布对加权网络效率的影响[J]. 物理学报, 2011, 60(2): 307-351.
- TIAN Liu, DI Zengru, YAO Hong. Effect of distribution of weight on the efficiency of weighted networks[J]. Acta Phys Sin, 2011, 60(2): 307-351.
- [26] 刘天琪. 现代电力系统分析理论与方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 114-119.
- [27] 李钊, 郭燕慧, 徐国爱, 等. 复杂网络中带有应急恢复机理的级联动力学分析[J]. 物理学报, 2014, 63(15): 1-12.
- LI Zhao, GUO Yanhui, XU Guoai, et al. Analysis of cascading dynamics in complex networks with an emergency recovery mechanism[J]. Acta Phys Sin, 2014, 63(15): 1-12.
- [28] 沈晓凡, 舒治淮, 刘宇, 等. 2009年国家电网公司继电保护装置运行统计与分析[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 189-193.
- SHEN Xiaofan, SHU Zhihui, LIU Yu, et al. Statistics and analysis on operation situation of protective relaying of state grid corporation of China in 2009[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 189-193.
- [29] NEWMAN D E, NKEI B, CARRERAS B A, et al. Risk assessment in complex interacting infrastructure systems[C]//Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Hawaii, USA: IEEE, 2005: 1-10.
- [30] 马超, 肖先勇, 李长松, 等. 电网连锁故障识别和风险评估基本框架与模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 99-105.
- MA Chao, XIAO Xianyong, LI Changsong, et al. Basic framework and model of identification and risk assessment of power grid cascading failures[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 99-105.

作者简介:

金 波(1989—),男,重庆人,硕士研究生,研究方向为电力系统安全稳定分析(E-mail:scujb1989@126.com);

肖先勇(1968—),男,四川宜宾人,教授,博士研究生导师,博士,从事不确定性理论在电力系统中的应用、电能质量、智能电网等方面的教学和科研工作(E-mail:xiaoxianyong@163.com);



金 波

李长松(1973—),男,四川成都人,讲师,博士,研究方向为电力系统稳定与分析、PMU 技术及其应用、智能供配电技术(E-mail:lcs21c@163.com)。

Analysis of cascading failure evolution based on interaction between primary and secondary systems

JIN Bo,XIAO Xianyong,LI Changsong

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

Abstract: A method based on the interaction between the primary and secondary systems of power grid is introduced for analyzing the mechanism of cascading failure evolution. The concept of interaction is based on the physical mutual impact between the primary and secondary systems and its function during the evolution of cascading failure is analyzed. A concept of protection trip severity is applied to characterize this interaction and a variable weight model of primary system is established. A weighted topology model based on the interaction is built and the network efficiency index is adopted to analyze the mechanism of cascading failure evolution. Simulative results show that,power system becomes more vulnerable under this interaction;the bigger the operating capacity coefficient is,the greater the cascading failure impacts on network efficiency;the bigger the operating limit coefficient is,the stronger the robustness of power grid against cascading failure becomes.

Key words: complex network theory; interaction; cascading failure; variable weighted model; network efficiency

(上接第 168 页 continued from page 168)

Grounding grid fault diagnosis based on node tearing and chemical reaction optimization algorithm

ZHOU Bin¹,PENG Minfang¹,HUANG Qingxiu¹,JING Jing¹,SHEN Meie²

(1. College of Electrical and Information Engineering,Hunan University,Changsha 410082,China;

2. College of Computer Science,Beijing Information Science & Technology,Beijing 100101,China)

Abstract: With the combination of electric network theory,virtual molecular theory and chemical reaction optimization algorithm,a method of grounding grid fault diagnosis based on the node tearing and chemical reaction optimization algorithm is proposed to improve the diagnosis accuracy. The grounding grid is torn up into several sub-grids and independent branches according to its topology and a fault diagnosis model with multi-objective optimization is established. The Logistic mapping is integrated into the chemical reaction optimization algorithm,which is applied to solve the established fault diagnosis model. Simulative results show that the proposed method has high accuracy of grounding grid fault diagnosis.

Key words: grounding grid; fault diagnosis; chemical reaction optimization algorithm; note tearing; Logistic mapping