

DOI: 10.7667/PSPC151066

考虑保护失效和电网动态平衡特性的连锁故障风险评估

金波¹, 肖先勇¹, 陈晶², 李长松¹, 张殷¹

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 云南电力科学研究院, 云南 昆明 650051)

摘要: 保护失效特性严重威胁了电网安全。同时, 现代电网受扰动后可调整线路参数, 以减缓故障蔓延, 具有典型的动态平衡特性。基于复杂网络理论提出了考虑保护失效特性和动态平衡特性的连锁故障风险评估方法。首先, 基于隐性故障, 定义了保护失效严重度概念, 可度量保护对电网安全的影响程度。其次, 结合保护失效严重度, 建立了变权重模型, 以表征电网故障后动态平衡特性。然后, 引入风险理论, 从复杂网络理论角度评估电网安全风险, 以为实际运行提供指导意义。最后, 新英格兰 39 节点算例系统验证了所提方法的有效性和合理性。

关键词: 电网; 连锁故障; 动态平衡特性; 复杂网络理论; 保护失效严重度; 风险评估

A method of risk assessment considering protection failures and dynamic equilibrium of power grid

JIN Bo¹, XIAO Xianyong¹, CHEN Jing², LI Changsong¹, ZHANG Yin¹

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Yunnan Electric Power Research Institute, Kunming 650051, China)

Abstract: Protection failures have serious threat to power grid security. It is a typical dynamic equilibrium characteristic when line parameters are revised to mitigate cascading failures after the fault occurs. Based on complex network theory a method of risk assessment, considering protection failures and power grid dynamic equilibrium characteristics, is proposed. Firstly, this paper defines a concept of protection failure severity, measuring the impact of protection failure on power grid security, based on hidden failures. Secondly, a variable weighted model, combined with protection failure severity, is established to characterize the dynamic of power grid. Then, risk theory is introduced to assess power grid security from the point of complex network theory. Finally, the New England 39-bus system is taken as an example and the validity of proposed method is verified.

Key words: power grid; cascading failures; dynamic equilibrium characteristic; complex network theory; protection failure severity; risk assessment

0 引言

电网安全事故多由连锁故障诱发^[1-4], 保护失效又在其中起到了推波助澜的作用^[5-6]; 同时, 连锁故障发生后电网可通过相应装置调整线路参数, 以减缓故障蔓延, 具有动态平衡特性^[7]。复杂网络理论可从全局角度分析连锁故障与电网安全间关系^[8], 正受到国内外广泛关注^[7-9]。因此, 基于复杂网络理论, 建立考虑保护失效特性和动态平衡特性的电网安全分析方法具有重大意义。

目前, 复杂网络理论主要研究网络中边或节点度、权重等微观性质与网络效率、稳定性等宏观性质之间的关系, 并通过故障仿真研究连锁故障与电网安全间映射关系^[8]。文献[10]提出有效性能指标,

从局部和全局角度分析“信息”交换的效率, 以此分析小世界网络^[11]上的连锁故障传播特性; 文献[12]引入节点容量, 以最大连通性描述故障后果严重度, 探索了连锁故障对电网安全的影响; 文献[13]基于文献[11-12]提出网络流动态分配模型, 以表征故障后动态特性。以上研究均基于无权、无向网络, 能较好揭示连锁故障与电网安全间关系, 不足在于忽略了电网电气特性。

针对以上不足, 文献[7]引入线路电抗修改原则, 模拟了电网故障后的动态平衡特性, 从而评估了小世界网络脆弱性; 文献[9]提出相邻连接线路概念, 建立了有向复杂网络连锁故障模型, 并用于分析电网安全; 文献[14]基于线路电抗加权拓扑模型, 对电网脆弱性进行了评估。以上研究从有权有向角

度将电气特性融入连锁故障内在机理揭示、分析中,但未考虑保护失效特性的影响。对此,文献[15]引入保护脆弱度概念,用于评估保护不正确特性对电网脆弱性的影响。但现有基于复杂网络理论的研究主要集中于电网脆弱性评估,较少定量评估连锁故障引发的电网安全风险;同时,大部分研究^[14-15]中权重为恒定值,难以较好反映连锁故障传播过程中的电网动态平衡特性。

针对以上分析,本文基于复杂网络理论,提出了综合考虑保护失效和电网动态平衡特性的连锁故障风险评估方法。1) 基于保护失效对电网安全的影响,定义了保护失效严重程度概念;2) 结合保护失效严重程度,并从故障后线路参数改变角度建立了变权重模型,以模拟一、二次系统综合特性下电网受扰动后的动态平衡特性;3) 基于风险理论,并考虑线路故障特性,从复杂网络理论角度评估了电网安全。算例系统验证了所提方法的正确性,并指出适当提高线路运行极限参数,可提高电网鲁棒性。

1 变权重模型

1.1 保护失效特性

继电保护作为电力系统第一道防线^[16],其动作特性与电网安全密切相关。大停电事故表明,近75%事故与保护失效有关^[5],而保护失效多由隐性故障引起^[17]。因此,考虑继电保护隐性故障特性成为分析电网安全的另一重要环节。

1.1.1 事件树

大停电事故主要由连锁故障引起^[1-4],保护隐性故障^[6]在连锁故障过程中起到了推波助澜作用^[17],事件树能较清晰描述考虑隐性故障的连锁故障过程。某线路被切除后,与该条线路两端相连的线路的保护误动率增加,对应的线路被称为暴露线路^[6],本文简称为暴露集,表征了可能的隐性故障位置,并可据此选取下一层故障。图1为事件树示意图,方框中数字代表一事件。

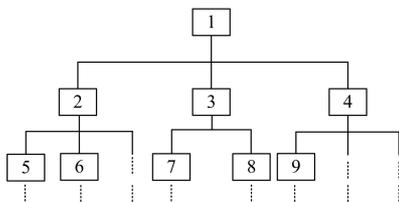


图1 事件树

Fig. 1 Event-tree

事件1为初始事件,其暴露集为2、3、4,之后以此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,得事件1引发的连锁故

障,可详细分析保护连锁跳闸过程。

1.1.2 保护失效严重程度

大停电分析表明^[18]: 1) 停电事故会造成不同程度的负荷损失;2) 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;3) 电网最终结束于系统失稳,如电压崩溃等。因此,以负荷损失、有功功率波动和电压波动量化保护失效对电网的影响^[15]。

1) 假设保护连锁跳闸 j 造成的负荷损失为 P_{loss} ,则引起的负荷损失后果严重程度($S_{\text{Ploss}}(j)$)为

$$S_{\text{Ploss}}(j) = \frac{P_{\text{loss}}}{P_{\text{total}}} \quad (1)$$

式中, P_{total} 为所有负荷。

2) 假设电网中有 n 条线路,线路 i 在保护连锁跳闸 j 后的有功功率为 $P'(i,j)$,保护连锁跳闸 j 前的有功功率为 $P(i,j)$,则引起有功功率波动的后果严重程度($S_p(j)$)为

$$S_p(j) = \begin{cases} \sum_i^n \frac{P'(i,j) - P(i,j)}{P(i,j)} & \text{if } P'(i,j) > P(i,j) \\ 0 & \text{if } P'(i,j) \leq P(i,j) \end{cases} \quad (2)$$

3) 假设电网中有 m 个节点,节点 i 在保护连锁跳闸 j 后的电压为 $U(i,j)$ (标么值),则引起电压波动的后果严重程度($S_U(j)$)为

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

综合以上后果严重程度得保护连锁跳闸 j 后果严重程度($S(j)$)为

$$S(j) = a_1 \cdot S_{\text{Ploss}}(j) + a_2 \cdot S_p(j) + a_3 \cdot S_U(j) \quad (4)$$

式中, a_1, a_2, a_3 为权重系数,且 $a_1 + a_2 + a_3 = 1$ 。权重系数选取与电网特殊要求和研究侧重点有关^[5],可通过遗传算法、人工神经网络算法、层次分析法等不同方法得到反映实际需求的权重系数。

因此基于事件树和以上后果严重程度定义保护 k 的失效严重程度($S_{\text{pr}}(k)$) (protection failure severity, PFS)为

$$S_{\text{pr}}(k) = \sum_{j \in \text{set}} S(j) \quad (5)$$

式中, set 为包含保护 k 的保护连锁跳闸集合。

PFS可度量具有局部特性的保护失效对具有全局特性的电网安全的影响程度,可描述其在连锁故障传播过程中的推动作用,其值越大,则此作用越大。

1.2 电网动态平衡特性

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^[19];权重的改变,可调整网络结构和功能^[19]。实际电网故障

后可通过相应装置调整线路参数,以减缓故障蔓延;同时,保护动作后可改变潮流分布等系统运行参量。以上特征可用变化的权重特性表征。

实际系统中线路跳闸与否多由一、二次系统共同决定。因此,其权重应反映一、二次系统综合特性。故,提出如下综合权重模型。本文定义一、二次系统分别对应的权重为一次系统权重和保护系统权重。本文的二次系统主要考虑继电保护系统。

实际线路跳闸后,其负载被转移到其他线路上,进而造成连锁反应,并最终影响电网结构和电能传输。基于该物理过程,引入线路运行容量和运行极限参数^[9]。本文所提电网动态平衡特性与暂态稳定和动态稳定存在差异,且定义为:电网为减缓故障蔓延,通过相应装置调整线路参数,以保证电网安全、稳定运行。其物理过程表现为:故障蔓延过程中,相应装置根据线路运行容量和运行极限调整线路参数,改变最短路径的方向,从而调节线路负载,减轻重负载对线路造成的压力,以减缓故障的进一步蔓延。

定义线路结构负荷为相应拓扑结构下最短路径经过该线路的次数^[13,20],本文简称为负荷,该负荷虽不能完全与实际系统中的负荷分布对应,但可在一定程度上反映系统潮流在电网中的分布情况,因而具有实际参考价值^[7]。

初始拓扑结构下各线路的负荷作为初始负荷。由此,引入线路 i 的运行容量^[7] $(L(i))$ 和运行极限^[7] $(L_{lim}(i))$ 。

$$L(i) = b_1 \cdot L_{load}(i, 0) \quad (6)$$

$$L_{lim}(i) = b_2 \cdot L_{load}(i, 0) \quad (7)$$

式中: $L_{load}(i, 0)$ 为线路 i 的初始负荷; b_1, b_2 分别为运行容量系数和运行极限系数。

为刻画电网故障后的动态平衡特性,将线路电抗值作为一次系统权重初始值^[14],并提出一次系统变权重原则,如式(8)。

$$r(i, t+1) = \begin{cases} r(i, t) & L_{load}(i, t+1) \leq L(i) \\ r(i, t) \cdot \frac{L_{load}(i, t+1)}{L(i)} & L(i) < L_{load}(i, t+1) < L_{lim}(i) \\ \infty & L_{load}(i, t+1) \geq L_{lim}(i) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $r(i, t+1), r(i, t)$ 分别为系统故障后和故障前线路 i 对应的一次系统权重; $L_{load}(i, t+1)$ 为系统故障后线路 i 的负荷。

式(8)物理意义:当线路负荷不大于运行容量时,线路参数不变;当负荷不小于运行极限时,则线路退出运行,以模拟线路因过负载而开断运行;

当介于两者中间时,则按一定比例调整线路参数。式(8)可表征线路参数变化特性,从而模拟系统故障后的动态平衡过程;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,即系统抵御连锁故障的鲁棒性减弱;反之则鲁棒性增强。

PFS 可描述保护系统在连锁故障传播过程中的作用,故保护系统权重可由 PFS 描述。由此提出如下线路综合变权重模型。

$$w(i, t+1) = r(i, t+1) \cdot \frac{1}{S'_{pr}(i)} \quad (9)$$

式中: $w(i, t+1)$ 为系统故障后对应拓扑模型下线路 i 的权值; $S'_{pr}(i)$ 为线路 i 对应保护的 PFS。式(9)物理意义为: PFS 值可改变线路权重的分布,符合保护动作后改变系统运行状态的特性;可描述一、二次系统综合特性下的动态平衡过程。其值越小,则更多最短路径经过该线路,因此在能量传输和故障演变中起着越重要作用。

2 连锁故障的风险评估

电网安全具有全局特性^[21],而复杂网络理论可从系统角度揭示复杂网络固有特性^[8],因此考虑复杂网络理论的电网安全分析具有可行性,可将第 1 节所建模型用来评估电网安全风险。

2.1 风险理论

风险指事件发生概率与其造成后果的乘积^[22],综合考虑事件发生可能性及其后果,可反映元件故障、负荷波动等因素的影响程度。其一般表达式为

$$R = P \cdot S \quad (10)$$

式中: R 为事件造成的风险; P 为事件发生概率; S 为事件导致的后果严重度。

2.2 风险评估方法

2.2.1 事件概率

元件过负荷及保护不正确动作特性在故障演化过程中起着重要作用^[23]。因此,考虑过负荷和保护隐性故障并存因素,提出式(11)基于拓扑的线路故障概率模型。文献[24]所提模型是基于线路潮流负载,而本文定义的结构负荷可一定程度反映线路负载,因此式(11)模型具有一定合理性。

$$P_L(i) = \begin{cases} P_H & L_{load}(i) \leq L(i) \\ \frac{(1 - P_H) \cdot (L_{load}(i) - L(i))}{L_{lim}(i) - L(i)} + P_H & L(i) < L_{load}(i) < L_{lim}(i) \\ 1 & L_{lim}(i) \leq L_{load}(i) \end{cases} \quad (11)$$

式中： $P_L(i)$ 为线路 i 的故障概率； $L_{load}(i)$ 为当前拓扑下线路 i 的结构负荷； P_H 为保护不正确动作概率。该模型物理意义为：当线路 i 结构负荷小于 $L(i)$ 时其故障概率为 P_H ；当线路 i 结构负荷大于 $L_{lim}(i)$ 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。

连锁故障多由一系列元件连锁跳闸引起，并最终演变为大停电事故^[22]。故连锁故障序列(*Cas*)可表示为

$$Cas = \{t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_n\} \quad (12)$$

式中： $t_j(j=1, 2, \dots, n)$ 为故障传播至第 j 阶段时状态； n 为连锁故障阶段数。

假设状态 t_j 时暴露集数为 k ，则 t_j 状态时故障概率(P_{t_j})为

$$P_{t_j} = \prod_{i=1}^m P_{ij} \prod_{i=m+1}^k (1 - P_{ij}) \quad (13)$$

式中： m 为暴露集中故障线路数； P_{ij} 为 t_j 状态下暴露集第 i 条线路故障概率，其值可由图 2 模型求得。由此可得连锁故障序列发生概率(P)为

$$P = \prod_{j=1}^n P_{t_j} \quad (14)$$

2.2.2 事件后果严重度

网络效率指标^[10](E)可有效度量网络间“信息”交换情况^[10]，电力系统中则可表示各节点间能量传输状况，此指标具有全局特性。其表达式为

$$E = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d_{ij}} \quad (15)$$

式中： G 为构成的拓扑模型； n 为节点数； d_{ij} 为节点 i, j 间最短路径的权重和，其值可根据 1.2 节求取。可知正常运行状态下 E 为一较大值，随着系统状况恶化 E 值变小，其值可反映运行状态偏离正常状态的程度，从而表征电网安全运行水平。则连锁事件的后果严重度(S)为

$$S = \frac{E_0 - E_1}{E_0} \quad (16)$$

式中， E_0, E_1 分别为连锁故障前后的网络效率值。

将式(14)、式(16)代入式(10)中即可得拓扑模型下的电网风险值，由此评估电网安全运行状况。

本文计算流程见图 2。

3 算例分析

本文以新英格兰 10 机 39 节点系统为例验证所提方法，其结构如图 3。其中 $b_1=1.1, b_2=1.5$ ^[7]，

$P_H=0.0015$ ^[17]。

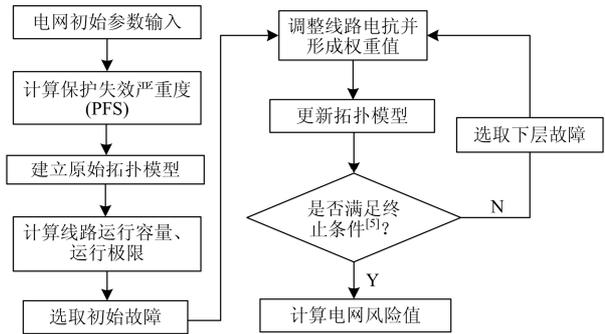


图 2 本文计算流程图

Fig. 2 Flow chart for this paper

3.1 系统风险分析

图 4 给出了各保护的 PFS 归一化值，较大值对应的保护主要集中于重要输送通道。

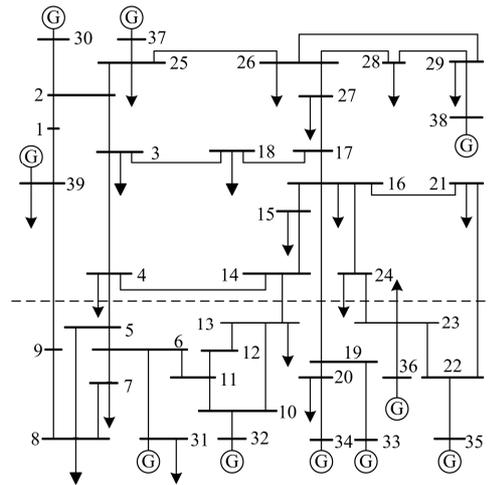


图 3 新英格兰 39 节点系统

Fig. 3 New England 39-bus system

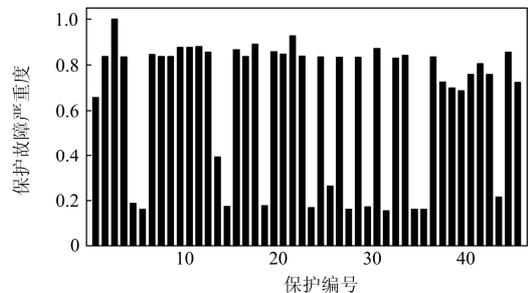


图 4 保护失效严重度

Fig. 4 Protection failure severity of protections

按本文 1.2 节方法，得出初始状态下各线路结构负荷分布图，见图 5。据此所得关键线路主要为重要送出和传输线路，排序所得结果与文献[14]相

近, 说明了本文所提方法的可行性。

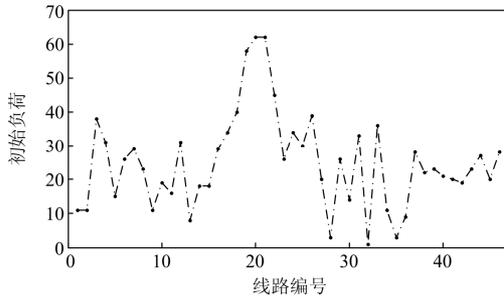


图 5 初始负荷分布图

Fig. 5 Distribution of initial load

表 1 风险计算结果

Table 1 Risk ranking of different lines

序列	线路编号	风险值/ 10^{-3}	序列	线路编号	风险值/ 10^{-3}
1	18	6.782	8	22	2.897
2	7	6.761	9	16	2.620
3	12	6.703	10	17	2.616
4	21	4.994	11	14	1.884
5	11	4.866	12	9	1.829
6	3	6.698	13	13	1.822
7	20	4.220	14	46	1.462

各线路造成的风险结果见表 1, 由于篇幅有限, 仅列出风险值前 14 位的线路。风险值较大线路主要呈三类特点: 1) 集中于图 3 虚线侧下方系统, 该系统中各节点联系紧密, 一旦某线路故障则会对系统安全、稳定造成重要影响。如线路 12 断线, 则会抑制发电机 31、32 向外送电; 若线路 22 对应的保护误动作, 则发电机 33、34 成为孤岛, 严重影响电网安全。2) 处于重要的外送通道。虚线下方系统负荷约占 30%, 出力却占 60%, 线路 18 成为重要外送线路, 一旦该线路断线, 会造成上方系统严重缺额。3) 处于重要联络通道。如线路 21 为负荷供电通道的“枢纽”, 一旦断线, 将影响约 23%的负荷。所得结果符合实际情形, 说明了本文所提方法的正确性。

为进一步说明本文的有效性, 表 2 比较了不同情形下的风险排序, 由于篇幅有限, 仅列出前 10 位线路。情况 1 未考虑电网故障后线路参数可变的特性; 情况 2 未考虑保护失效影响的情形。

由表 2 比较、分析可知, 情形 1 关键线路辨识度较差, 如线路 16-21 并非重要联络、外送通道, 与实际差距较大。其对电网安全风险影响最大的原因: 1) 断线后形成的暴露集对应的初始负荷和 PFS 都很大; 2) 未考虑权重变化, 即故障后减缓故障蔓

延的能力较弱。

表 2 不同情形下风险排序对比

Table 2 Risk ranking under different situations

序列	本文	情况 1	情况 2
1	13-14	16-21	16-17
2	4-5	16-19	17-18
3	6-11	4-5	15-16
4	16-17	13-14	3-4
5	6-7	21-22	4-5
6	2-3	2-25	14-15
7	15-16	16-24	13-14
8	16-19	6-11	3-18
9	10-11	19-20	6-11
10	10-13	8-9	5-8

情形 2 虽能较好辨识关键线路, 但主要为初始负荷值较大线路。线路 13-14 一旦断线则会造成电网电压、频率、潮流大幅度波动, 因此其对系统安全影响尤为明显。而出现线路 13-14 排序较差原因在于未考虑保护失效在演化过程中的作用。

3.2 线路运行系数与电网风险间关系

为验证本文对实际系统的指导意义, 探讨了运行系数与电网安全风险间的关系。

图 6 给出当 $b_2=1.5$ 时运行容量系数 b_1 与电网安全风险间的关系。由图可知, 随着运行容量系数增大, 电网安全风险也逐渐增大到某值。原因在于: 运行容量与运行极限越来越接近, 在缓解系统故障造成“压力”时的能力也减小, 因此出现风险值增大现象。最后平稳于某值主要因为: 当 b_2 固定时, b_1 大于 1.4 时由式(8)可知此时权重变化小, 使得系统中负荷变化小, 则连锁故障发生概率变化也小, 因此对系统造成的风险趋于某值。

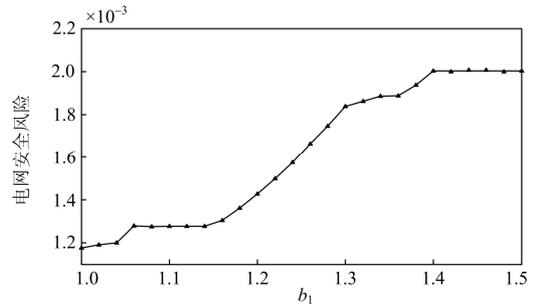


图 6 运行容量系数与电网安全风险的关系

Fig. 6 Relationship between operational capacity factor and power grid's security risk

图 7 给出当 $b_1=1.1$ 时运行极限系数 b_2 与电网安全风险间关系。可见, 随着运行极限系数增大, 电

网安全风险逐渐减小到某值。原因在于：运行极限系数越大，则减缓系统故障蔓延的能力越强，同时承受过负荷能力也增强，因此表现为电网安全风险减少的现象。最后平稳于某值主要因为： b_2 较大时，电网抵御连锁故障的鲁棒性强，因而极好减缓了故障的进一步蔓延，使得其对电网造成的后果严重程度差异较小；甚至可抑制连锁性事件的形成，即连锁故障发生概率小；因此使得连锁故障对系统造成的风险值较小且趋于某值。

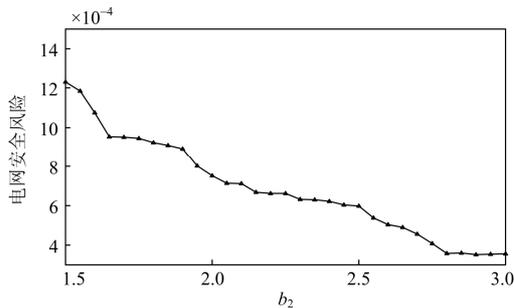


图7 运行极限系数与电网安全风险的关系

Fig. 7 Relationship between operational limit factor and power grid's security risk

4 结论

本文基于复杂网络理论，提出了考虑保护失效特性和电网动态平衡特性的风险评估方法，主要结论如下。

(1) 提出了保护失效严重度(PFS)概念，表征了具有局部特性的保护失效与具有全局特性的电网安全间的度量，可描述其在连锁故障演化过程中的作用。

(2) 一次系统变权重原则可模拟电网故障后的动态平衡过程；综合变权重模型则表征了保护系统与一次系统综合特性下连锁故障传播、演化过程中的电网动态平衡特性。

(3) 新英格兰 39 节点算例系统所得风险值较高线路主要呈三类特点，符合实际特性，并比较了三种情形下的风险排序，验证了所提方法的正确性。

(4) 适当增大运行极限系数能有效提高电网减缓故障蔓延的能力，即可提升电网鲁棒性。

本文主要从线路参数改变角度评估电网风险，如何更加全面结合电力系统特性进行分析是下一步研究重点。

参考文献

[1] 胡文平, 于腾凯, 巫伟南. 一种基于云预测模型的电网综合风险评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015,

43(5): 35-42.

HU Wenping, YU Teng kai, WU Weinan. A comprehensive power grid risk assessment method based on cloud prediction model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 35-42.

[2] 李明, 郭志红, 韩学山, 等. 计及输电元件实时运行态势的电网运行风险决策[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 88-93.

LI Ming, GUO Zhihong, HAN Xueshan, et al. Power grid risk-based decision-making considering real-time operation situation of transmission component[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 88-93.

[3] 李博通, 李永丽, 姚创, 等. 继电保护系统隐性故障研究综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(7): 34-39.

LI Botong, LI Yongli, YAO Chuang, et al. Overview of research on hidden failures in protection system[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2014, 26(7): 34-39.

[4] 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.

[5] 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.

[6] PHADKE A G, THORP J S. Expose hidden failures to prevent cascading outages in power systems[J]. IEEE Computer Application in Power, 1996, 9(3): 20-23.

[7] 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.

[8] 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.

[9] FANG Xinli, YANG Qiang, YAN Wenjun. Modeling and analysis of cascading failures in directed complex networks[J]. Safety Science, 2014, 65: 1-9.

[10] LATORA V, MARCHIORI M. Efficient behavior of small world networks[J]. Physical Review Letter, 2001, 87(19): 1-4.

[11] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamic of

- 'small-world' networks[J]. *Nature*, 1998, (393): 40-442.
- [12] ADILSON E M, LAI Yingcheng. Cascade-based attacks on complex networks[J]. *Physical Review E*, 2002, 66(2): 1-4
- [13] CRUCITTI P, LATORA V, MARCHIORI M. Model for cascading failures in complex networks[J]. *Physical Review E*, 2004, 69: 1-4.
- [14] 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.
- [15] 张海翔, 吕飞鹏. 基于保护脆弱度加权拓扑模型下的电网脆弱性评估[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(4): 613-619.
ZHANG Haixiang, LÜ Feipeng. The vulnerability evaluation model of power grid based on the protection-vulnerability-weighted topological model[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(4): 613-619.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 刘友波, 胥威汀, 丁理杰, 等. 电力系统连锁故障分析理论与应用(二)——关键特征与研究启示[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(10): 146-155.
LIU Youbo, XU Weiting, DING Lijie, et al. Power system cascading failure analysis theories and application II — key features of real cascading failures and revelation aspects[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(10): 146-155.
- [19] 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): 797-802.
TIAN Liu, DI Zengru, YAO Hong. Effect of distribution of weight on the efficiency of weighted networks[J]. *Acta Phys Sin*, 2011, 60(2): 797-802.
- [20] CRUCITTI P, LATORA V, MARCHIORI M. A topological analysis of the Italian electric power grid[J]. *Physical A*, 2004, 338(1): 92-97.
- [21] WANG Hongye, THORP J S. Optimal locations for protection system enhancement: a simulation of cascading outages[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2001, 16(4): 528-533.
- [22] 张毅明, 张忠会, 姚峰, 等. 基于风险理论的电力系统元件风险评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(23): 73-78.
ZHANG Yiming, ZHANG Zhonghui, YAO Feng, et al. Risk assessment of power system components based on the risk theory[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(23): 73-78.
- [23] YAN Jun, HE Haibo, SUN Yan. Integrated security analysis on cascading failure in complex networks[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2014, 9(3): 451-463.
- [24] CHEN J, THORP J S, DOBSON I. Cascading dynamics and mitigation assessment in power system disturbances via a hidden failure model[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2005, 27(4): 318-326.

收稿日期: 2015-06-25; 修回日期: 2015-09-08

作者简介:

金波(1989-), 男, 通信作者, 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, 博士, 教授, 博士生导师, 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

陈晶(1968-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化。

(编辑 周金梅)