

基于潮流熵测度的连锁故障脆弱线路评估 及其在四川主干电网中的应用

李 勇¹, 刘俊勇¹, 刘晓宇¹, 蒋 乐², 胥威汀¹

(1. 四川大学 电气信息学院 四川省智能电网重点实验室, 四川 成都 610065;

2. 四川省电力公司, 四川 成都 610061)

摘要: 运用熵的基本原理, 结合电网扰动下线路潮流转移和分布特性, 提出线路潮流转移熵和线路潮流分布熵的概念。针对不同运行状态下电网脆弱环节的转移特点和过负荷与故障断线扰动下线路潮流熵的变化特点, 考虑电网实时运行风险, 提出基于潮流熵的脆弱评估模型。IEEE 30 节点系统仿真结果验证了所提方法的可靠性和全面性。丰大和枯大方式下四川主干网应用表明, 潮流分布熵越大、潮流转移熵越小的线路过负荷冲击脆弱度越大; 潮流负载较重、运行故障率高、潮流转移熵较小的线路故障断线风险脆弱度高; 丰大、枯大期电网的脆弱环节发生转移; 基于潮流熵的电网综合脆弱线路与电网实际薄弱环节相吻合。

关键词: 电力系统; 脆弱性; 连锁故障; 潮流分布熵; 潮流转移熵; 模型

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.10.007

0 引言

大停电事故通常表现为连锁故障, 往往是由于系统中过负荷、元件切除、故障跳闸等造成的潮流转移, 进一步造成一系列线路和电源的连锁跳闸而形成的^[1-3]。电力系统是一个时变的复杂非线性动态系统, 不同的运行状态下, 线路对连锁故障的传播影响也不尽相同, 如何实时辨识在连锁故障的传播过程中起着推波助澜作用的脆弱线路, 对提高电力系统的可靠性、降低大规模停电事故的发生概率有十分重要的意义^[4-5]。

脆弱性评估问题作为预防连锁故障的首要问题, 近年来大量研究围绕诱发大停电蔓延的脆弱线路^[6]。复杂网络理论为电力系统脆弱性研究开辟了一个新的方向, 文献[6-8]使用基于最短路径节点和支路的介数来衡量元件的关键性, 并以此来分析电网连锁故障的发展过程; 文献[9-10]研究了不同攻击方式下电网的连通性传输能力等, 得出攻击高介数节点或支路对电网的冲击最大。文献[11]将线路可靠性作为权重结合复杂网络理论对电网脆弱度进行评估, 仅考虑了电网拓扑结构和线路长期统计平均故障率。以上基于复杂网络的结构分析法, 虽然其拓扑建模技术与评估指标在电网结构脆弱性辨识方面具有明显优势, 分析结果可用于指导电力系统规划, 但由于该方法没有考虑电网的运行特性和潮流约

束, 分析结果无法反映当前电力系统运行状态下的脆弱线路和连锁故障风险。文献[12]从不同负载率区间下的线路条数来定义支路的潮流熵, 从系统潮流熵值的角度解释了线路潮流分布的高度不均衡容易导致系统进入自组织临界状态发生连锁故障, 但是未能说明系统中各元件对连锁故障传播的影响。文献[13]从熵的基本原理出发, 结合过负荷与断线扰动下潮流的分布特性, 提出了基于潮流熵的脆弱元件评估模型, 在判别在连锁故障中起到关键传播作用的脆弱线路上效果明显。

本文从连锁故障起因和传播过程出发, 针对不同运行状态, 从过负荷与故障断线扰动下潮流分布的聚集性和均匀角度, 提出一种基于潮流熵测度的电网脆弱线路评估方法。然后以过负荷扰动下线路潮流分布熵与潮流转移熵的比值大小来评估线路过负荷脆弱度, 以断线潮流转移的分布聚集特性结合线路运行可靠性理论和风险评估理论对故障断线风险脆弱度进行评估, 进一步综合考虑两者建立了基于潮流熵的线路综合脆弱评估模型。以四川电网为研究对象, 由于四川电网水电比重大, 丰枯期运行方式大不相同, 通过对 2011 年丰大和枯大 2 种典型运行方式下四川电网 500 kV 主干网的模拟计算和比较, 发现丰大和枯大方式下, 线路的脆弱度不同, 丰大方式下系统的整体脆弱度要高, 与四川电网实际脆弱环节相吻合, 证明了本文方法的正确性和合理性。

1 潮流熵理论

1.1 电力系统的熵平衡

熵反映了一种自然界现象有序程度演化的规律, 是应用范围非常广泛的一门科学理论, 熵不仅是一个

收稿日期: 2012-10-08; 修回日期: 2013-08-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50977059); 四川省产业发展重大技术项目(2011GZ0225)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50977059) and the Key Project of Sichuan Provincial Industrial Development(2011GZ0225)

物理学概念,而且是个数学函数,更是一种自然法则。熵广泛应用于系统的不确定性、稳定程度的描述^[14-15]。物理学中熵用来描述系统内部分子运动混乱程度的度量,信息熵用来描述离散系统的信息不确定度,信息熵是判断系统所处状态确定性的一种概率描述,当系统处于唯一状态时,系统的有序度最高,系统的熵最小为 0,当系统处于多种状态且等概率出现时,系统有序度最低,系统的熵最大^[12]。对于一个广义的复杂系统而言,熵可作为分布状态的混乱性和无序性的度量。由于其独特的内涵和渗透力,熵被广泛应用于复杂系统的无序度量中^[13-15]。

系统内部能量的分布越均匀系统越稳定。当电力系统处在平衡态时系统能量分布有序、确定(均匀分布),系统的能量熵值最大;理想情况下,各元件平均分摊系统总能量,系统的能量熵最大为 $\ln M$ (M 为系统元件总数),系统最稳定。扰动是对系统的一种能量冲击,当系统受到外界的扰动冲击,即给系统增加了不确定性,注入了能量负熵;由于电力系统本身的自组织特性,还有系统外部对其施加的控制、继保等约束条件,面对外界冲击具有一定的自我调节能力,此时会消除扰动的影响,相当于给系统注入能量正熵;当外部约束能够消除能量冲击聚集的能量负熵时,系统进入了一个新的平衡状态;当聚集的能量冲击超过外部约束条件的调控能力时(外界约束提供的能量正熵不足以平衡冲击引起的能量负熵),系统趋于崩溃^[13]。

1.2 线路潮流分布熵

系统有 N 种正常运行状态 $\Phi_n (n=1, \dots, N)$, Φ_n 记作系统处于运行状态 n 。系统在正常工况运行状态 m 下,线路 i 的潮流 P_{i0}^m 作为该状态下的初始基态潮流;当节点 a 负荷单位增加即系统受到单位扰动冲击工况下,线路 i 潮流为 P_{ia}^m 。系统在运行状态 m 下,节点 a 受到扰动后过线路引起的潮流增量为:

$$\Delta E_{ia}^m = P_{ia}^m - P_{i0}^m \quad (1)$$

将 ΔE_{ia}^m 定义为系统在状态 m 下节点 a 对线路 i 的潮流冲击,则节点 a 对系统的潮流冲击为:

$$\Delta E_a^m = \sum_{i=1}^L (P_{ia}^m - P_{i0}^m) \quad (2)$$

其中, L 为系统的总线路数。

状态 m 下,线路 i 所承担节点 a 对系统潮流冲击的比例用线路 i 的潮流冲击率 η_{ia}^m 来表示:

$$\eta_{ia}^m = \frac{\Delta E_{ia}^m}{\Delta E_a^m} \quad (3)$$

结合式(1)—(3)定义状态 m 下节点 a 的负荷扰动在线路 i 的潮流分布熵为:

$$H_{Di}^m(a) = -\eta_{ia}^m \ln \eta_{ia}^m \quad (4)$$

“发电机-负荷”节点对的负荷扰动在线路 i 的

潮流分布熵为:

$$H_{Di}^m(g, d) = H_{Di}^m(g) - H_{Di}^m(d) = \eta_{id}^m \ln \eta_{id}^m - \eta_{ig}^m \ln \eta_{ig}^m \quad (5)$$

其中, g 为发电机节点, d 为负荷节点, η_{id}^m 和 η_{ig}^m 分别为状态 m 下负荷节点和发电机节点单位负荷扰动下线路 i 的潮流冲击率。

由负荷波动的随机性,线路受到的潮流冲击分为全局冲击和局部冲击。全局冲击为线路受到的来自每一组“发电机-负荷”节点对间负荷波动引起的潮流冲击在该线路的叠加,局部冲击为线路受到的来自“发电机-负荷”节点对间负荷波动引起的最大冲击,因此,计及所有“发电机-负荷”影响下处于运行状态 m 时线路 i 的潮流分布熵为:

$$H_{Di}^m = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{N_G N_F} \sum_{g \in G} \sum_{d \in L} [H_{Di}^m(g, d) + \max(H_{Di}^m(g, d))] \right\} \quad (6)$$

其中, N_G 、 N_F 分别为发电机节点与负荷节点数目; G 为发电机节点集合, F 为负荷节点集合; H_{Di}^m 表示单位过负荷下线路 i 受到能量冲击的度量, H_{Di}^m 越大,线路 i 的过负荷能量冲击越大,线路 i 越容易过负荷越限。

1.3 线路潮流转移熵

线路受到过负荷冲击过载和故障等原因引起线路切除后,系统为维持输电平衡,发生潮流转移,对系统剩余线路发生连锁故障产生影响。断开线路的转移潮流在剩余线路的分布聚集程度衡量系统所受线路转移潮流冲击的大小。

在运行状态 m 下,当电网中线路 i 断开时线路 k 分担线路 i 转移的潮流为:

$$\Delta \alpha_{ki}^m = P_{ki}^m - P_{k0}^m \quad (7)$$

其中, P_{k0}^m 为运行状态 m 下线路 k 的潮流, P_{ki}^m 为运行状态 m 下线路 i 断开后线路 k 上的潮流, $\Delta \alpha_{ki}^m$ 为状态 m 下线路 i 对线路 k 的潮流转移冲击。

则状态 m 下线路 i 对线路 k 的潮流转移冲击率为:

$$\beta_{ki}^m = \frac{\Delta \alpha_{ki}^m}{\sum_{k=1}^L \Delta \alpha_{ki}^m} \quad (8)$$

定义状态 m 下线路 i 的潮流转移熵为:

$$H_{Ti}^m = -\sum_{k=1}^L \beta_{ki}^m \ln \beta_{ki}^m \quad (9)$$

H_{Ti}^m 越小,线路 i 断开潮流转移的冲击越大,对系统造成的影响越大,更容易造成系统中线路越限甚至连锁故障的发生。

2 基于熵理论的脆弱评估模型

针对美加大停电或者西欧大停电的研究发现,其

起因一般都是元件的切除、过负荷等引起系统潮流转移,导致连锁反应。因此,通过过负荷和元件切除后系统的熵平衡状况来衡量系统各线路脆弱程度。

2.1 基于潮流熵理论的过负荷冲击脆弱评估

当电网正常运行时,每个元件都带有一定的初始负荷,当某一个或几个元件因过负荷而导致电网发生故障时,系统原来的潮流将发生变化,停运元件的负荷会加载到仍在工作的元件上,一旦这些元件无法承担新增加的负荷而退出运行时,就会引起新一轮的负荷转移,这将引发连锁性的过负荷停运,并最终导致大面积停电事故。

节点过负荷将导致各线路潮流发生变化,单位过负荷在线路的能量冲击大小可以通过线路潮流分布熵 $H_{D_i}^m$ 来量化; $H_{D_i}^m$ 越大,节点过负荷对系统的能量冲击越大,越容易导致线路过载切除,系统越脆弱,反之亦然。过负荷导致线路过载切除后,系统为维持输电平衡,断开的线路潮流转移对系统剩余线路发生连锁故障的影响可以通过线路潮流转移熵 $H_{T_i}^m$ 来量化:线路潮流转移熵越小,表明该线路断开后系统的潮流转移冲击分布越聚集在少数线路上,能量冲击聚集的线路更容易过载诱发连锁跳闸,系统越脆弱。因此基于线路潮流分布熵和转移熵定义线路的脆弱性指标为:

$$V_{li}^m = \frac{H_{D_i}^m}{H_{T_i}^m} \quad (10)$$

V_{li}^m 越大,过负荷对状态 m 下线路 i 的影响越大,线路 i 越脆弱。

2.2 基于潮流熵理论的线路故障风险脆弱评估

系统的连锁故障大停电的发生不仅与受到过负荷的扰动有关,还受线路故障切除的影响^[1-2]。线路的故障切除与线路材质、所处环境、运行状态等因素有关。以四川电网为例,四川水电资源非常丰富,需长距离输送到成都平原或华中以及东部沿线地区,而水电主要集中在甘、阿、凉三州地区,水电送出通道条件相当恶劣,水电送出输电线路必须经过高海拔、重冰区、无人区、森林区等自然条件恶劣地区,线路运行条件很差,各种灾害频发;各种灾害导致的线路切除势必对电网安全稳定造成影响^[16-18]。通过统计可以获得各电压等级线路的平均停运率。实际情况是,元件的停运概率随着系统所处的运行状态变化(线路潮流、母线电压和系统频率)而变化,因此,本文线路停运率采用元件停运率的运行可靠性模型。

在运行状态 m 下,线路的停运率 $\lambda(P^m)$ 随线路潮流 P^m 变化的曲线如图 1 所示,图中 $P_{\max}^m$ 和 $P_{\min}^m$ 分别为线路潮流的正常值的上限和下限; P_{lim}^m 为线路传输容量的极限值,当线路潮流大于等于该值时,线路因发热弧垂导致断路或长时间过负荷运行被切除,

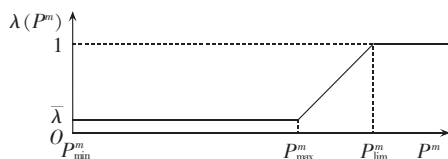


图 1 线路停运概率模型

Fig.1 Probability model of transmission line outage

线路故障率为 1, $\bar{\lambda}$ 为线路停运率的长期统计平均值。

将线路的风险指标定义为线路故障发生的概率与线路故障产生的后果即严重度的乘积,表达式为:

$$V_{2i}^m = \lambda_i^m S_i^m \quad (11)$$

$$S_i^m = \frac{P_i^m}{H_{T_i}^m} \quad (12)$$

其中, λ_i^m 、 S_i^m 分别为运行状态 m 下支路 i 的停运概率和严重程度函数, V_{2i}^m 为支路 i 在状态 m 下的风险脆弱值。本文的严重程度函数用断开线路转移潮流的分布来表示,如式(12)所示,支路 i 断开时的潮流 P_i^m 越大,断开后转移的潮流冲击越大,潮流转移熵 $H_{T_i}^m$ 越小,转移的潮流越聚集在某几条线路上,越容易导致连锁跳闸。

2.3 基于潮流熵理论的线路综合脆弱评估

V_{1i}^m 、 V_{2i}^m 分别从节点过负荷和线路故障切除的角度利用熵理论对线路的脆弱性进行评估。实际中两者不能割裂处理,综合两者的线路脆弱评估模型为:

$$V_i^m = w V_{1i}^m + (1-w) V_{2i}^m \quad (13)$$

其中, w 为权重系数,表示节点过负荷和线路故障两者的影响比重,可通过多年事故原因统计分析来获取,本文取 $w=0.5$ 。

考虑全局影响的系统脆弱度为:

$$V^m = \sum_{i=1}^L V_i^m \quad (14)$$

其中, V^m 为运行状态 m 下系统的全局脆弱指标。

本文所建立的脆弱评估模型,不仅能分析单一线路和整个系统的脆弱度,还能分析系统处于每种不同运行状态下的实时脆弱度。

随着广域测量系统(WAMS)技术的发展和大量应用,电网实时运行数据的采集成为了现实,通过 WAMS 实测的电网实时潮流数据依据本文的运行潮流熵脆弱评估理论模型可对电网脆弱线路进行实时评估,这些实时的脆弱线路是系统运行人员需要特别关注的环节,通过合理的调度调节,降低这些线路的脆弱度,可以有效预防系统连锁大停电事故的发生。根据四川电网的规划发展,至 2015 年左右,需接入 WAMS 主站系统的相量测量单元(PMU)子站约 200 个,覆盖四川特/超高压电网,届时可对四川特/超高压电网进行实时脆弱线路的评估。

3 理论模型有效性验证

为验证本文基于潮流熵线路综合脆弱评估方法

的有效性,以 IEEE 30 节点系统为例进行仿真计算,并与能量裕度、复杂网络脆弱评估法相比较。限于篇幅,仅列出 7 条最脆弱支路,按照综合脆弱度由大到小排序分别列于表 1。

表 1 不同方法脆弱线路比较
Tab.1 Comparison of vulnerable lines among different methods

排序	潮流熵法 综合指标	能量裕度 法指标	复杂网络 法指标
1	1-2	1-2	1-2
2	3-4	1-3	9-10
3	2-6	2-6	3-4
4	9-10	3-4	27-28
5	27-28	2-5	9-11
6	1-3	9-10	1-3
7	2-4	2-4	2-4

从表 1 中可以看出,与另外 2 种方法相比,基于潮流熵的脆弱指标虽然不包括能量裕度指标^[19]中的支路 2-5 与复杂网络指标^[20]中的支路 9-11,但是 3 类脆弱支路集中绝大多数支路都相同,即{1-2,1-3,2-4,3-4,9-10},说明基于潮流熵综合脆弱指标所判别的脆弱线路的正确性,验证了本文理论方法的合理性。另外,基于潮流熵综合脆弱支路集还包括了支路 2-6 和 27-28,这 2 条线路为文献[21]中不同发电机出力增长下的集中脆弱支路,而能量裕度法与复杂网络法分别忽略了支路 27-28 和 2-6;支路 27-28 一旦发生断线故障,25、26、27、29、30 等母线与电源点的电气距离就会加大,且由双端供电变为单端供电,这些节点功率需求增大时,导致与这些节点相连支路的潮流容易越限,因此忽略支路 27-28 是不合理的;这不仅证明了本文基于潮流熵脆弱评估理论的准确性和可靠性,而且说明了综合脆弱性模型能更全面地找出系统的脆弱支路集。3 种方法的脆弱线路排序有所不同,这是由于不同指标所采用的方法和侧重点不同。

4 理论模型在四川电网主干网中的应用分析

4.1 四川电网丰、枯水期脆弱环节转移特点

四川水电资源非常丰富,水电装机约 32 GW,约占总容量七成,主要集中分布在甘、阿、凉三州地区,丰富的水电资源需长距离输送到成都平原或华中以及东部沿线地区^[16-17]。随着近几年电网建设的发展,500 kV 网架已初具规模,成为四川电网的主干网架,探明四川电网 500 kV 主干网薄弱环节,合理消除这些薄弱环节有利于提高四川电网的安全稳定、挖掘电网川电东送和水电外送的输送能力,支持四川水电资源充分利用。

由于受到电源结构和一次能源分布不均衡的制约,丰水期和枯水期主要供电模式不同,四川电网电

力供需总体仍呈丰、枯特性分明,丰多枯少的局面^[18]。一方面,四川电网水电装机容量巨大,丰水期水电满发,全网大部分供电量由水电提供,川西水电输送通道潮流明显加重;另一方面,枯水期主要依靠火电供电,虽然 500 kV 电网输送潮流较轻,但其中的火电输送通道潮流加重。四川电网在丰水期和枯水期水火输电通道及各输电线路的潮流运行方式不同,薄弱环节也不尽相同,脆弱线路在丰、枯水期转移。

4.2 四川主干网脆弱线路评估

以四川电网 500 kV 主干网 2011 年丰大与枯大 2 种典型运行方式为例进行评估计算,分别记为方式 1 和方式 2,验证本文提出的潮流熵脆弱评估理论模型。根据近年来相关部门 500 kV 主干电网故障统计数据,并参考国家电力监管委员会电力可靠性管理中心发布的 2005—2010 年可靠性指标,确定了四川主干电网运行脆弱评估的可靠性基础参数。采用本文所提潮流熵脆弱评估理论对 2011 年四川 500 kV 主干网方式 1 和方式 2 下线路进行脆弱评估。

4.2.1 四川主干网基于潮流熵理论的过负荷冲击脆弱线路

对四川主干电网各线路在节点过负荷冲击下的脆弱度进行评估,初始数据采用丰大、枯大典型方式下的运行数据,利用 2.1 节基于潮流熵理论的过负荷冲击脆弱评估模型进行计算仿真,丰大、枯大方式下的仿真结果见表 2。

表 2 四川主干网丰大、枯大方式下基于潮流熵理论的过负荷冲击脆弱线路

Tab.2 Overload vulnerable lines assessed based on power flow entropy for high and low flow periods

排序	丰大方式		枯大方式	
	线路	V_{th}	线路	V_{th}
1	广安—黄岩	77.453 2	广安—黄岩	157.927 8
2	二滩—石板箐	25.361 2	二滩—石板箐	23.813 3
3	泸定—甘谷地	15.874 9	泸定—甘谷地	13.042 0
4	张家坝—长寿	10.071 8	谭家湾—德阳	9.972 4
5	谭家湾—德阳	9.948 6	黄岩—南充	7.048 9
6	甘谷地—康定	8.606 6	临巴—达州	6.704 8
7	毛尔盖—色尔古	6.587 2	色尔古—茂县	6.289 6
8	色尔古—茂县	5.987 8	叙府—福溪	5.799 4
9	叙府—福溪	5.488 1	甘谷地—康定	5.739 4
10	二滩—普提	4.938 7	长寿—万县	5.667 1

表 2 为过负荷冲击脆弱度最高的前 10 条线路。从表 2 中看出脆弱性较高的线路丰、枯期排序变化不大,如广安—黄岩、二滩—石板箐、泸定—甘谷地 3 条线路在丰大和枯大方式下均较脆弱。这 3 条线路潮流分布熵值 H_{th} 较大,潮流转移熵值 H_{tr} 较小,而且过负荷切除后的潮流转移分布聚集容易引起连锁跳闸,故三者均有较大的过负荷冲击脆弱值 V_{th} 。四川电网 500 kV 主干网架实际运行中,川东地区由于水电不足,广安电厂作为 500 kV 网架川东主要供电电厂,

一旦过负荷越限切除,将对周边地区造成大量的负荷缺额;二滩—石板箐线作为攀枝花电网与主网的联络线和攀枝花电网电力输入通道,过负荷越限切除将导致攀枝花电网解列;广安—黄岩、泸定—甘谷地均是电厂外送的唯一通道,二滩—石板箐是攀枝花电网重要的电力输送通道;3 条线路在过负荷切除下将导致周边地区电力供应严重不足,引起连锁跳闸,甚至与主网解列孤网运行。这也验证了本文基于熵理论的脆弱评估方法的准确性。

从表 2 中还可发现丰大和枯大期的脆弱线路并非完全相同。丰大期出现的脆弱线路为二滩—普提、张家坝—长寿、毛尔盖—色尔古;枯大期出现的脆弱线路为黄岩—南充、临巴—达州、长寿—万县。线路在丰、枯期脆弱度不同主要与丰大与枯大运行方式下线路的运行潮流有关。如二滩—普提线,丰大期线路有功潮流为 2 893 MW,枯大期仅为 198 MW;黄岩—南充线,丰大期线路有功潮流只有 553 MW,枯大期为 1 243 MW,约为丰水期的 2 倍。由于在丰、枯期运行潮流的不同,线路的脆弱性大小也会不同。

4.2.2 基于潮流熵理论的四川主干网故障切除风险脆弱线路

对四川主干网各线路因电网运行条件、恶劣气候、人为等各因素导致故障断线所诱发的电网连锁跳闸进行风险脆弱评估,初始数据采用丰大、枯大典型方式下运行数据,利用 2.2 节基于潮流熵理论的线路故障风险脆弱评估模型进行计算仿真,丰大、枯大方式下各线路运行风险脆弱度的仿真结果见表 3。

表 3 四川主干网丰大、枯大方式下故障切除脆弱线路风险脆弱评估

Tab.3 Assessed line-break vulnerability for high and low flow periods

线路	平均故障率/(次·a ⁻¹)	丰大 V_{li}^m (排序)	枯大 V_{li}^m (排序)
普提—洪沟	0.5026	713.0713(2)	107.6895(5)
普提—南天	0.3605	177.2149(6)	77.4297(6)
二滩—普提	0.3516	1456.903(1)	330.7064(1)
谭家湾—南充	0.3463	247.2466(5)	206.0173(4)
甘谷地—蜀州	0.3250	162.1455(8)	54.6842(8)
瀑布沟—东坡	0.3037	706.7353(3)	318.1203(2)
九龙—石棉	0.3019	313.9680(4)	71.6459(7)
长寿—万县	0.2950	24.1405(10)	232.1001(3)
洪沟—遂宁	0.2824	108.6715(9)	34.0638(9)
黄岩—万县	0.2668	172.6596(7)	26.6487(10)

由表 3 发现,线路的平均故障率排序和脆弱风险度排序大不相同,一些平均故障率高的线路,由于造成的后果严重程度低于其他线路,所以脆弱风险值反而较低。如普提—南天线的平均故障率高于二滩—普提线,但是普提—南天线的丰大故障切除风险脆弱度为 177.2149(排第 6 位)远小于二滩—普提线故障切除风险脆弱度 1 456.903(排第 1 位)。虽然普

提—南天线的平均故障率高于后者,但是二滩—普提线的故障严重度 4 143.073 远大于前者 491.5426。因此,综合考虑后的普提—南天线的风险脆弱度低于二滩—普提线。同理一些故障率低的线路风险脆弱度较大。

从表 3 中可以看出,绝大多数线路在丰大期的脆弱风险度明显高于枯大期,四川电网水电比重大,500 kV 电网作为川西水电东送的主要输送通道,在丰大期线路负载势必加重,据 2.2 节线路运行可靠性理论,这些线路丰水期故障率 λ_i^f 更高,另外线路负载率高,故障后的严重程度函数 S_i^f 越大。表中仅长寿—万县线在枯大期脆弱度反而较高,这是由于枯大期长寿—万县线是万县地区主要供电通道,弥补枯水期只有较少四川水电外送万县的不足。

4.2.3 基于潮流熵理论的综合脆弱线路

表 4 为丰大下四川主干网基于潮流熵理论的综合脆弱线路表。由表 4 可见,二滩—普提、洪沟—板桥、瀑布沟—东坡线对应有较大的 V_{li}^m 值和较小的 V_{li}^m 值,说明了这些线路虽然受负荷波动的冲击小,但线路故障切除的脆弱风险较大;相反,黄岩—广安、泸定—甘谷地对应有较大的 V_{li}^m 值和较小的 V_{li}^m 值,说明这些线路受负荷波动的冲击大容易诱发连锁故障;因此,综合脆弱指标 V_i^m 中综合考虑了系统连锁故障两大诱因,负荷波动冲击对线路的扰动脆弱度 V_{li}^m 和线路故障断线的风险脆弱度 V_{li}^m 更能实际反映线路的脆弱度。

表 4 四川主干网丰大方式下综合脆弱线路风险脆弱度

Tab.4 Comprehensive line vulnerability of high flow period

线路	归一化 V_{li}^m	归一化 V_{li}^m	归一化 V_{li}^m
二滩—普提	1.000000	0.029493	1.000000
黄岩—广安	0.995541	1.000000	0.024976
瀑布沟—东坡	0.937406	0.004139	0.961942
九龙—石棉	0.710378	0.034254	0.701831
石棉—雅安	0.606038	0.008876	0.621506
洪沟—板桥	0.604263	0.005623	0.622961
普提—洪沟	0.513450	0.061562	0.475023
普提—叙府	0.428486	0.043019	0.407491
二滩—石板箐	0.378531	0.018782	0.381120
泸定—甘谷地	0.336293	0.393510	0.017761

表 4 中,二滩—普提、黄岩—广安、瀑布沟—东坡、泸定—甘谷地、二滩—石板箐为直接和电厂相连的线路,故障后将出现大量功率缺额,其中黄岩—广安是川东主要电力来源的广安电厂的火电输出通道,其他均为水电输出通道,因丰水期大发均重载。洪沟—板桥、普提—洪沟、普提—叙府、九龙—石棉、石棉—雅安作为丰水期四川富余水电的外送通道,分别组成九石雅川西水电东送通道和二滩、川南水外送重庆通道。这些线路潮流均较重,运行可靠性较低,

故障率高,过负荷冲击大,故障后将出现大量的功率缺额,导致局部电网与主网解列孤网运行甚至限电维持电网安全,对系统安全稳定影响较大,因此均为脆弱线路。

表 5 为枯大期四川 500 kV 主干网基于潮流熵理论的综合脆弱线路。其中谭家湾—南充、谭家湾—德阳、黄岩—南充为枯水期临巴、广安大型火电厂电力输出的重要输送通道,对川内枯水期电力供需平衡和电网的安全稳定起到至关重要的作用。石棉—雅安线作为凉山、甘孜、阿坝水电集群输送通道,枯水期水电外送量达到 1898 MW 亦较大。渝万县地区在丰水期通过川渝断面黄万线接受四川电网的水电外送,长寿—万县、张家坝—长寿线潮流较轻;枯水期,由于川内水电不足,渝万县地区主要通过长寿—万县、张家坝—长寿接受华中电网电力输送,潮流较重。由此看出基于本文熵评估的脆弱线路符合四川电网实际薄弱环节。

表 5 四川主干网枯大方式下综合脆弱线路
风险脆弱度

Tab.5 Comprehensive line vulnerability of
low flow period

线路	归一化 V_i^m	线路	归一化 V_i^m
黄岩—广安	1.000041	谭家湾—南充	0.606994
瀑布沟—东坡	0.941643	谭家湾—德阳	0.515771
长寿—万县	0.713589	黄岩—南充	0.430423
石棉—雅安	0.608777	张家坝—长寿	0.380242

根据式(14)计算丰大、枯大方式下四川电网系统全局脆弱度分别为 3816.05、1799.45,系统丰大远比枯大方式下脆弱,这主要与四川电网的电源结构水电比重较高、丰水期水电大发系统潮流较重有关。

5 结论

针对过负荷和故障断线扰动所引起的系统薄弱线路过载导致的连锁故障大停电。本文从广义熵理论出发,结合过负荷和故障断线扰动下线路潮流的转移分布聚集程度,提出潮流熵脆弱评估模型,结合电网实时运行可靠性理论和风险评估理论对不同运行状态下进行综合脆弱评估。采用本文理论方法通过对 2011 年丰大和枯大方式四川 500 kV 主干网的仿真计算表明:

- a. 潮流分布熵越大、潮流转移熵越小的线路过负荷冲击脆弱越大;
- b. 潮流负载较重、运行故障率高、潮流转移熵较小的线路故障断线风险脆弱度高;
- c. 线路的综合脆弱度考虑了系统连锁故障两大诱因,更能实际反映线路的脆弱度,且与电网实际相符合;
- d. 丰大、枯大方式下,四川主干网脆弱线路发生

转移,丰大方式下主要水电输送通道较脆弱,枯大方式下外购电和川内火电输送通道较脆弱,且丰大方式下四川电网整体脆弱度高于枯大方式。

参考文献:

[1] ANDERSSON G,DONALEK P,FARMER R,et al. Causes of the 2003 major grid blackouts in north American and Europe,and recommended means to improve system dynamic performance [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2005,20(4):1922-1928.

[2] ALBERT R,ALBERT I,NAKARADO G L. Structure vulnerability of the North American power grid [J]. Physics Review E,2004 (69): 025103.

[3] 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.

[4] 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):21-26.

CAO Yijia,WANG Guangzeng. Research on power system complexity and related topics [J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(2):21-26.

[5] 顾雪平,张硕,梁海平,等. 考虑系统运行状况的电网连锁故障风险性评估[J]. 电力系统自动化,2010,38(24):124-130.

GU Xueping,ZHANG Shuo,LIANG Haiping,et al. Risk assessment of power grid cascading failure considering system operation conditions[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,38(24): 124-130.

[6] 张国华,张建华,杨京燕,等. 基于有向权重图和复杂网络理论的大型电力系统脆弱性评估[J]. 电力自动化设备,2009,29(4):21-26.

ZHANG Guohua,ZHANG Jianhua,YANG Jingyan,et al. Vulnerability assessment of bulk power grid based on weighted directional graph and complex network theory [J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(4):21-26.

[7] 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.

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.

[8] LIU Yan,GU Xueping. Skeleton-network reconfiguration based on topological characteristics of scale-free networks and discrete particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2007, 22(3):1267-1274.

[9] 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 grid [J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(1):33-39.

[10] 王安斯,罗毅,涂光瑜,等. 基于事故链风险指标的输电脆弱度在线评估方法[J]. 中国电机工程学报,2010,30(25):44-50.

WANG Ansi,LUO Yi,TU Guangyu,et al. Online transmission vulnerability assessment method based on the fault chain risk index [J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(25):44-50.

[11] 魏震波,刘俊勇,朱国俊,等. 基于可靠性加权拓扑模型下的电网脆弱性评估模型[J]. 电工技术学报,2010,25(8):131-137.

WEI Zhenbo,LIU Junyong,ZHU Guojun,et al. Vulnerability evaluation model to power grid based on reliability-parameter-

- weighted topological model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 131-137.
- [12] 曹一家,王光增,曹丽华,等. 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, et al. 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.
- [13] 李勇,刘俊勇,刘晓宇,等. 基于潮流熵的电网连锁故障传播元件的脆弱性评估[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 11-16.
- LI Yong, LIU Junyong, LIU Xiaoyu, et al. Vulnerability assessment in power grid cascading failures based on entropy of power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 11-16.
- [14] 荣盘祥,王继尧,金鸿章. 复杂系统的脆性与系统演化分析[J]. 电机与控制学报, 2004, 8(2): 142-144.
- RONG Panxiang, WANG Jiyao, JIN Hongzhang. The analysis of system evolution based on complex system[J]. Electric Machines and Control, 2004, 8(2): 142-144.
- [15] 符玲,何正友,麦瑞坤,等. 小波熵证据的信息融合在电力系统故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 64-69.
- FU Ling, HE Zhengyou, MAI Ruikun, et al. Information fusion method of entropy evidences and its application to fault diagnosis in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 64-69.
- [16] 陈汉雄,吴安平. 优化川电东送曲线减少四川丰期弃水[J]. 中国电力, 2010, 43(4): 9-13.
- CHEN Hanxiong, WU Anping. Study on optimizing Sichuan power transmission curve and decreasing quantity of abandoning energy in high flow period of Sichuan power grid[J]. Electric Power, 2010, 43(4): 9-13.
- [17] 陈虎,张英敏,贺洋,等. 特高压交流对四川电网多送出直流输电系统影响评估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 136-141.
- CHEN Hu, ZHANG Yingmin, HE Yang, et al. Impact assessment of UHVAC on multi-send HVDC systems of Sichuan power grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 136-141.
- [18] 杨可,刘俊勇,贺星棋,等. 四川电网黑启动恢复控制研究及试验(一)——指导原则及电压控制[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(6): 100-104.
- YANG Ke, LIU Junyong, HE Xingqi, et al. Research and experiment of restoration control during Sichuan power grid black-start(1): guiding principles and voltage control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(6): 100-104.
- [19] 刘慧,李华强,郑武,等. 基于电压脆弱性的支路事故排序快速算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 177-181.
- LIU Hui, LI Huaqiang, ZHENG Wu, et al. Fast algorithm of branch contingency ranking based on voltage vulnerability[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 177-181.
- [20] 刘群英,刘俊勇,刘起方. 基于支路势能信息的电网脆弱性评估[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(10): 6-11.
- LIU Qunying, LIU Junyong, LIU Qifang. Power grid vulnerability assessment based on branch potential energy information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 6-11.

作者简介:

李 勇(1986-),男,安徽安庆人,博士研究生,研究方向为电力系统可靠性与电力系统脆弱性、电力系统安全稳定(E-mail:liyong19860306@163.com);

刘俊勇(1963-),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,博士,从事电力系统稳定与控制、电力系统可靠性分析、电力系统脆弱性、电力市场、电力系统可视化等方面的研究工作;

刘晓宇(1986-),女,四川成都人,硕士研究生,研究方向为电力系统安全稳定与可再生能源。

Vulnerability assessment based on power flow entropy for lines in cascading failures and its application in Sichuan backbone power grid

LI Yong¹, LIU Junyong¹, LIU Xiaoyu¹, JIANG Le², XU Weiting¹

(1. Provincial-Level Key Laboratory of Smart Grid, School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610061, China)

Abstract: Based on the entropy theory and combined with the characteristics of power flow transfer and distribution of transmission lines, the concepts of transfer entropy and distribution entropy of transmission line power flow are proposed. According to the transfer characteristics of power grid weak links in different operating conditions and the change characteristics of power flow entropy under the disturbances of overload and line break, a vulnerability assessment model based on power flow entropy is proposed for transmission lines with the consideration of real time operational risk of power grid. The simulative results of IEEE 30-bus system show the reliability and comprehensiveness of the proposed method. Its application in Sichuan backbone power grid during high and low flow periods show that, the line with higher power distribution entropy and smaller power flow transfer entropy has bigger overload vulnerability; the line with heavier power flow load, higher operational fault rate and smaller power flow transfer entropy has bigger line break vulnerability; the vulnerable links of high flow period are different to those of low flow period, and the comprehensive vulnerable lines based on power flow entropy is consistent with the actual weak links of power grid.

Key words: electric power systems; vulnerability; cascading failures; distribution entropy of power flow; transfer entropy of power flow; models