# 基于协同效应分析的输电线路脆弱评估方法

刘利民 1.2. 刘俊勇 1. 魏震波 1. 龚 辉2

(1. 四川大学 电气信息学院,四川 成都 610065;2. 国网长沙供电公司,湖南 长沙 410015)

摘要:针对复杂电网薄弱环节辨识问题,从结构和状态两方面深入研究电力系统脆弱特性及其量化方法。在 结构方面,基于复杂网络理论,结合电力系统特性,提出结构脆弱指标——源荷介数;在状态方面,利用输电 裕度、功率过载和功率传输分布因子(PTDF)等概念,提出状态脆弱指标——线路故障功率过载量。通过分析 系统结构与状态之间的关联关系,利用协同效应,提出计及结构和状态关联关系的线路综合脆弱性评估模型。 新英格兰 39 节点系统和某 500 kV 网架系统仿真结果表明,结构与状态之间的关联性影响电网脆弱特性;与 传统方法相比,所提模型具有更好的脆弱辨识能力,验证了模型的合理性。

关键词:源荷介数: PTDF:结构脆弱性:状态脆弱性:协同效应: 电力系统: 输电线路 中图分类号: TM 711

文献标识码:A

#### DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.05.005

#### 引言 0

现代电力系统日益复杂化、扩大化和互联化,各区 域装机容量快速增长,以满足高速发展的经济负荷需 求。庞大电力网络能一定程度上提高系统运行效 率,但自身的安全问题却日渐暴露。连锁故障大停 电问题已成为现代电力系统安全稳定问题的主要威 胁[1-3]。电网脆弱性对于研究连锁故障的引发和演 变过程有着举足轻重的作用[4]。目前,脆弱性研究主 要从结构脆弱性[5-11]与状态脆弱性[12-17]两方面展开。

电力系统结构脆弱性是指电网中某一元件或某 一些元件退出或者相继退出后,系统保持其网络拓 扑结构稳定的能力[5]。文献[6]将复杂网络理论应用 到电网结构脆弱性分析上,并定义了带权重的介数 用以评估结构脆弱性。文献[7]考虑了电力系统实 际物理特性,定义了以电抗为权重的最短路径和失 负荷百分比及输电效率,研究了小世界电网连锁故 障发展的广度和深度。文献[8]对介数指标作出改 进,提出了适合电力系统的输电介数评估指标,结合 网络能力评估了母线重要性。更进一步,文献[9] 以网络最大流为基础,结合功率传输分布因子(PTDF), 分别构建了线路和节点的传输贡献度指标以衡量线 路的节点的关键性。

电力系统状态脆弱性是指系统在遭受扰动或故 障后,元件状态变量发生变化,并可能向临界值逼近 的特性[10]。文献[11]基于事故链模型推导了事故发 生的概率,结合事故发生引起的电压、频率和功率等 变化的后果严重度,构建了系统的输电脆弱度风险 评估模型。文献[12]将熵引入电力系统,利用熵将

收稿日期:2015-06-29;修回日期:2016-02-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51261130472)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51261130472)

故障扰动给系统元件带来的功率冲击结合到一起, 量化了扰动给不同元件带来的冲击不均衡性,并建 立了潮流熵的脆弱元件辨识模型。文献[13]深度挖 掘电力系统本身特性,定义了节点的电气耦合连接 度以评价电网节点的关键性。文献[14]基于潮流追 踪,集合功率输送、网络结构和运行状态等,分别提 出了线路功率介数和节点功率介数等元件关键性辨 识指标。文献[15]为弥补潮流熵、节点电压偏移和 节点重要度3种评价指标的不足,提出一种综合脆 弱性指标,并以长沙电网和 IEEE 39 节点系统仿真验 证了指标的合理性。

然而在实际情况中,电网网络结构和运行状态 两者是相互关联的,共同决定系统安全[8]。单一从 其中一个角度评价电力系统的脆弱性存在不足[12]。 而上述关于结构脆弱性的研究并没有充分兼顾考虑 运行状态带来的影响;关于状态脆弱性的研究多数 也仅从电网运行状态视角评估系统的脆弱性。仅有 少数文献能够同时考虑两者,如文献[10,14-17]等。 其中,文献[16]提出了从全局和局部、有功和无功两 方面综合衡量输电线路脆弱度的方法;文献[17]中 则提出了网络元件受扰动后所表现出的脆弱程度是自 身抗干扰能力与网络传导能力的综合表现的观点,分 别采用负荷水平与线路潮流分布给予量化,并以两者 乘积作为评估结果。这些文献在一定程度上兼顾了 电网结构与运行状态,但并未对结构脆弱性和状态 脆弱性之间的关联关系进行充分的研究和阐述。

为解决上述问题,本文首先在结构性视角下,基 于复杂网络理论,挖掘电力系统实际特性,提出电网 的结构脆弱性评估指标;然后,利用功率传输裕度和 过载,结合线路开断功率分布因子,构建电网的状态 脆弱性评估指标:再次,研究结构脆弱性与状态脆弱 性之间的关联关系,指出两者之间存在的协同效应,

第36卷第5期

2016年5月

并建立线路的综合脆弱性评估模型;最后,通过对新 英格兰 39 节点系统仿真计算,验证本文所提改进模 型的正确性和合理性。

## 1 电网结构脆弱性指标

电网结构脆弱性的研究主要采用复杂网络理论 工具<sup>[5-9]</sup>。而由于电力系统的实际特性所在,复杂网 络中的度数、介数等概念并不完全适用于电力系统。 比如,度数反映的是网络局部结构特征,与实际电网 的全局联系不大;介数假定潮流在任意2个节点间 沿最短路径传输,与电力系统实际特性相违背。

电网的网架结构决定了系统的传输能力,系统的传输能力与实时运行状态无关。本文从输电线路的输电容量出发,结合 PTDF,基于介数概念,以建立电网结构脆弱性指标。

设输电通道 gd 由发电机 g、负荷 d 和若干线路  $l_i(i=1,2,...,n,其中 n 为发电机 g 到负荷 d 的输电$  $通道的线路总数)组成。线路集 <math>\{l_i\}$ 的最大传输功 率为  $P_{l_i}^{max}$ ,其相对于发电机 g 和负荷 d 的 PTDF<sup>[9]</sup>为  $F_{l_i,gl}$ ,那么输电通道 gd 的传输容量为:

$$A_{gd} = \min\left\{\frac{P_{l1}^{\max}}{F_{l1,gd}}, \cdots, \frac{P_{li}^{\max}}{F_{li,gd}}, \cdots, \frac{P_{ln}^{\max}}{F_{ln,gd}}\right\}$$
(1)

由于 PTDF 量化的是节点对(g,d)间的功率传 输对各支路的利用情况,即各支路对潮流传输贡献 的灵敏度,因此,上式物理意义在于:输电通道 gd 间的实际传输容量应为线路集 {l<sub>i</sub>}中有线路达到传 输容量上限时所对应的潮流分布。显然,当系统网 架结构一定时,系统的输电能力亦确定,它不会随系 统运行状态变化而变化。

值得注意的是,电力系统是一个具有高度非线 性特征的有权网络;潮流并不沿着最短路径流动,而 是所有线路都可能有流动;潮流不是在网络中任意 2个节点间随意流动,而是从发电机节点流向负荷节 点。故复杂网络中的介数定义,包括文献[8]中所 定义的介数并不完全适用于电力系统。因此,本 文提出由式(1)中的输电容量来重新定义线路介数。

定义线路 li 在输电通道 gd 之间的源荷介数为:

B<sub>li,gd</sub>=A<sub>gd</sub>F<sub>li,gd</sub> (2) 上式物理含义在于:对于源荷节点对gd,当源点 g与负荷点 d之间传输的功率达到网络容许的最大 值时线路 l<sub>i</sub>所承载的潮流。那么,在整个系统Ω 中,线路 l<sub>i</sub>的源荷介数应是所有输电通道在线路 l<sub>i</sub>

$$B_{li,\Omega} = \sum_{g \in \Omega_e} \sum_{d \in \Omega_d} A_{gd} F_{li,gd}$$
(3)

其中, $\Omega_g$ 为网络 $\Omega$ 中的发电机节点集; $\Omega_d$ 为网络 $\Omega$ 中的负荷节点集。

上的叠加,即有:

显然,上式中线路 li 源荷介数的实质是支撑多

个源荷通道传输功率的线路 *l<sub>i</sub>* 的传输容量。进一步 考虑情况如图 1 所示。

$$P_a = 50 \text{ MW}$$
  
 $P_a = 100 \text{ MW}$   $P_b = 150 \text{ MW}$   
线路 a 线路 b

## 图 1 线路传输功率示意图

Fig.1 Schematic diagram of power transmission lines

图中,线路 a 和线路 b 的传输绝对裕度均为 50 MW,但线路 a 负载率 0.5 低于线路 b 的 0.75,从 安全性角度而言, a 较 b 好。因此,为修正绝对传输 容量表征上的缺陷,将式(3)作如下处理:

$$\alpha_{\text{structure}}(l_i) = \frac{\sum\limits_{g \in \Omega_i} \sum\limits_{d \in \Omega_i} A_{gd} F_{li,gd}}{P_{li}^{\text{max}}}$$
(4)

其中, $\alpha_{\text{structure}}(l_i)$ 为线路 $l_i$ 的结构脆弱性指标。

该定义不仅刻画了潮流分布情况(F<sub>i.,gl</sub>因子作用),且弥补了以往介数潮流只沿最短路径流动和潮流在任意两节点间流动的不足,同时消除了因线路传输容量不同带来的影响。其中需要指出的是,该指标中,源荷点对是平权的。但在实际电网中,并不是所有源荷点对的传输需求都一样,而是视运行方式而有所侧重。但为了该指标只与系统的网架结构发生关系,故未加入运行方式的影响,即与系统运行状态无关,因此,该指标属于一个典型的结构性脆弱指标,符合结构脆弱性评估要求。

#### 2 电网状态脆弱性指标

状态脆弱性通常采用功率、电压、相角等物理电 气量的变化进行刻画。为了与前文中结构指标考虑 角度一致,本文选择功率状态变量。

根据状态脆弱性与功率分布因子定义,线路 y 相对于线路 x 的线路停运功率分布因子为 F<sub>y-x</sub>。在 t 时刻,若线路 y 停运后造成系统功率损失 P<sub>y</sub>,则其中 线路 y 停运对线路 x 造成的功率冲击为:

$$\Delta P_{y-x} = P_y F_{y-x}$$
(5)  
那么  $t+1$  时刻,线路 x 的传输功率为:

 $P_{x}' = P_{x} + \Delta P_{y-x} = P_{x} + P_{y} F_{y-x}$ (6)

显然,当t+1时刻支路x的传输功率P<sub>x</sub>'小于最 大传输功率P<sub>x</sub>max时,不会对系统造成影响;但是,当 传输功率P<sub>x</sub>'大于等于P<sub>x</sub>max时,其停运概率随功率增 加而增加,且有近似线性关系<sup>[18]</sup>,如图2所示。图



图 2 线路停运概率模型 Fig.2 Probability model of line failure

中, $p_x$ 为支路x的停运概率; $p_x^0$ 为支路x处于正常潮流水平运行时的停运概率,可由历史数据统计得到。

线路y故障给支路x造成的功率过载量为:

$$\Gamma_{y-x} = P_x' - P_x^{\max}$$
 (7)  
进一步,将上式进行归一化:

$$\Gamma_{y-x}' = \frac{P_x' - P_x^{\max}}{P_x^{\max}} S_{\rm B}$$
(8)

其中,S<sub>B</sub>为基准功率。

那么,线路 y 停运给其他线路造成的功率过载 量为:

$$\beta_{\text{status}}(y) = \sum_{x=1, x \neq y}^{n} \Gamma'_{y-x} = \sum_{x=1, x \neq y}^{n} \frac{P'_{x} - P^{\max}_{x}}{P^{\max}_{x}} S_{\text{B}} \qquad (9)$$

其中,n为系统线路总数。

选取上式功率过载量 β<sub>status</sub>(y)作为电网状态脆弱性评价指标。不难发现:该值越大,说明线路停运 后给系统其他线路的造成传输功率转移影响相对较 大,即越逼近线路或系统极限传输功率,发生过载或 相继过载停运概率就越高,因此系统越脆弱。

#### 3 协同效应及综合脆弱模型

前文研究表明:结构和状态是评估系统脆弱性的2个不同角度,但单一从其中一个角度评价系统 脆弱性势必存在不足<sup>[10]</sup>。如何兼顾两者是关键。

首先,利用"木桶原理"来阐释结构与状态间的 关联关系。一个木桶盛水的最大容量取决于木桶的 结构,木桶容积可以类比为电网的传输容量。木桶 上最短的那块木板实际是盛水多少的决定性因素, 可称之为结构性缺陷。木桶里面盛水的多少可类比 为电网线路上的潮流水平。装水量太多,超过了木 桶的承受能力会溢出,类比为系统的潮流水平过高, 会使得输电线路过载停运。显然,木桶是否漏水是 由木桶结构和状态同时决定的。结构性缺陷固然会 制约电网的实际输电能力,但实际运行状态也对电 网的传输功率能力有着重要影响。外界影响因素不 能从根本上改变本身固有的结构脆弱性,但合理安 排电网的结构将更有助于提高电网的可靠性和稳定 性水平<sup>[7]</sup>。

一般地,合理地倾斜木桶,避开最短木板,就能 够装更多的水。即有效降低短板处实际水平面高度, 类比为降低传输容量裕度最小线路的负载水平,则 可传输更多功率。但值得注意的是,"倾斜"(即改变 运行方式)的前提是功率转移不会造成其他线路越 限,即系统其他线路需有一定裕量承担"倾斜"带来 的功率转移。因此,这就要求原系统负载水平不能 太高。显然,当系统负载水平越低时,"倾斜"影响就 越小,反之越大。这表明:结构(系统传输极限)与状 态(实际传输容量)之间是相互关联的,存在协同 效应<sup>[19]</sup>。特别是在系统满载时,两者的协同效应最强,表现出的共同作用最强,微小的干扰会被放大 很多倍(级联效应),且可能导致系统整体的崩溃。

因此,考虑到系统结构和状态之间的这种协同 效应,提出基于协同效应的电网线路脆弱性的综合 评估模型如下:

 $V_{li} = \alpha_{\text{structure}}(l_i)\beta_{\text{status}}(l_i)\gamma$  (10) 其中, $\gamma$ 为结构与状态关联因子,取为 $\gamma = P/P^{\max}, P$ 为 实时功率, $\gamma$ 的物理意义为线路负载率。

#### 4 算例分析

#### 4.1 标准节点系统仿真分析

选取新英格兰 10 机 39 节点系统为例(如图 3 所示)。系统参数见文献[20]。



Fig.3 New England 39-bus system

4.1.1 结构脆弱度

利用式(1)—(4)计算系统 46 条线路的源荷介数,结果展示于图 4,线路编号见表 1。

不难发现,源荷介数较高的前9条线路线路全 部集中在图3中的细虚线区域。该虚线区域为整个 网络的核心汇集区域,是发电机外送功率的重要通 道,起着中枢连接作用,结构重要性不言而喻。这些 线路的故障将直接造成发电机与负荷间脱节,发电 机无法输送功率,负荷无法获得足够的功率支撑。 线路16-17、15-16和14-15等是图3中右下方粗 虚线框的发电机密集区域与中部3号和18号负荷



图 4 线路结构脆弱强度值 Fig.4 Structural vulnerability for lines

表 1 IEEE 39 节点系统线路编号 Table 1 Number for lines of IEEE 39-bus system

					•
编号	线路	编号	线路	编号	线路
1	1-2	17	9-39	33	19-33
2	1-39	18	10 - 11	34	20-34
3	2-3	19	10-13	35	21-22
4	2-25	20	10-32	36	22-23
5	2 - 30	21	11-12	37	22-35
6	3-4	22	12-13	38	23-24
7	3-18	23	13 - 14	39	23-36
8	4-5	24	14 - 15	40	25-26
9	4-14	25	15-16	41	25-37
10	5-6	26	16-17	42	26-27
11	5 - 8	27	16-19	43	26-28
12	6-7	28	16-21	44	26-29
13	6-11	29	16-24	45	28-29
14	6-31	30	17 - 18	46	29-38
15	7 - 8	31	17 - 27		
16	8-9	32	19-20		

节点及左下方粗虚线框重负荷区域之间的重要联络 线。这些线路的断开将直接导致 33 号、34 号、35 号和 36 号发电机的功率无法外送,甚至导致图 3 中 右下方粗虚线框与系统脱离,形成孤岛。而线路 2-25、2-3、3-4、3-18 和 26-27 则是 30 号、37 号和 38 号发电机向负荷区域外送功率的重要通道,一旦 故障,将导致 3 和 18 号负荷节点以及左下方的粗虚 线框负荷区域无法获得足够的功率支撑。

进一步,将结构脆弱值排序前10位的线路与 文献[9]结果对比,如表2所示。

表 2 结果对比 (I) Table 2 Top 10 of structurally vulnerable line(I)

=		
排序	源荷介数辨识结果	文献[9]辨识结果
1	16-17	16-17
2	2-25	2-3
3	2-3	14-15
4	15-16	15-16
5	3-4	16-19
6	3 - 18	4-14
7	14-15	4-5
8	17-27	17-27
9	26-27	3-4
10	6-11	3-18

可看出,源荷介数和最大流传输贡献度的辨识 结果大同小异,前 10条线路中有 7条相同,这说 明了源荷介数作为电网结构脆弱线路彼辨识的有 效性。在源荷介数辨识结果中,有线路 2-25、26-27、6-11 未出现在最大流传输贡献度的辨识结果 中,这主要是由源荷介数与最大流传输贡献度的指 标构建的不同造成的。最大流为所有输电通道中最 小线路容量的累加,而源荷介数是每条输电通道最 大输送功率时各线路承担功率的叠加,并有效消除 了不同线路传输容量带来的影响,更贴近电力系统 实际,故认为源荷介数用于结构脆弱性更为合理。 4.1.2 状态脆弱度

据式(5)—(10)计算每条线路的状态脆弱性,取 值排序前 10 位线路如表 3 所示。

表 3 线路状态脆弱强度值 Table 3 Top 10 of conditionally vulnerable line

		_		-	
排序	线路	状态脆弱值	排序	线路	状态脆弱值
1	21-22	33.157	6	10-13	15.893
2	13 - 14	22.907	7	6-11	15.179
3	16-19	20.000	8	16-21	14.265
4	6-31	20.000	9	10 - 11	8.333
5	23-24	18.601	10	26-27	7.304

结合 IEEE 39 节点稳态数据分析发现,表 3 中 的线路多数承担着较大的功率,其中以线路 21-22 和 6-31 承担功率最大,分别承担着 604 MW 和 668 MW 的功率。如此大的功率承载,在线路故障后, 将导致系统其他线路功率过载。如线路 21-22 故 障导致线路 16-24 过载 28.9 MW,线路 22-23 过 载 50 MW,线路 23-24 过载 358.5 MW,根据各线路 的传输容量限制与图 2 的线路停运概率模型,线路 23-24 将直接因过载过多而断开,进一步演变将是 线路 22-23 和 23-36 过载断开,系统失去 35 号和 36号发电机;同时,线路23-24故障后会引起线路 4-5、10-13 和 13-14 的故障概率剧增, 若线路 4-5、 10-13 和 13-14 中有一条线路故障将会导致发电 机跑飞、潮流畸变,引起大停电。若线路 6-31 故障, 将导致系统直接失去 31 号发电机,同时为满足系统 负荷需求,其他发电机(如30号)不得不增加出力, 从而导致潮流变化,线路 6-11 过载 104 MW,据图 2的线路停运概率模型,线路 6-11 将直接过载断 开,从而引起包括线路 16-17(结构脆弱值最高)和 21-22(状态脆弱值最高)等在内的多条线路停运, 导致系统解列。稳态时,线路13-14承担功率为 317 MW. 虽然不如线路 21-22 和 6-31 多. 但由于 支路开断功率分布因子的缘故,使得线路13-14故 障将导致线路 6-11 过载 137 MW 和线路 10-11 过 载 17 MW。据图 2 的线路停运概率模型,线路 6-11 亦直接过载断开,系统失去32号发电机和12、13号 节点负荷,其他发电机不得不弥补 32 号发电机 的 650 MW 功率缺额,造成线路 10-11 与 10-13 严 重过载,发电机出力透支而停运,进而导致更多线路 停运(如线路 2-3 和 3-4 等)和发电机停运(如 30 号等),引起大停电。同排在表3中第3的线路16-19 承担着 451 MW 的功率,是 33 号和 34 号发电机与 系统其他元件相连的唯一通道,其重要程度不言而 喻。表 3 中排名第 10 的线路 26-27 在稳态时承担 功率 257 MW,为表 3 中所有线路中承担功率最低。其 故障断开将引起线路 2-3 功率过载 36.5 MW,加大 了线路 2-3 的故障概率,给系统带来了更大的危险 和隐患。上述分析说明,状态脆弱性指标是有效的。

4.1.3 基于协同效应的综合脆弱度

从 4.1.1 和 4.1.2 节的结果可以看出,结构脆弱 性与状态脆弱性的辨识结果并不相同。这主要是因 为两者评估角度不同,结构主要体现在系统保持网 络拓扑稳定性的能力上,而状态主要为系统的状态 量的变化,并向临界值逼近的特性。

据式(10)评估每条线路的综合脆弱强度,结 果如图 5 所示。



图 5 IEEE 39 节点系统线路脆弱强度值 Fig.5 Line vulnerabilities of IEEE 39-bus system

以图 5 中 3 个尖峰 3、13 和 27(分别代表线路 2-3、 6-11 和 16-19)为例分析说明。线路 2-3 为 30 号 和 37 号发电机外送功率的通道.结构上很重要:其 故障没有造成其他支路过载故障,但是其0.64的负 载率,即结构与状态之间较高的协同效应使线路 2-3 为最为脆弱的线路:线路 6-11 在表 2 中排列 第10,其故障会造成线路10-13、4-14和13-14等 过载,且0.65的负载率使状态与结构之间的协同效 应较强:线路 16-19 在结构脆弱性上排列不靠前, 但其 0.75 的负载率承担着 451 MW 的功率,为 33 号 和 34 号发电机与系统其他元件相连的唯一通道,模 拟发现,断开线路 16-19,将直接导致系统失去 33 号和 34 号发电机,为满足负荷需求,系统需加大其 他发电机的出力,31号发电机需增加出力455 MW, 这超过了 31 号发电机的额定功率(750 MW)382 MW, 会造成 31 号发电机停运,进而引起系统更大的功率 缺额,导致大停电。线路 3-4 和 14-15 分别是图 3 中上方区域和右下方粗线框区域向左下方粗线框区 域输送电能的通道,在表2中分列第5和第7,但是 两者断开都不会造成其他线路过载,分别只有0.075 和 0.084 的负载率,结构与状态之间的协同效应弱, 所以并未进入综合脆弱性前列。

选取脆弱值前 10 的线路列于表 4 中,并与文献 [6]和[15]的结果进行对比,来验证本文所提方法的 有效性和合理性。

从表4可看出,本文方法识别出的脆弱线路与文献[6]识别出的脆弱线路有6条相同(2-3、16-19、

表4 结果对比(Ⅱ) Table 4 Top 10 of vulnerable line(Ⅱ)

非它	脆弱线路					
3HF/ <b>7</b> *	本文方法	文献[6]	文献[15]			
1	2-3	15-16	5-6			
2	6-11	16-17	15-16			
3	16-19	16-19	1-2			
4	2-25	16-21	2-3			
5	16-17	16-24	4 - 14			
6	13-14	17 - 18	25-26			
7	15-16	17-27	5 - 8			
8	26-27	2-25	2-25			
9	10-13	2-3	16-17			
10	16-21	1 - 2	21-22			

2-25、16-17、15-16和16-21), 且2-25、16-17和 15-16 等脆弱线路在本文方法中排列 4、5 和 7,说 明了本文所提方法的有效性。本文所提方法与文献 [6]结果不同的原因在于文献[6]是从结构性视角出 发,定义了带权重的介数以评估结构脆弱性。而本 文方法充分考虑了结构与状态之间的协同效应,兼 顾两者而定义的综合脆弱指标较于文献[6]更合理 有效。文献[15]综合了潮流熵、电压和节点重要度, 从状态和结构方面评估了电网线路脆弱性,结果如 表 4 所示。从结果可看出,本文方法与其有相同之 处,如线路 2-3、2-25、16-17 和 15-16 这 4 条脆弱 线路。两者的不同之处主要是指标的构建方式不 同,文献[15]通过设置修正系数将状态与结构结合 到一起,而本文方法深度挖掘了结构与状态之间的 关系,指出两者之间的协同效应,根据协同效应构 建的综合脆弱指标,结果更符合电力系统实际情况。

### 4.2 某省网 500 kV 网架实例分析

图 6 为某省 500 kV 网架系统简化拓扑。该省 水电资源丰富,水电装机容量占总装机容量 70%,主 要集中在西部高海拔地区,需经过长距离输送达到 负荷中心。根据 2013 年丰水期系统数据,计算线路 的结构、状态和综合脆弱度,且作归一化处理,分别 取各排序前 10 位列于表 5。

结合图 6 和表 5 可以看出,在结构上比较脆弱



□ 换流站, ◎ 500 kV 变电站, ⊘ 500 kV 开关站, □ 电厂

图 6 某 500 kV 网架拓扑结构 Fig.6 Topology of a 500 kV system

表 5 某 500 kV 网架脆弱线路 Table 5 Top 10 vulnerable lines of 500 kV system

排序	结构脆弱度		状态脆弱度		综合脉	综合脆弱度	
	线路	$lpha_{ m structure}$	线路	$eta_{ ext{status}}$	线路	$V_l$	
1	23-29	1.000	52-53	1.000	38-40	1.000	
2	13-14	0.669	38-40	0.451	14 - 15	0.526	
3	12 - 14	0.666	14-15	0.271	38-43	0.493	
4	26-29	0.620	35-36	0.236	52-53	0.392	
5	1 - 2	0.614	38-43	0.228	27 - 28	0.277	
6	3-4	0.611	13-14	0.188	23-29	0.241	
7	38-40	0.600	23-29	0.176	26-29	0.162	
8	12-16	0.562	12-21	0.136	10-12	0.133	
9	38-43	0.560	45 - 46	0.126	13-14	0.102	
10	16 - 20	0.522	4 - 8	0.121	2-3	0.078	

的线路主要为中枢连接通道,是连接发电机和负荷 的重要通道,如线路 23-29、12-14 和 38-43 等。 结果与新英格兰 39 节点系统仿真结果基本一致,说 明了源荷介数用于评估线路结构脆弱性的有效性。 这些线路一旦故障断开,将直接导致电源与负荷失 联,功率无法外送,负荷无法得到足够功率支撑而 被切除,使得系统失去更多的发电机和负荷。线路 1-2 为发电机输出线,其排序较高,结构上比较脆弱 是因为在丰水期,1号水电厂满发,承担着 580 MW 的功率外送,一旦唯一的功率输送通道 1-2 故障 断开,将导致 2、3、4 等负荷节点 580 MW 的功率缺 额,为满足负荷需求,不得不加大 6 号、11 号等其 他电厂的出力,一旦这些电厂出力无法增加满足,系 统将失去更多负荷。

结合系统稳态数据,从图 6 和表 5 知,状态脆弱 值较高的线路都承载着较大的功率输送,多集中在 大型发电厂功率输送通道,如线路 52-53、38-40、 14-15 和 35-36 等。计算结果与新英格兰 39 节点 系统结果大致相同,证明了本文状态脆弱性指标用 于评估线路状态脆弱性的有效性。线路 52-53 为 53 号火电厂功率外送的唯一通道。计算结果表明, 该线路断开,系统失去 955 MW 的功率出力,引起 1 号、 6 号和 11 号发电厂增加出力,造成线路 4-49 过载发 热故障,导致进一步的连锁反应。线路 38-40 是 37 号水电厂往系统输送功率的主要通道,承载着 1973 MW 的功率输送;线路 38-43 是 35 号和 37 号水电厂 西电东送的必经通道,承载着 2 465.6 MW 的功率 外送;线路 14-15 承担着 15 号发电厂 981.6 MW的功 率外送。

表 5 脆弱排序显示,结构脆弱性、状态脆弱性和综合脆弱性排序前 10 的共同线路有 4 条,分别是线路 23-29、线路 13-14、线路 38-40 和线路 38-43。 上述分析中,线路 38-40 是 31 号大型水电厂供电的主要通道,结构上比较重要,承载着 1973 MW 的 功率外送,加上其 0.62 的较高负载率,使得结构与 状态之间的协同效应较强,成为最为脆弱的输电线路。线路 38-43 则是该省西电东送的重要通道,也 有着较强的协同效应(负载率 0.63),是比较脆弱的 线路之一。线路 23-29 结构上最为脆弱,承载功率 842.7 MW,但是其设计时,额定容量较大,在当前运 行方式下负载率仅为 0.26,结构脆弱性与状态脆弱 性之间的协同效应较弱,导致综合脆弱排名不高。 同样,因为额定容量较大,15 号发电厂满发时线 路 13-14 的负载率亦只有 0.14,此时结构状态之 间的协同效应较弱,因此其综合脆弱度不高。

进一步,对综合脆弱排序前10的线路分别进行 N-1系统稳定性分析。在线路设置三相接地短路 故障,0.2 s 解除,观察发电机功角和电压稳定。仿真 实验结果如表6所示,可以发现,线路38-40、14-15、23-29、52-53和27-28故障,电源功率无法外 送,系统功率大量短缺,造成系统功角失稳;而线路 38-40、38-43、23-29、26-29和13-14故障使得区 域功率支撑不足,造成系统电压失稳,其中线路38-40与38-43故障为双失稳;另外较为明显的是,随 着线路综合脆弱度的降低,系统失稳现象显著改变, 从双失稳到单失稳,从失稳到不失稳,趋势明显。如 线路10-12与2-3故障已不会造成系统失稳。该 结果表明综合脆弱度能较准确地刻画系统线路的 实时运行状况,验证了本文方法的合理性与有效性。

表 6 线路故障失稳类型 Table 6 Instability types by line fault

	Table 0	instability	types by	inte tauti	
序号	线路	失稳类型	序号	线路	失稳类型
1	38-40	功角失稳 电压失稳	6	23-29	电压失稳
2	14-15	功角失稳	7	26-29	电压失稳
3	38-43	功角失稳 电压失稳	8	10-12	—
4	52-53	功角失稳	9	13-14	电压失稳
5	27 – 28	功角失稳	10	2-3	_

### 5 结论

本文通过分析结构与状态及其关联关系对电 网脆弱特性的影响,提出计及三方面因素的电网 综合脆弱评估模型。研究结果表明,综合脆弱评估 思想更符合现代电网属于复杂性系统的特征。为 探索其脆弱本质和定位薄弱环节,需要有效量化 个体与整体间的关联关系。其次,较现有方法,它克 服了过去结构或状态脆弱评估考虑因子不全面的 弊端,且通过协同效应因子量化了的两者关联关 系,提升了综合脆弱辨识能力与精度。下一步,将系 统动态过程考虑其中,实现电力系统薄弱环节全过 程评估是研究重点。

#### 参考文献:

- IAN D. 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.
- [2] PIERRE H, PIERRE-ETIENNE L, JEAN-CLAUDE M. Blackout probabilistic risk assessment and thermal effects; impacts of changes in generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013,28(4):4722-4731.
- [3] 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.

[4] 苏慧玲,李扬. 基于电力系统复杂网络特征的电路脆弱性风险分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):101-107.

SU Huiling, LI Yang. Line vulnerability risk analysis based on complex network characteristics of power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2):101-107.

- [5]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.
- [6]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 线路辩识[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.
- [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 smallworld power grid based on weighted topological model[J].
  Proceedings of the CSEE,2008,28(10):20-25.
- [8] BOMPARD E, PONS E, WU Di. Extended topological metrics for the analysis of power grid vulnerability[J]. IEEE Systems Journal, 2012,6(3):481-487.
- [9] 鞠文云,李银红. 基于最大流传输贡献度的电力网关键线路和节 点辩识[J]. 电力系统自动化,2012,36(9):6-12.

JU Wenyun,LI Yinhong. Identification of critical lines and nodes in power grid based on maximum flow transmission contribution degree [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9):6-12.

- [10] 魏震波,刘俊勇,朱国俊,等. 基于电网状态与结构的综合脆弱 评估模型[J]. 电力系统自动化,2009,33(8):11-14,55.
  WEI Zhenbo,LIU Junyong,ZHU Guojun,et al. A new integrative vulnerability evaluation model to power grid based on running state and structure [J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(8):11-14,55.
- [11] WANG Ansi,LUO Yi,TU Guangyu,et al. Vulnerability assessment scheme for power system transmission networks based on the fault chain theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2011,26 (1):442-450.
- [12] 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.

- [13] 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.
- [14] 王涛,高成彬,顾雪平,等. 基于功率介数的电网关键环节辩识
  [J]. 电网技术,2014,38(7):1907-1913.
  WANG Tao,GAO Chengbin,GU Xueping,et al. Power betweenness based identification of power grid critical links[J]. Power System Technology,2014,38(7):1907-1913.
- [15] 蔡晔,曹一家,李勇,等.考虑电压等级和运行状态的电网脆弱 线路辩识[J].中国电机工程学报,2014,34(13):2124-2131.
  CAI Ye,CAO Yijia,LI Yong, et al. Identification of vulnerable lines in urban power grid based on voltage grade and running state[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(13):2124-2131.
- [16] 倪向萍,梅生伟,张雪敏.基于复杂网络理论的输电线路脆弱度 评估方法[J].电力系统自动化,2008,32(4):1-5.
  NI Xiangping,MEI Shengwei,ZHANG Xuemin. Transmission lines vulnerability assessment based on complex network theory [J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(4):1-5.
- [17] 雷成,刘俊勇,魏震波,等. 积极网络传导能力与抗干扰能力的 节点综合脆弱评估模型[J]. 电力自动化设备,2014,34(7): 144-149.

LEI Cheng, LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. Node integrative vulnerability evaluation model considering network transmission ability and anti-interference ability [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 144-149.

- [18] 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.
- [19] 陈丹宇. 长三角区域创新系统中的协同效应研究[D]. 杭州:浙江 大学,2009.

CHEN Danyu. Research on synergy effects in regional innovation systems of the Yangtze-Delta[D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2009.

[20] PAI M A. Energy function analysis for power system stability [M]. Boston, USA: Kluwer Academic Publishers, 1989.

#### 作者简介:



刘利民

刘利民(1971—),男,安徽宣城人,博士 研究生,主要研究方向为电力系统安全稳定 分析:

刘俊勇(1963—),男,四川成都人,教 授,博士研究生导师,主要研究方向为电力市 场、灵活交流输电系统、EMS/DMS/电磁暂 态分析及其计算机应用(E-mail:liujy@scu. edu.cn);

魏震波(1978—),男,四川成都人,副教授,博士,主要研 究方向为复杂系统及其理论、电力系统安全稳定分析与控制 及电力市场(E-mail;weizhenbo@scu.edu.cn)。

36

# 基于节点重要度评价矩阵的网络重构双层优化策略

傅子吴1.孙 磊1.林振智1.文福拴1.2.朱炳铨3.徐立中3 (1. 浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027:2. 文菜科技大学 电机与电子工程系. 文莱 斯里巴加湾 BE1410:3. 国网浙江省电力公司,浙江 杭州 310007)

摘要:针对传统方法在评价加权网络节点重要度时存在的不足,综合考虑节点位置和邻接节点的贡献信息. 提出节点重要度评价矩阵方法。基于此,发展一种改进的网络重构双层优化模型,上层模型以最大化系统发 电量为目标、以非黑启动机组获得启动功率的时间为优化变量,确定非黑启动机组的恢复顺序:下层模型以 恢复路径平均节点重要度最大为目标确定发电机节点的恢复路径。并通过调节系数改变线路权重中线路电容 与操作时间的比重,以避免恢复路径所需时间过长而导致待恢复机组无法尽快恢复的问题。新英格兰10 机39节点系统的仿真结果说明了所发展的模型和方法的基本特征。

关键词:网络重构:节点重要度:评价矩阵:双层优化:停电:恢复

文献标识码·A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.05.006

#### 引言 0

中图分类号: TM 727

近几年国内外发生了多起大面积停电事故, 如 2003 年"8·14"美加大停电。2005 年中国海南电 网"9·26"大停电事故、2006年西欧互联电网"11·4" 大停电事故以及 2008 年 1 月至 2 月中国南方部分 省份电网受冰雪天气影响引起的停电事故等[1-3],为

收稿日期:2015-08-31:修回日期:2016-03-22

基金项目,国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2015-AA050202): 国家自然科学基金资助项目(51377005): 浙江 省重点科技创新团队项目(2010R50004);国网浙江省电力 公司科研项目(5211ZD13000R);国家电网公司总部科技项 目(52110115009Q)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2015AA-050202), the National Natural Science Foundation of China (51377005), Zhejiang Key Science and Technology Innovation Group Program (2010R50004), State Grid Zhejiang Electric Power Corporation Project (5211ZD13000R) and State Grid Corporation of China Science Project (52110115009Q) 

电力系统的安全稳定运行敲响了警钟。一旦发生大 面积停电,如果没有事先制定恢复预案,就会造成重 大的经济损失。因此,有必要深入而系统地研究电力 系统的事故处理及完全或部分停电后的系统恢复问 题,这对减少故障影响和停电损失,确保事故发生后 系统能安全、快速、智能地恢复供电,具有十分重要 的理论和实际意义[46]。

大停电后的电力系统恢复可分为黑启动阶段、网 络重构阶段和负荷恢复阶段。网络重构阶段的主要任 务是尽快为失电机组送电并逐步建立起一个稳定的 网架结构,为下一阶段全面恢复负荷打下坚实的基 础[7-8]。近年来随着复杂网络理论研究的不断深入。 由于电网具有的"小世界"效应,这方面的研究成果也 被应用到网络重构的研究中。文献[9]采用节点收缩 后的网络凝聚度来评价节点重要度,并基于此制定骨 架网络重构策略,但该方法并未考虑线路的权重。文

### Transmission line vulnerability assessment based on synergetic effect analysis LIU Limin<sup>1,2</sup>, LIU Junyong<sup>1</sup>, WEI Zhenbo<sup>1</sup>, GONG Hui<sup>2</sup>

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

2. State Grid Changsha Electric Power Supply Company, Changsha 410015, China)

Abstract: For identifying the weak part of complex network, the characteristics of power system vulnerability and its quantification method are researched in two aspects:structure and condition. As a structural vulnerability index, the power-load betweenness is proposed based on the complex network theory and the characteristics of power system. As a conditional vulnerability index, the transmission line power overload is proposed based on the concepts of transmission margin, power overload, PTDF (Power Transmission Distribution Factor), etc. The correlation between system structure and condition is analyzed, based on which, an integrated vulnerability assessment model considering their synergetic effect is proposed. The simulative results of New England 39-bus system and a 500 kV system show that the correlation between structure and condition impacts the vulnerability of power system. Compared with the traditional methods, the proposed model has better vulnerability identification ability, verifying its rationality.

Key words: power-load betweenness; PTDF; structural vulnerability; conditional vulnerability; synergetic effects; electric power systems; transmission lines