

计及抗毁性的输电线路关键性综合评价

刘 剑^{1,2}, 李兴源¹, 王 成³, 干 华⁴, 许立雄¹

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610051;

3. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 4. 成都城电电力工程设计有限公司, 四川 成都 610041)

摘要:有效识别关键输电线路对预防大面积停电事故具有重要的意义。综合元件个体的抗毁性和对系统整体运行安全的重要性,提出了一种输电线路关键性的评估方法。从输电线路在系统正常状态下对负荷波动的承载力和在系统事故状态下对 $N-1$ 开断的抗扰力 2 个方面综合衡量输电线路元件个体的抗毁能力;从输电线路对连锁故障产生和扩散所起的作用,来综合量化输电线路对系统整体运行安全的重要性;从输电线路的抗毁性和重要性来综合评价输电线路的关键性。IEEE 39 节点系统算例和某实际电网算例验证了所提指标与方法的合理性和有效性。

关键词:输电线路;连锁故障;系统状态;负荷波动; $N-1$ 开断;抗毁性;关键性;综合评价

中图分类号:TM 726

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.12.018

0 引言

电网跨区、跨国互联是现代电力工业发展的主要趋势。互联能够实现资源在更大范围内的优化配置,但也使得局部故障可以迅速传播蔓延至整个网络进而引发大停电事故。在事故的发展过程中,极少数输电线路对局部故障的蔓延传播起到了推波助澜的作用^[1]。有效地识别这些输电线路对大规模互联电网的安全稳定运行具有十分重要的现实意义。

鲁棒且脆弱是异质网络的普遍特性,对高介数元件的蓄意攻击将造成网络性能的大幅下降^[1-3]。受此启迪,一类研究以介数为基础,结合电网的特性进行改进后用于关键输电线路的辨识。文献[3]基于源、荷之间的最短电气路径定义带权重的输电线路介数用于辨识关键输电线路;文献[4-6]基于源、荷之间的功率传输对输电线路占用情况分别辅以不同的因子,构建了输电线路的电气介数;文献[7-8]利用潮流追踪确定各输电线路对系统当前源、荷之间传输功率的承担份额,在此基础上分别定义了输电线路的潮流介数;文献[9]引入网络流理论,以源、荷之间的最大流为基础,各自定义了输电线路的介数。上述研究由输电线路在网络拓扑中的位置间接衡量了其退出对系统性能的影响,忽略了其退出对系统运行状态的冲击继而引发连锁故障的可能。

为此,另一类研究以熵为基础,从对系统运行冲击引发连锁故障的角度来衡量输电线路的关键性。文献[10]根据输电线路发生故障断开后潮流转移在系统中其余各输电线路上的分布,提出潮流转移

熵来量化输电线路因故障断开对系统运行状态造成的影响。但输电线路的越限不仅与其承载的潮流转移量有关,还与其已承载量和传输容量有关。因此,文献[11]引入输电线路的负载率构建了效用风险熵;文献[12]引入传输容量建立了考虑电压等级的输电线路潮流增长率泰尔熵;文献[13]则以传输裕度比(即潮流转移量与可用传输容量之比)来定义潮流转移熵。上述研究忽略了系统初始状态下的负载水平与负载分布,对于相同的潮流转移分布特性、不同的系统初始状态,系统发生连锁故障的可能性显然不同。

此外,极少的研究^[13-14]从结构和状态 2 个方面综合评价输电线路的关键性。但无论是结构或状态,还是二者的综合,均是从后果的严重性来分析输电线路对系统整体运行安全的重要性,进而辨识关键性,缺少对其维持在系统中运行能力的考量。即使再严重的后果也是由输电线路的停运而触发的。

针对以上的研究现状,本文提出了一种输电线路关键性的综合评价方法。首先,从输电线路断开对系统运行的冲击性和输电线路在网络拓扑中的枢纽性 2 个方面来综合衡量输电线路对系统整体的重要性;以输电线路断开后系统的整体负载率和个体负载分布的均衡率衡量对系统运行的冲击性,以输电线路断开后系统传输效能的恶化程度量化对网络拓扑的枢纽性;然后,从正常状态的负荷波动和事故状态的潮流转移 2 种情形来综合评价输电线路元件个体的抗毁性;最后,从元件个体的抗毁性和对系统整体运行安全的重要性来综合评价输电线路的关键性。

1 输电线路对系统整体运行安全的重要性

一方面,输电线路因故障断开将引发系统的潮流转移,改变系统中剩余输电线路的负载水平,诱发

收稿日期:2018-05-23;修回日期:2018-10-12

基金项目:教育部中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2082604184073)

Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2082604184073)

连锁越限断开,造成大面积停电事故。另一方面,输电线路在网络拓扑中的位置不同,对连锁故障蔓延传播的作用不同,极少数处于枢纽位置的输电线路对连锁故障的蔓延传播起到了推波助澜的作用。因此,考虑从输电线路在连锁故障触发传播的全过程中所起到的作用,来衡量输电线路对系统整体运行安全的重要性。

1.1 输电线路断开对系统运行的冲击性

输电线路因故障断开将引发系统的潮流转移,若转移的潮流集中分布在极少数的未开断输电线路路上,那么这极少数的几条输电线路将承担较多的潮流转移量,其因越限而断开的可能性大幅增加,系统发生连锁故障的概率大幅提高。潮流转移类的熵指标正是从潮流转移分布的聚集性来衡量输电线路因故障断开之后系统发生连锁故障的可能性大小,进而量化输电线路因故障断开之后对系统运行状态的冲击。然而,潮流转移类的熵指标未考虑系统初始状态下的负载水平与负载分布。对于相同的开断输电线路潮流转移分布聚集性、不同的系统初始负载水平与负载分布,故障后系统发生连锁故障的可能性显然不同。

图 1 为 4 节点简单系统,各输电线路的传输容量、输电线路 1-3/1-4 因故障断开后的潮流分布以及 3 种情形的初始潮流如表 1 所示。输电线路 1-3 因故障断开后,情形 1 和情形 2 的绝对量潮流转移熵^[10]和增长率潮流转移熵^[13]均相同,但情形 2 下输电线路 1-3 因故障断开已经导致输电线路 1-2/2-3 的潮流越限,显然对系统的冲击更大。输电线路 1-4 因故障断开后,情形 2 的传输裕度比、潮流转移熵^[13]

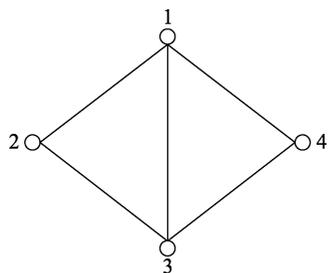


图 1 4 节点简单系统

Fig.1 A simple 4-bus system

表 1 输电线路 1-3/1-4 因故障断开后的潮流转移分布以及 3 种情形的初始潮流

Table 1 Power flow transferring distribution when Line 1-3 or 1-4 breaks because of faults and initial power flow of three conditions

输电线路	传输容量/MW	潮流转移分布/MW		初始有功潮流/MW		
		1-3 断开	1-4 断开	情形 1	情形 2	情形 3
1-3	150	—	30	100	100	114
1-4	100	30	—	55	35	35
4-3	100	30	35	55	35	58
1-2	100	70	5	15	35	94
2-3	100	70	5	15	35	94

大于情形 3 (当各输电线路的传输裕度比相同时,潮流转移分布最均衡),但输电线路 1-4 因故障断开后情形 3 下各输电线路已逼近其传输容量,发生连锁故障的概率更大。潮流转移类的熵指标由于未考虑系统初始状态下的负载水平与负载分布,不能很好地衡量输电线路因故障断开后对系统运行状态的冲击。

系统发生连锁故障的概率与系统整体的负载率以及元件个体负载的均衡率密切相关:系统整体的负载率越高,则发生连锁故障的概率越大;系统整体的负载率一定,元件个体负载分布越不均衡,则系统发生连锁故障的概率越高^[15]。因此,以输电线路因故障断开之后系统整体的负载率和元件个体负载的均衡率来共同衡量输电线路断开之后系统发生连锁故障的可能程度,用于评价输电线路因故障断开之后对系统运行状态的冲击,具体定义如下:

$$C_s(e) = \eta_{\text{sys}}(e) / H(e) \quad (1)$$

$$\eta_{\text{sys}}(e) = \sum_{i \in E \setminus e} P_i(e) / \sum_{i \in E \setminus e} P_i^{\text{max}} \quad (2)$$

$$H(e) = - \sum_{i \in E \setminus e} \frac{\eta_i(e)}{\sum_{i \in E \setminus e} \eta_i(e)} \ln \frac{\eta_i(e)}{\sum_{i \in E \setminus e} \eta_i(e)} \quad (3)$$

$$\eta_i(e) = P_i(e) / P_i^{\text{max}} \quad (4)$$

其中, $C_s(e)$ 为输电线路 e 因故障断开之后系统的负载度; $\eta_{\text{sys}}(e)$ 为输电线路 e 因故障断开之后系统的负载率; $P_i(e)$ 为输电线路 e 因故障断开之后输电线路 i 上的潮流; P_i^{max} 为输电线路 i 的传输容量; $H(e)$ 为输电线路 e 因故障断开之后系统的负载熵,用于衡量系统中元件个体负载分布的均衡程度,熵值越大表明元件个体负载分布越均衡; $\eta_i(e)$ 为输电线路 e 因故障断开之后输电线路 i 的负载率; E 为系统输电线路集合; $E \setminus e$ 为不含输电线路 e 的输电线路集合。

1.2 输电线路在网络拓扑中的枢纽性

电能的生产与消费在地域分布上的不匹配,使得电力网络的演化发展呈现局域互联的特征。电网互联在便利电能全局传输的同时,也使得局部故障能够迅速蔓延传播至整个互联电网。在此过程中,处于区域之间承担互联功能的极少数输电线路的作用显著;其缩短了不同区域节点间的电气距离,提升了互联电网的传输效能,便利了电能(故障)的全局传输。因此,本文以输电线路对电网传输效能的恶化程度来衡量输电线路对网络拓扑的枢纽性,具体定义如下:

$$C_p(e) = \varepsilon(G) - \varepsilon(G \setminus e) \quad (5)$$

其中, $C_p(e)$ 为输电线路 e 的效能度,反映了输电线路 e 因故障断开之后对电网传输效能的恶化程度; $\varepsilon(G)$ 为初始的电网传输效能; $\varepsilon(G \setminus e)$ 为输电线路 e

因故障断开之后的电网传输效能。

电能的传输效能与阻抗大小密切相关:阻抗越大,则电能传输越困难,传输效能越低;反之,则电能传输越容易,传输效能越高。考虑以源、荷节点间的等值阻抗来衡量电网的传输效能,同时引入发电因子以反映出力的优先等级,引入负荷因子以反映负荷的保障等级。具体定义如下:

$$\varepsilon(G) = \sum_{i \in V_G} \sum_{j \in V_L} w_i w_j \frac{1}{Z_{ij}} \quad (6)$$

其中, $\varepsilon(G)$ 为电网 G 的传输效能; V_G 为电源节点集; V_L 为负荷节点集; Z_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的等值阻抗; w_i 和 w_j 分别为发电因子和负荷因子,分别由实际的出力优先等级和负荷保障等级确定,可简单地分别取为出力有功功率和负荷有功功率。

2 输电线路元件个体的抗毁力

电网状态、负载水平等系统因素是导致输电线路停运的主要因素之一^[16]。系统正常状态下负荷波动引发的功率失衡调节、事故状态下线路断开造成的潮流转移冲击,都将改变系统中输电线路的负载水平,诱发输电线路的停运失效。鉴于此,从输电线路在系统正常状态下对负荷波动的承载力和在系统事故状态下对 $N-1$ 开断的抗扰力这两方面来综合评价输电线路元件个体的抗毁力。

2.1 正常状态下对负荷波动的承载力

当系统正常运行时,虽然网架结构保持不变,但负荷存在极大的波动可能性。负荷的波动将打破系统的功率平衡,引发系统中发电机组的出力调节,进而改变系统中输电线路承载的潮流。若初始状态下某输电线路 e 承载的潮流已经接近其传输容量,恰好此负荷波动引发的功率调节又增加了该输电线路的潮流,那么此负荷波动极有可能导致该输电线路过载。

常规的功率传输转移分布因子 PTDF (Power Transfer Distribution Factor) 定义了节点对之间的传输功率发生变化时引起的输电线路潮流的变化量。但在实际运行中,由于发电机调速器的频率响应,节点的负荷波动将引发的是系统中多个电源节点的出力调节^[17],而不仅仅是某一指定电源节点的出力调整。为此,将常规的节点间 PTDF 扩展为节点集与节点之间的 PTDF 以反映节点负荷波动对输电线路潮流的影响,即当负荷节点 i 消耗的功率单位增加时,输电线路 e 上的潮流变化量 $\tau_i(e)$,如式(7)所示。

$$\tau_i(e) = \frac{1}{x_e} \mathbf{M}_e^T \mathbf{X} \boldsymbol{\alpha}_{V_G,i} \quad (7)$$

$$\mathbf{M}_e^T = [0, \dots, 1, \dots, 0, \dots, -1, 0, \dots] \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\alpha}_{V_G,i} = [0, \dots, \alpha_j, \dots, \alpha_k, 0, \dots, -1, 0, \dots] \quad (9)$$

$j, k \in V_G$

$$\sum_{j \in V_G} \alpha_j = 1 \quad (10)$$

其中, x_e 为输电线路 e 的电抗; \mathbf{X} 为以输电线路电抗的倒数建立的电纳矩阵的逆; m 和 n 分别为输电线路 e 的首端节点和末端节点; α_j 为电源节点 j 的功率分担因子,可由发电机的调差率确定,简单地可取各电源节点的功率分担因子相等。

进一步地,由 $\tau_i(e)$ 可计算得到输电线路 e 对负荷节点 i 功率波动的最大承受量,即输电线路 e 承载的潮流达到其传输容量时负荷节点 i 的功率增加量 $\rho_i(e)$,如式(11)所示。

$$\rho_i(e) = \frac{P_e^{\max} - P_e^0}{\tau_i(e)} \quad (11)$$

其中, P_e^{\max} 为输电线路 e 的传输容量; P_e^0 为输电线路 e 在初始状态下的潮流(取使 $\tau_i(e)$ 为正的方向作为参考方向), $\tau_i(e)$ 通过调整参考方向保持为正。

若将输电线路对每个负荷节点功率波动的最大承受量看作空间的 1 维,则可形成一个 n_L 维的输电线路负荷波动承载空间。空间的原点即输电线路对每个负荷节点功率波动的最大承受量均为 0,表明输电线路无法承受任何的负荷波动,不具有负荷波动的承载能力。显然,在负荷波动承载空间上,离原点越近,则可承受的负荷波动量越小,输电线路越容易因负荷波动而停运失效。以输电线路负荷波动承载向量到原点距离的倒数作为输电线路负荷波动的承载力指标(考虑到后续与重要性指标相综合的需要将该指标设计成极小型),即:

$$T_n(e) = \left[\sum_{i \in V_L} \rho_i(e) \right]^{-1/2} \quad (12)$$

2.2 事故状态下对 $N-1$ 开断的抗扰力

当系统发生 $N-1$ 故障时,某输电线路 e 受到的影响大小不仅与转移至该输电线路的潮流大小有关,还与其自身剩余的可用传输容量的大小有关。若初始状态下输电线路 e 承载的潮流已经逼近其传输容量,那么即使是微小的潮流转移量也将导致该输电线路过载;反之,若初始状态下输电线路 e 还剩下较大的可用传输容量,那么即使该输电线路承载了较大的转移潮流,也可能还具有相当的传输容量裕度。为此,考虑输电线路 i 因故障断开后,其转移潮流对输电线路 e 的剩余可用传输容量的占用情况,来衡量输电线路 i 因故障断开后输电线路 e 的受扰程度,在此基础上进一步形成输电线路 e 的 $N-1$ 开断受扰向量,如式(13)所示。

$$\boldsymbol{\varphi}(e) = [\varphi_1(e), \dots, \varphi_i(e), \dots, \varphi_{i-1}(e)]^T \quad (13)$$

$$\varphi_i(e) = \max \left\{ \frac{P_e(i) - P_e^0}{P_e^{\max} - P_e^0}, 0 \right\} \quad (14)$$

其中, $P_e(i)$ 为输电线路 i 因故障断开之后输电线路 e 上的潮流; l 为系统输电线路总数。

$N-1$ 开断受扰向量空间的原点, 即 $\varphi(e)$ 的各元素为 0, 意味着输电线路不受系统中任何输电线路因故障断开的影响, 对 $N-1$ 开断具有无穷大的抗扰力。显然, $N-1$ 开断受扰向量离空间原点越远, 则输电线路抵抗 $N-1$ 开断扰动的能力越弱, 越容易因 $N-1$ 开断而停运失效。取 $N-1$ 开断受扰向量到空间原点的距离作为输电线路 $N-1$ 开断的抗扰力指标(考虑到后续与重要性指标相综合的需要将该指标设计成极小型), 即:

$$T_l(e) = \|\varphi(e)\|_2 \quad (15)$$

其中, $\|\varphi(e)\|_2$ 为向量 $\varphi(e)$ 的 2 范数。

3 综合重要性与抗毁力的输电线路关键性评价

输电线路的负载度和效能度分别从输电线路在连锁故障触发与传播 2 个不同阶段所起的作用来衡量输电线路对系统整体的重要性, 输电线路的承载力和抗扰力则分别从输电线路在系统正常和事故 2 种不同运行状态下受扰的程度来衡量输电线路元件个体的抗毁力。上述二者均是从不同的角度对同一目的进行评价, 不同指标间的冗余度低, 可简单地采用加权进行重要性评估的指标综合和抗毁力评估的指标综合。为了避免不同指标数值量纲差异的影响, 在加权综合之前先对指标进行线性变换的归一化处理。即:

$$C(e) = w_s C_s^*(e) + w_p C_p^*(e) \quad (16)$$

$$T(e) = w_n T_n^*(e) + w_f T_f^*(e) \quad (17)$$

其中, $C(e)$ 和 $T(e)$ 分别为输电线路 e 的重要性指标和抗毁力指标; $C_s^*(e)$ 、 $C_p^*(e)$ 、 $T_n^*(e)$ 和 $T_f^*(e)$ 分别为输电线路 e 归一化的负载度、效能度、承载力和抗扰力; w_s 、 w_p 、 w_n 和 w_f 分别为负载度、效能度、承载力和抗扰力的指标权重, 可由运行经验确定, 简单地可取各权重相同。

输电线路的抗毁力越弱、重要性越高, 则越容易停运失效, 从而造成越严重的影响, 此类输电线路对于系统越为关键。考虑在输电线路重要性排序和抗毁力排序的基础上, 采用取交集的方式进行综合, 实现输电线路的关键性排序。从取两者排名前 1 的交集开始, 依次递增, 假定在取两者排名前 K 的交集之后已有 M 条输电线路确定了关键性排名, 取两者排名前 $K+1$ 的交集新增了 i 条输电线路(相较于两者排名前 K 的交集)。若 $i=0$, 则继续取两者排名前 $K+2$ 的交集; 若 $i=1$, 则新增的输电线路关键性排名

为 $M+1$; 若 $i>1$, 则根据排名和从小到大依次确定关键性排名为 $M+1$ 、 $M+2$ 、 \dots 、 $M+i$ 。

4 算例分析

IEEE 39 节点系统(具体网络结构可参见文献[8])共有 46 条支路, 其中有 12 条变压器支路, 34 条输电线路。各输电线路的编号及传输容量见附录 A 中表 A1。

4.1 输电线路断开对系统运行的冲击性

当忽略暂态过程时, 输电线路因故障断开对系统运行的冲击主要是转移潮流可能引发其他输电线路的连锁性过载而造成大停电事故。为此, 本文采用大样本连锁故障仿真方法^[18]校验所提指标的合理性和有效性, 分别以各输电线路作为初始故障, 进行 t 次连锁故障仿真并统计平均负荷损失, 以平均负荷损失的大小来衡量输电线路因故障断开对系统运行的冲击。表 2 给出了本文所提指标、文献[10]的潮流转移量分布熵指标和文献[13]的传输裕度比潮流转移熵指标排名前 10 的各输电线路及对应的大样本连锁故障仿真平均负荷损失排序(简称为连锁故障仿真 CFS 排序)。

表 2 输电线路对系统运行冲击性评估结果

Table 2 Impact evaluation results of transmission lines on system operation

排名	本文所提指标		文献[10]指标		文献[13]指标	
	输电线路	CFS 排序	输电线路	CFS 排序	输电线路	CFS 排序
1	21-22	4	26-28	32	21-22	4
2	23-24	3	28-29	14	16-19	34
3	2-3	9	21-22	4	28-29	14
4	15-16	5	16-21	31	23-24	3
5	6-7	1	26-29	15	5-6	33
6	26-27	7	23-24	3	6-7	1
7	2-25	12	6-7	1	16-21	31
8	13-14	8	5-6	33	6-11	2
9	10-13	16	5-8	27	2-3	9
10	4-14	18	10-11	13	10-11	13

由表 2 可看出, 本文所提指标排名前 5 的输电线路有 4 条与 CFS 排序排名前 5 的输电线路相同; 而文献[13]的传输裕度比潮流转移熵指标排名前 5 的输电线路只有 2 条与 CFS 排序排名前 5 的输电线路相同, 文献[10]的潮流转移量分布熵指标排名前 5 的输电线路仅有 1 条与 CFS 排序排名前 5 的输电线路相同。上述结果表明了本文所提指标在衡量输电线路因故障断开对系统运行冲击时的合理性和优越性。

4.2 输电线路在网络拓扑中的枢纽性

处于网络枢纽位置的输电线路将承担更多的源、荷间功率传输, 其故障也将导致更多的功率输出受阻而使系统失稳。以故障临界切除时间确定的事故严重等级来校验本文所提指标对输电线路网络拓

扑枢纽性评价的合理性和有效性。表 3 给出了本文所提指标、文献[4]的电气介数指标和文献[8]的功率介数指标排名前 10 的各输电线路及对应事故严重等级^[19]。

表 3 输电线路的网络枢纽性评估结果

Table 3 Pivotability evaluation results of transmission lines in network

排名	本文所提指标		文献[4]指标		文献[8]指标	
	输电线路	事故等级	输电线路	事故等级	输电线路	事故等级
1	16-19	严重	16-17	严重	21-22	严重
2	16-17	严重	16-19	严重	23-24	较严重
3	15-16	较严重	15-16	较严重	16-19	严重
4	2-25	严重	17-27	较严重	2-3	危害不大
5	16-21	严重	14-15	危害不大	6-11	潜在危害
6	17-27	较严重	26-27	严重	6-7	危害不大
7	21-22	严重	2-25	严重	5-6	潜在危害
8	14-15	危害不大	17-18	较严重	10-11	潜在危害
9	26-27	严重	3-4	危害不大	10-13	潜在危害
10	2-3	危害不大	3-18	较严重	16-21	严重

采用本文所提指标排名前 5 的输电线路中有 4 条发生严重故障,1 条发生较严重故障;而文献[4]的电气介数和文献[8]的功率介数指标排名前 5 的输电线路中都只有 2 条是严重故障,还都包含 1 条危害不大故障的输电线路。上述结果表明了本文所提指标能够更有效地反映输电线路在网络拓扑中的枢纽地位。

4.3 对系统整体运行安全的(综合)重要性

表 4 为输电线路的综合重要性评估结果。可见,输电线路对系统整体运行安全重要性综合指标 $C(e)$ 排名前 10 的输电线路,并不都是冲击性指标和枢纽性指标排名前 10 的输电线路。本文所提指标排名前 10 的输电线路中有 9 条与文献[13]的结果(表 4 中最后一列)相同。上述结果表明所提方法能够从不同的方面综合评价输电线路对系统整体的重要性,可以避免单一角度评价结果的片面性。

表 4 输电线路的综合重要性评估结果

Table 4 Comprehensive importance evaluation results of transmission lines

$C(e)$ 排名	输电线路	冲击性排名	枢纽性排名	文献[13]的结果
1	21-22	1	7	13-14
2	16-19	17	1	21-22
3	15-16	4	3	16-17
4	2-3	3	10	16-21
5	16-17	12	2	16-19
6	23-24	2	17	10-13
7	2-25	7	4	15-16
8	26-27	6	9	2-25
9	16-21	13	5	23-24
10	13-14	8	19	26-27

4.4 综合抗毁力与重要性的输电线路关键性

表 5 为输电线路的关键性评估结果。可见,综

合抗毁力与重要性的输电线路关键性排名前 10 的输电线路,并不都是重要性排名前 10 的输电线路。图 2 为大样本连锁故障仿真统计的输电线路 4-14 和 2-3 的过载断开次数。可见,输电线路 4-14 比输电线路 2-3 的抗毁力弱,更容易受扰退出,因此虽然输电线路 4-14 的重要性排名不在前 10,但却在关键性排名中位于前 10;虽然输电线路 2-3 在重要性排名前 10 之列,但却不在关键性排名前 10 之列。

表 5 输电线路的关键性评估结果

Table 5 Criticality evaluation results of transmission lines

输电线路	关键性排名	重要性排名	输电线路	关键性排名	重要性排名
21-22	1	1	4-14	6	15
16-17	2	5	16-21	7	9
16-19	3	2	15-16	8	3
23-24	4	6	13-14	9	10
2-25	5	7	26-27	10	8

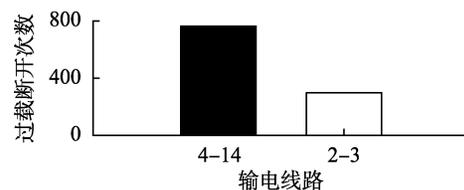


图 2 输电线路 4-14 和 2-3 的过载断开次数

Fig.2 Times of overload outage for Line 4-14 and 2-3

上述结果表明,本文所提方法综合考虑了输电线路对系统整体的重要性和元件个体的抗毁力,能够更为有效地衡量输电线路的关键性。

进一步地,采用某实际省级电网验证本文所提方法的实用性,具体分析过程和结果见附录 B。

5 结论

有效识别关键输电线路对预防大面积停电事故具有重要的意义。为此,本文提出了一种输电线路关键性的综合评估方法,IEEE 39 节点系统和某实际电网的算例结果表明:

a. 本文所提负载度指标从系统整体负载率与个体负载分布均衡率 2 个方面来衡量输电线路断开后对系统运行的冲击性,克服了已有指标只衡量潮流转移分布特性,但未计及系统初始负载水平与负载分布的不足;

b. 本文所提重要性指标从输电线路对系统运行的冲击性与对网络拓扑的枢纽性 2 个方面来综合衡量对系统整体的重要性,避免了从单一角度进行评估的片面性;

c. 本文所提关键性评估方法不仅考察了输电线路对系统整体的重要性,还计及了输电线路元件自身维持在系统中运行的能力,对输电线路关键性的评价更为合理、有效。

本文所提输电线路抗毁力评价指标仅考虑了运

行因素,如何考虑环境因素、自动控制装置误拒动等因素将是后续研究的内容。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] KINNEY R, CRUCITTI P, ALBERT R, et al. Modeling cascading failures in the North American power grid[J]. The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems, 2005, 46(1): 101-107.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] WANG Kai, ZHANG Buhan, ZHANG Zhe, et al. An electrical betweenness approach for vulnerability assessment of power grids considering the capacity of generators and load[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2011, 390(23): 4692-4701.
- [6] 徐青山, 王伟, 刘建坤, 等. 计及灵敏度因子的加权电气介数在电网脆弱性线路识别中的应用[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10): 53-58.
XU Qingshan, WANG Wei, LIU Jiankun, et al. Application of weighted electric betweenness considering sensitivity factor in identification of vulnerable grid lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10): 53-58.
- [7] 刘文颖, 梁才, 徐鹏, 等. 基于潮流介数的电力系统关键线路辨识[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 90-98.
LIU Wenyong, LIANG Cai, XU Peng, et al. Identification of critical line in power systems based on flow betweenness[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 90-98.
- [8] 王涛, 高成彬, 顾雪平, 等. 基于功率介数的电网关键环节辨识[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.
- [9] DWIVEDI A, YU X. A maximum-flow-based complex network approach for power system vulnerability analysis[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(1): 81-88.
- [10] 李勇, 刘俊勇, 刘晓宇, 等. 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[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10): 40-46.
LI Yong, LIU Junyong, LIU Xiaoyu, et al. Vulnerability assessment based on power flow entropy for lines in cascading failures and its application in Sichuan backbone power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10): 40-46.
- [11] 丁明, 过羿, 张晶晶. 基于效用风险熵的复杂电网连锁故障脆弱性辨识[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 52-57.
DING Ming, GUO Yi, ZHANG Jingjing. Vulnerability identification for cascading failures of complex power grid based on effect risk entropy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 52-57.
- [12] 张弘历, 李华强, 杨植雅, 等. 基于潮流增长率泰尔熵的脆弱支路辨识[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2340-2346.
ZHANG Hongli, LI Huaqiang, YANG Zhiya, et al. Identification of vulnerable line based on the Theil entropy of flow growth rate[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2340-2346.
- [13] 张才斌, 游昊, 李本瑜, 等. 计及拓扑结构和运行状态的支路重要度评估方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 15-20.
ZHANG Caibin, YOU Hao, LI Benyu, et al. Assessment method of branch importance considering topological structure and operation state[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 15-20.
- [14] 刘利民, 刘俊勇, 魏震波, 等. 基于协同效应分析的输电线路脆弱评估方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 30-37.
LIU Limin, LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. Transmission line vulnerability assessment based on synergetic effect analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 30-37.
- [15] 于群, 曹娜, 郭剑波. 负载率对电力系统自组织临界状态的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 24-27.
YU Qun, CAO Na, GUO Jianbo. Analysis on influence of load rate on power system self-organized criticality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1): 24-27.
- [16] 何迪, 章禹, 郭创新, 等. 一种面向风险评估的输电线路故障概率模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 69-76.
HE Di, ZHANG Yu, GUO Chuangxin, et al. Failure probability model of transmission lines for risk assessment[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 69-76.
- [17] SUN Hongbin, ZHANG Boming. A systematic analytical method for quasi-steady-state sensitivity[J]. Electric Power Systems Research, 2002, 63(2): 141-147.
- [18] 马志远, 刘锋, 沈沉, 等. 基于PageRank改进算法的电网脆弱线路快速辨识(二): 影响因素分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 36-44.
MA Zhiyuan, LIU Feng, SHEN Chen, et al. Rapid identification of vulnerable lines in power grid using modified PageRank algorithm-part II: factors affecting identification results[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 36-44.
- [19] 王守相, 张伯明, 刘映尚. 事故临界切除时区计算及其在事故扫描中的应用[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 72-77.
WANG Shouxiang, ZHANG Boming, LIU Yingshang. Critical clearing time interval calculation and its application in contingency screening[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 72-77.

作者简介:



刘剑

刘剑(1977—),男,天津人,高级工程师,博士研究生,主要研究方向为电力系统稳定与控制(**E-mail**:liujian@ehdc.com.cn);

李兴源(1945—),男,四川宜宾人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统稳定与控制(**E-mail**:x.y.li@163.com);

许立雄(1982—),男,福建莆田人,讲师,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统稳定与控制(**E-mail**:xulixiong@163.com)。

Comprehensive assessment of criticality for transmission line considering invulnerability

LIU Jian^{1,2}, LI Xingyuan¹, WANG Cheng³, GAN Hua⁴, XU Lixiong¹

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

2. Yalong River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610051, China;

3. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China;

4. Chengdu Chengdian Electric Power Engineering Design Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: Effective identification of crucial transmission lines is of great significance to prevent widespread blackouts. An assessment method for the criticality of transmission lines is proposed, which takes into consideration both the invulnerability of transmission line individual components and the importance to the whole system's safe operation. The invulnerability of transmission line individual components is measured comprehensively from two aspects of carrying capacity of transmission line to load fluctuations under the normal condition and resistance to $N-1$ outage under the accident condition. The importance of transmission lines to the overall operation safety of system is quantified comprehensively from the perspective of transmission lines' effects on the cascading failure generation and diffusion. And then the criticality of transmission lines is assessed comprehensively from aspects of invulnerability and importance of transmission lines. The case studies of IEEE 39-bus system and a practical provincial system demonstrate the rationality and validity of the presented indicators and method.

Key words: transmission lines; cascading failures; system states; load fluctuations; $N-1$ outage; invulnerability; criticality; comprehensive assessment

(上接第 120 页 continued from page 120)

Dual-loop supplementary frequency control for BTB-VSC-HVDC

ZENG Linggang¹, LI Dahu^{2,3}, YAO Wei¹, SUN Jianbo², LIU Jia⁴, WEN Jinyu¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China;

3. School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

4. School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The two asynchronous AC systems interconnected by BTB-VSC-HVDC (Back-To-Back Voltage Source Converter based HVDC) cannot provide necessary frequency support for each other, which results in reduced frequency response characteristics of each AC system under faults. To address this issue, a dual-loop SFC (Supplementary Frequency Control) strategy for BTB-VSC-HVDC system is proposed with theoretical analysis of its feasibility. The proposed SFC, which includes both active and reactive power-loop (P-loop SFC and Q-loop SFC), ensures that the non-perturbed system can participate in the frequency response of the disturbed system and realizes mutual frequency support of the AC systems at both ends. The P-loop SFC can provide frequency support for the disturbed system during the primary frequency modulation, and hence improving the steady-state characteristics of the frequency response. The Q-loop SFC can provide virtual inertia support to improve the transient characteristics of the frequency response. Simulations are conducted in a 4-machine 2-area benchmark with BTB-VSC-HVDC and an equivalent simplified model of Southwest Power Grid with Hubei Power Grid connecting by Chongqing-Hubei BTB-VSC-HVDC. Results show that the proposed control strategy effectively improves the transient and steady-state characteristics of the frequency response of the perturbed system.

Key words: BTB-VSC-HVDC; asynchronous interconnection; frequency control; frequency support

附录 A

表 A1 输电线路传输容量

Table A1 Transmission capacity of transmission lines

编号	输电线路	传输容量/ (MV·A)	编号	输电线路	传输容量/ (MV·A)	编号	输电线路	传输容量/ (MV·A)
1	1-2	600	13	7-8	800	25	17-18	600
2	1-39	600	14	8-9	600	26	17-27	500
3	2-3	800	15	9-39	600	27	21-22	1000
4	2-25	600	16	10-11	800	28	22-23	800
5	3-4	500	17	10-13	800	29	23-24	1000
6	3-18	500	18	13-14	800	30	25-26	600
7	4-5	600	19	14-15	600	31	26-27	700
8	4-14	600	20	15-16	600	32	26-28	700
9	5-6	1000	21	16-17	600	33	26-29	700
10	5-8	800	22	16-19	800	34	28-29	700
11	6-7	1000	23	16-21	800			
12	6-11	800	24	16-24	800			

附录 B

某实际省级电网共有 543 条 220 kV 电压等级及以上的输电线路，其中包括 94 条 500 kV 输电线路，449 条 220 kV 输电线路。图 B1 为该实际省级电网的拓扑结构图。

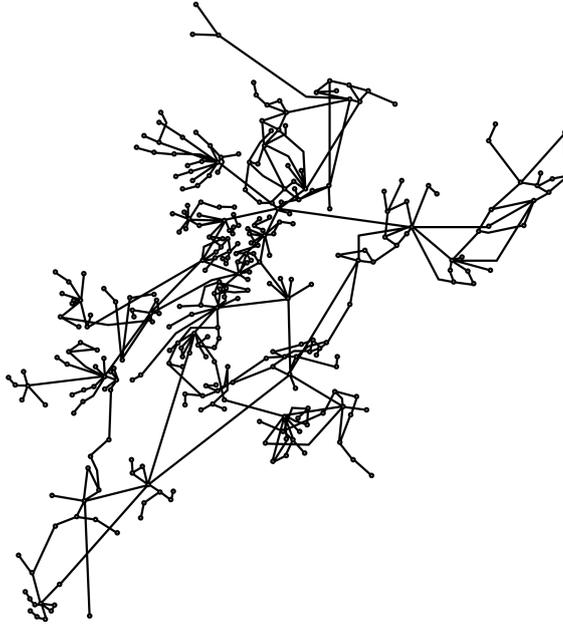


图 B1 某实际省级电网的拓扑结构

Fig.B1 Topology structure of a practical provincial power grid

图 B2 给出了各输电线路重要性排名与抗毁力排名的二维分布。

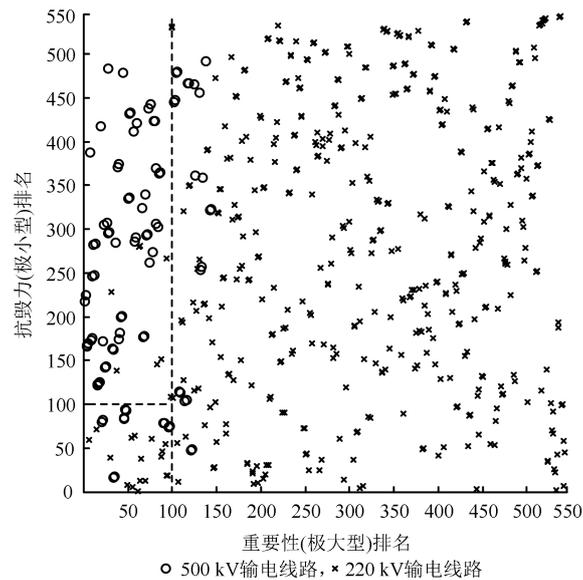


图 B2 某实际省级电网输电线路排名分布

Fig.B2 Ranking distribution of transmission lines in a practical provincial power grid

94 条 500 kV 输电线路在重要性指标排名中靠前列，绝大多数输电线路的排名都在前 100 以内（如图 B2 中竖虚线左侧所示）。500 kV 输电线路是电能大范围长距离输送的主体，是该省级电网的骨干网架，在设计建造、运行安排等诸多环节中均是重点关注的对象。这些输电线路往往被要求保有相当的裕量，从而能够在一定的恶劣情形下持续在系统中运行。500 kV 输电线路虽然重要但也坚强，因此在关键性排名中并不靠前（如图 B2 中左下角虚框内所示，关键性排名前 30 的输电线路中有 12 条 500 kV 输电线路）。

在重要性指标排名靠前的输电线路中有少量的 220 kV 输电线路。这些输电线路对局域地区电网的作用显著，例如局域地区电网为数不多的主力电厂的送出通道，其发生故障将使局域地区电网丧失重要的电源支撑，需要域外功率支援，从而引发潮流大范围转移，增加大停电事故风险。这些输电线路虽然在同电压等级输电线路中受到更多的关注，保有一定的裕量，但与更高电压等级输电线路（如 500 kV 输电线路）相比还存在差距，抗毁力相对较弱，因此在关键性排名中靠前（如图 B2 中左下角虚框内所示，关键性排名前 30 的输电线路中有 18 条 220 kV 输电线路）。

上述结果与该省级电网的实际情况相符，验证了本文所提方法的有效性、适用性和实用性。