

大规模互联电网关键节点识别与应对策略研究

刘海涛¹, 牛健¹, 刘兵², 张顺³

(1. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 宁夏 银川 750002; 2. 国家电网有限公司华中分部, 湖北 武汉 430062;
3. 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

摘要:随着电力系统的不断发展,大规模互联电网在极大提高能源资源配置的同时,也给电力系统同步运行带来了新的问题。大电网局部故障可能传播至整个网络,导致电力系统连锁故障的发生,而电力系统连锁故障一般伴随着线路有功功率的大规模转移。鉴于此,针对节点移除后的电网潮流转移情况,给出节点潮流转移度的概念;考虑到节点移除后可能会造成系统不连通的现象,提出节点位置重要度的概念;同时,基于此2个指标,并借用电气耦合连接度的概念,结合多属性决策方法给出关键节点综合性指标的排序方法。最后,通过对特定网络结构制定薄弱节点分裂运行的主动防御策略,防止连锁故障发生或抑制连锁故障大规模传播。针对华中电网某省系统,应用该文所提识别方法和主动防御方案,仿真结果验证了该方法和策略的有效性。

关键词:大规模电网;潮流转移;关键节点识别;节点分裂

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.04.015 中图分类号:TM712 文章编号:1673-9140(2020)04-0114-08

Research on identification method of critical node and countermeasures in large-scale interconnected power grids

LIU Haitao¹, NIU Jian¹, LIU Bing², ZHANG Shun³

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750002, China;
2. Central China Branch of State Grid Co., Ltd., Wuhan 430062, China; 3. China Electric Power Engineering Consulting Group Zhongnan Electric Power Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430071, China)

Abstract: With the continuous development of the power system, the large-scale interconnected power grid has greatly increased the allocation of energy resources, but also brought new problems to the synchronous operation of the power system on the mean time. Partial failures of large power grids may spread to the entire network, leading to cascading failures in the power system, which are generally accompanied by large-scale transfer of line active power. In view of this, aiming at the power flow transfer situation after the node is removed, this paper gives the concept of node power flow transfer degree. Considering that the node removal may cause the system to be disconnected, the concept of node position importance is also proposed. Meanwhile, based on these two indicators, and borrowing the concept of electrical coupling connectivity, combining with multi-attribute decision-making method leads to the ranking method of key node comprehensive indicators. Finally, this paper prevents the occurrence of cascading failures or inhibit the large-scale propagation of cascading failures by formulating an active defense strategy for the weak node

split operation for a specific network structure. For a provincial system in Central China Power Grid, the identification method and active defense scheme mentioned in this paper are applied. The results show the effectiveness of the method and scheme.

Key words: large-scale power grid; power flow transfer; critical node identification; node split

中国能源资源中心与电力需求中心呈现逆向分布,导致中国电力系统需要进行远距离输电,因此,中国需要建设大规模互联系统和跨区输电系统^[1-3]。随着电力系统的不断发展,电网结构日趋庞大复杂,在极大提高电网大范围资源配置能力的同时,也造成大电网的运行和安全控制特性日臻复杂。

2003 年美国东北部部分地区和加拿大东部地区出现大范围停电,停电范围约 240 万 km²,美国 8 个州受影响居民人数共计 5 000 万,加拿大 2 个省受影响人口达 1 000 万^[4];同年,意大利发生大停电事故,这次事故导致意大利全国铁路、通信系统瘫痪,5 800 万人口的生活处于黑暗甚至停滞的状态^[5]。尽管大停电事故的起因和发展过程不尽相同,但大停电事故的发生及发展过程有其必然性的一面,即电网本身结构特性存在安全隐患是大停电事故发生的内因。因此,识别电力系统的关键环节,有助于分析电网本身的结构特性存在的安全隐患,针对性采取相应措施,对避免大停电事故的发生具有重要意义^[6-7]。

电力系统关键环节的识别已有很多文献作出了相关研究。文献[8]采用复杂网络理论的方法验证了北美电网具有小世界特性,即存在高介数的节点和线路,这类节点和线路的脆弱性也高于其他节点;文献[9]在运用电气介数的概念上分析了连锁故障的传播机制,并提出了一种连锁故障防御措施;文献[10]给出了骨干网架的概念及搜索模型,在此基础上结合层次分析法对关键线路进行了相对重要度排序。以上文献研究方法均是通过运用复杂网络理论的研究成果或者分析系统性能变化来定义关键环节识别指标。

电力系统某一元件故障可能会引发连锁故障^[11-12],进而导致大停电事故,连锁故障的发生往往又伴随着线路有功功率的大规模转移。考虑到电力系统中承载能力较重的元件失效对于电网性能往往会造成较大的损失,该文结合复杂网络理论,通过计算关键元件的电气耦合连接度以及该节点移除后

电网潮流转移程度来反映关键节点的重要程度。在识别出电力系统的关键节点后,针对性采取相关措施,能够有效避免大电网因局部故障而引发的连锁反应,导致大面积停电事故。

1 关键节点识别数学模型

1.1 节点电气耦合连接度

文献[13]在分析电力网潮流分布机理的基础上,基于电气距离提出了网络节点电气耦合连接度的概念,该文应用该概念作为评价节点关键性的一个指标,计算公式为

$$\alpha = 1 / \sum_{j=1, i \neq j}^N Z_{ij, \text{equ}} \quad (1)$$

α 值越大表明节点 i 与其余节点的电气耦合作用越强,发生在该节点上的故障更容易引发全局性事故,该节点越关键。

根据叠加原理思想, $Z_{ij, \text{equ}}$ 可用系统节点阻抗矩阵元素表达:

$$Z_{ij, \text{equ}} = (Z_{ii} - Z_{ij}) - (Z_{ij} - Z_{jj}) \quad (2)$$

其中, Z_{ij} 为系统节点阻抗矩阵第 i 行第 j 列元素。

1.2 节点潮流转移度

节点故障后往往会导致系统潮流重新分布,最明显的现象就是若该节点附近没有可替代的有功功率传输节点,则有功功率将不得不在系统中大范围迁移,引起系统线路输送功率的改变,导致线路输送功率不满足 $N-1$ 原则,抑或超过其静稳极限,最终导致联络线两端发电机功角振荡,系统失去稳定。该文提出节点潮流转移比指标,用于评价节点移除后新网络拓扑潮流转移情况。

对于一个 N 节点电力网络,定义节点 i 针对线路 l 的潮流转移比,即联络线功率改变量与初始潮流流入节点 i 功率的比值,公式为

$$k_l = \frac{P_{l1} - P_{l0}}{\sum_k P_{k0}}, \quad l = 1, 2, \dots \quad (3)$$

式中 P_{l1} 为节点移除后联络线 l 输送的功率; P_{l0}

为联络线 l 输送的初始功率; $\sum_k P_{k0}$ 为节点 i 移除前流入节点 i 的有功功率。显然, k_l 越大, 表明节点 i 故障后联络线 l 功率转移比越大, 节点 i 对线路 l 的影响越明显。潮流转移示意如图 1 所示。

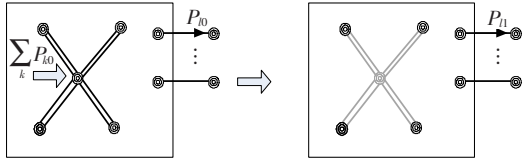


图 1 潮流转移示意

Figure 1 Diagram of power flow transferring

若将联络线分为省内和省间联络线, 考虑到省间联络线的稳定性对整个系统的影响更大, 其功率振荡会引发省间发电机功角摇摆, 省内联络线的稳定性则对该省系统的影响较大, 其功率振荡更易引发省内不同区域的发电机功角摇摆。因此, 可将节点 i 针对省内联络线潮流转移比的和定义为节点 i 的局部潮流转移度, 将节点 i 针对省间联络线潮流转移比的和定义为节点 i 的全局潮流转移度。

$$1) \text{ 节点局部潮流转移度 } \beta_j = \sum_{l=1} k_l$$

若线路 l 全部为省内薄弱线路, 则 β 表征的是局部潮流转移度, 表明该节点对该省电力系统稳定性影响的重要程度。

$$2) \text{ 节点全局潮流转移度 } \beta_q = \sum_{l=1} k_l$$

若线路 l 全部为省间联络线, 则 δ 表征的是全局潮流转移度, 表明该节点对全局电力系统稳定性影响的重要程度。

节点潮流转移度:

$$\beta = \omega_1 \beta_j + \omega_2 \beta_q \quad (4)$$

式中 ω_1 、 ω_2 分别为局部重要度 β_j 、 β_q 的权重系数。

对于大规模同步联网的交流网络, 省间联络线发生大面积潮流转移的危险性大于省内联络线潮流转移的危险性。因此, 该文取 $\omega_1=0.4$ 、 $\omega_2=0.6$, 以区分全局和局部潮流转移度的重要性。

1.3 节点位置重要度

当移除电力网络的某个节点后, 网络存在不连通的可能, 如图 2 所示, 该文针对这种节点给出节点位置重要度的概念。移除节点 i 后系统变为 2 个乃至更多不连通的子网, 节点位置重要度表达式为

$$\gamma = \frac{\max\{\sum P_G^1, \sum P_G^2, \dots, \sum P_G^n\}}{\sum_{i=1}^m P_{Gi}} \quad (5)$$

式中 m 为全网络发电机的台数; P_{Gi} 为电网第 i 台发电机的输出有功功率; $\sum P_G^n$ 为移除节点后第 n 个区域内所有发电机输出的有功功率之和。显然, 移除节点 i 后若整个系统被分解为 n 个孤立的系统, 则 $\gamma \geq 1/n$; γ 值越接近 $1/n$, 表明 n 个孤立的系统发电机有功出力旗鼓相当, 从而反映了节点 i 是连接这 n 个系统的重要节点, 也是整个系统的重要节点。

为了方便判别节点位置的重要性, 将式(5)两边都乘以 n , 可根据 $n\gamma$ 与 1 之间的大小关系来判别节点的重要性。

考虑到计算结果的误差, 给出判别法则: 若 $n\gamma - 1 \leq \epsilon$, 则认为该节点是系统的候选关键节点; 若 $n\gamma - 1 > \epsilon$, 则认为该节点不是系统的候选关键节点。 ϵ 值可取 0.1。对于某节点移除后若系统是连通的, 则该节点的位置重要度 $\gamma = 1$, 即该节点是候选关键节点。

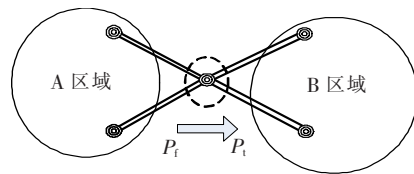


图 2 移除节点后系统不连通示意

Figure 2 Diagram of system unconnected after the node is removed

1.4 综合评价指标

为了从电网电气距离、潮流转移、连通情况等多个角度对电网具体节点的重要程度进行综合评价, 提出关键节点综合指标。关键节点综合指标是节点电气耦合连接度、节点潮流转移度、节点位置重要度的加权和, 定义为

$$V_i = \omega_\alpha \alpha_i + \omega_\beta \beta_i + \omega_\gamma (n\gamma_i - 1) \quad (6)$$

式中 V_i 为电网节点 i 的重要度综合指标; ω_α 、 ω_β 、 ω_γ 为节点重要度综合指标的权重系数。

2 基于理想点的多属性决策关键节点识别

考虑到节点的 3 个指标之间存在不同的量纲和

量纲单位,三者之间没有明确的物理关系,为了得到三者之间的权重系数,该文采用基于理想点的多属性决策方法。

对于节点为 N 的电力系统,对应的决策方案集可以表示为 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$, 评价节点的关键性指标有 m 个,对应的每个方案的属性集合为 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ 。定义决策矩阵 $\mathbf{X} = (x_{ij})_{m \times n}$, 其中, x_{ij} 为第 i 个节点的第 j 个关键性指标值。由于节点的指标较多,为了消除其带来的不可共度性,需对决策矩阵进行规范化处理^[14]。因此,针对该文所提节点的 3 个关键性指标进行规范化处理。

由文 1.1 分析可知,节点电气耦合连接度、潮流转移度指标值越大,表明该节点越重要。因此,这类指标的属性类型为效益型,给出这类指标的标准化处理公式:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{ij}^{\min}}{x_{ij}^{\max} - x_{ij}^{\min}} \quad (7)$$

根据节点位置重要度指标的计算方法可知, $n\gamma - 1$ 越小,节点越重要。该指标属于成本性指标,给出该指标的标准化处理公式:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}^{\max} - x_{ij}}{x_{ij}^{\max} - x_{ij}^{\min}} \quad (8)$$

经过上述变化后,属性的最优值为 1,最差值为 0。假设第 i 个方案 A_i 的综合评价值为 $S_i(\mathbf{w})$, 所提 3 个属性的权向量为 $\mathbf{w} = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)^T$, 且满足归一化约束 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1, \omega_i \geq 0, i = 1, 2, 3$, 则

$$S_i(\mathbf{w}) = \sum_{j=1}^3 \omega_j r_{ij} \quad (9)$$

由式(3)~(8)可以确定方案的优劣,显然根据定义可以发现,关键节点识别综合指标 V_i 的排序问题转化为了对 $S_i(\mathbf{w})$ 的求解问题,即需要求解各属性值的权重向量 $\mathbf{w} = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)^T$, 采用计算方案 A_i 与理想方案 A^* 之间距离的方法求解各属性的权重系数。

假设方案 A^* 为理想方案,记 $d_i(\mathbf{w}) = \sqrt{\sum_{j=1}^3 (\omega_j r_{ij} - \omega_j)^2}$, 该公式反映了方案 A_i 与理想方案 A^* 之间的距离,显然 $d_i(\mathbf{w})$ 越小越好。由于事先通过系统连通性判断去除了部分非关键节点,因此,可以说每一个节点都是非劣的,并且不存在任何偏好关系,因而可以建立单目标决策模型:

$$\begin{cases} \min d^2(\mathbf{w}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 (\omega_j r_{ij} - \omega_j)^2 \\ \text{s. t. } \begin{cases} \sum_{j=1}^3 \omega_j = 1 \\ \omega_j \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

求解此模型,可得到最优解 $\mathbf{w}^* = (\omega_1^*, \omega_2^*, \omega_3^*)^T$, 将其带入式(3)~(10),即可得到节点的综合指标值排序。构建拉格朗日函数求解模型(10),可得到权重系数的求解公式:

$$\omega_j = \frac{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - 1)^2}}}{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - 1)^2} \quad (11)$$

关键节点识别流程如图 3 所示。

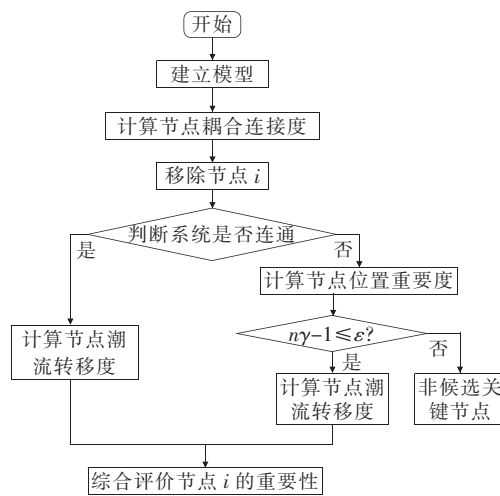


图 3 关键节点识别流程

Figure 3 Flow chart of the critical node identification

3 薄弱节点分裂运行策略

电力系统存在电力外送的枢纽节点,这类节点是功率的汇集点,通过文 2 所提的关键节点识别方法可以识别这类节点。若这类节点发生故障,将会引起潮流的大范围转移,进而引发电力系统的连锁故障。显然节点潮流转移度是影响电力系统节点成为功率输送枢纽节点的重要因素。因此,为了减小因大规模电网本身结构特性存在的安全隐患所引发的大停电事故的概率,可以通过减小关键节点潮流

转移度指标来降低关键节点的重要度, 该文提出薄弱节点分裂运行策略, 薄弱节点分裂运行示意如图4所示。

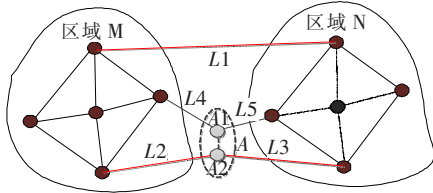


图4 节点分裂运行示意

Figure 4 Diagram of node splitting operation

假设图4中A为该系统的的关键节点, A节点将系统分为M、N两区域, 两区域之间通过L1、L2、L3、L4、L5等线路相连。节点分裂运行策略是将A节点分裂为A1、A2节点, 同时与A1节点相连的线路是L4、L5; 与A2节点相连的线路是L2、L3; 且A1、A2节点间无电气联系。显然节点分裂运行并未改变系统整体拓扑结构, 针对已经成型的大规模系统采取该防御措施既经济又实用。

若节点不分裂运行, 即A1、A2节点合并为A节点, 若移除A节点, L2、L3、L4、L5线路将无法进行电力传输, 则区域M、N之间将不得不通过L1线路来进行电力传输, 这样因为节点A的移除将使得系统的潮流发生大范围转移, L1的潮流转移比也将大幅增加;

若节点分裂运行, 以移除A1节点为例进行说明, 移除A1节点后, 由于A1、A2节点间无电气联系, 因此与A2节点相连的L2、L3线路能够正常运行, 显然移除A1节点后, A1节点附近的A2节点将替代A1节点的部分有功功率传输, 系统可以缓解大面积的潮流转移现象。

4 算例分析

对华中电网某省系统2016年夏大运行方式进行校验计算。

4.1 关键节点识别

采用该文所提方法计算节点耦合度, 依次移除华中电网某省的电网节点, 判断系统连通性, 计算节点潮流转移度、节点位置重要度。节点潮流转移有2个结果: ①局部潮流转移度, 所观测线路为省内联络线(文献[15]给出了该省内薄弱联络线, 有桃乡—

资阳线路、东坡—彭祖线路、谭家湾—南充线路); ②全局潮流转移度, 所观测线路为省间联络线(文献[15]认为省间联络线均为薄弱线路)。

在该省部分节点耦合连接度 α 的计算中, 移除节点后计算网络潮流转移度 β 和节点位置重要度 γ , 并采用多属性决策方法给出综合指标重要度排序结果, 如表1所示; 综合指标的权重系数如表2所示。结果表明, 该省内尖山附近节点均有较大的节点潮流转移度和节点电气耦合连接度, 且针对该省特定网络的节点, 其节点潮流转移度重要性要大于节点电气耦合连接度重要性。以尖山节点为例可知, 在移除尖山节点前, 九江、彭祖、新津3个区域的节点共向尖山节点注入2600 MW, 局部潮流示意如图5所示。

当移除尖山节点后, 原本通过尖山节点往外输送的功率将不得不通过其他节点或通道来转移, 从该省网络的拓扑结构可知, 川西机组注入尖山节点的潮流将绝大部分通过谭家湾节点向川渝联络线(黄岩—万县线路)转移, 川南机组注入尖山节点的功率将通过资阳节点向川渝联络线(洪沟—板桥线路)转移, 节点潮流转移度计算结果见表1。

该省电网为链式网架结构, 存在很多类似尖山节点这样的节点, 在其移除后系统不连通, 但考虑到该省电网与外部系统通过洪沟—板桥、黄岩—万县线路同步联网, 这类节点在移除后, 即使将系统分隔为2个区域, 主网的发电机容量也很大, 其节点的位置重要度 γ 接近于1, 故这类节点不认为是该省电网系统的关键节点。

表1 节点综合指标重要度排序

Table 1 Ranking of the comprehensive index importance of nodes

节点	综合指标重要度			
	α_i	β_i	γ_i	V_i
尖山	1.213	1.159	1	1.123 8
桃乡	1.313	0.892	1	0.976 7
资阳	0.772	1.148	1	0.963 4
内江	0.304	0.871	1	0.760 3
彭祖	0.769	0.791	1	0.719 4

表2 综合指标权重系数

Table 2 Weighting coefficients of comprehensive indices

w_1	w_2	w_3
0.252 6	0.496 0	0.251 4

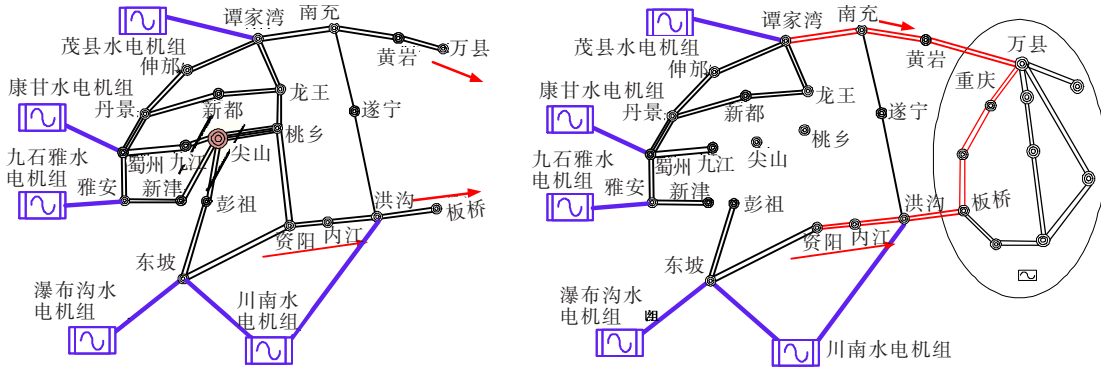


图 5 尖山站点局部潮流示意

Figure 5 Diagram of local power flow for Jianshan station

4.2 尖山节点分裂运行

为了降低尖山母线发生故障后川西北、川南间的电气联系变弱的风险,可将尖山母线分裂运行,尖山主接线如图 6 所示,若断路器 QF1、QF2 断开,则尖山母线分裂为尖山 I、II 母线。九江、彭祖、桃乡 3 个站分别通过 6 回线路和尖山 I 站相连,新津、桃乡 π 入尖山 II 站。尖山 I、II 站并未有电气连接,对应的地理接线如图 7 所示。

采用该文所提关键节点识别方法,分别计算尖山 I、II 站的节点关键度指标,结果如表 3 所示,可以

发现,在尖山分裂运行后,尖山 I、II 站的节点电气耦合连接度和潮流转移度均没有尖山不分裂运行时的指标值大。值得注意的是,尖山 II 站的全局潮流转移度大幅减小,尖山 II 站发生故障后基本不会引起潮流的大范围转移。尖山 I 站的全局潮流转移度有所减小,自然其发生故障后引起省间联络线的功率变化也会相对减小,潮流转移情况相对尖山不分裂运行时有缓解。

表 3 尖山站分裂运行后尖山节点关键指标

Table 3 Critical indices of Jianshan node after splitting operation of Jianshan station

节点	电气耦合连接度	潮流转移度		
		β_j	β_a	β
尖山 I 站	0.781 2	-0.117	0.890	0.487
尖山 II 站	0.710 8	0.216	0.043	0.112
尖山站	1.213 0	-0.018	1.950	1.159

考虑到尖山母线分裂运行后对系统网络拓扑结构几乎无影响,故针对其他节点,在尖山母线分裂运行后,其节点潮流转移度几乎无变化。节点分裂运行后网络电气联系整体来说降低了,对应的节点电气耦合连接度将都会减小。根据文 3 的计算结果可以发现,此时桃乡节点成为该省电网系统最关键的节点。

尖山母线分裂运行虽然未改变该省电网网络的整体结构,但是降低了尖山 I、II 母线同时发生故障的概率。若仅仅是其中一个站发生故障,则故障后还有一个站可以承担电力输送作用。

若仅仅是尖山 II 站发生故障,由于尖山 II 站与尖山 I 站没有直接电气联系,尖山—彭祖电力传输通道受到的影响较小,同时尖山 I 站与桃乡站有直

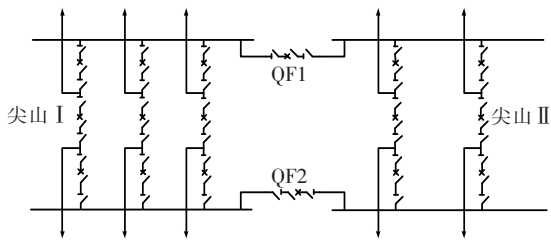


图 6 尖山站主接线

Figure 6 Wiring patterns of Jianshan station

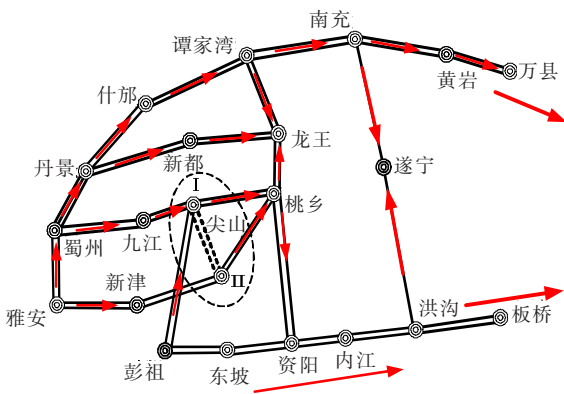


图 7 尖山站分裂运行地理接线

Figure 7 Geographical wiring diagram of Jianshan station splitting operation

接的电气联系,未发生故障的尖山 I 站对桃乡站的电压有一定的支撑作用,又在一定程度上加强了桃乡、资阳站点的电气联系,如图 8 所示,使得川西北、川南间的电气通道并未发生重大改变,潮流也不会发生大面积转移。

若尖山 I 站发生故障,分析拓扑图可以发现,尖山—彭祖电力传输通道会受到影响,但是由于未发生故障的尖山 II 站与桃乡站点有直接的电气联系,将对桃乡站的电压有一定的支撑作用,从而在一定程度上加强了桃乡、资阳站点的电气联系,如图 9 所示,节点分裂后缓解了潮流大面积转移,降低了连锁故障大规模传播的可能。

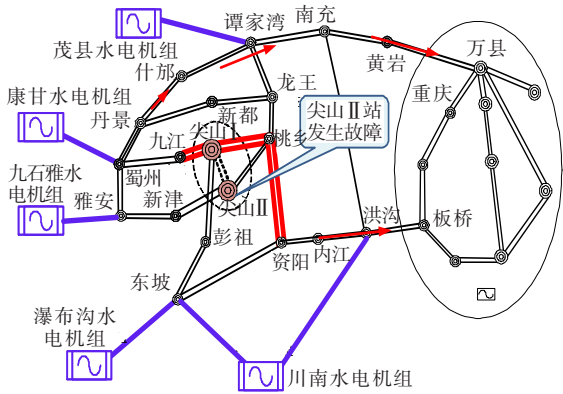


图 8 尖山 II 站发生故障系统拓扑示意

Figure 8 Systematic topological graph of Jianshan II station when fault occurs

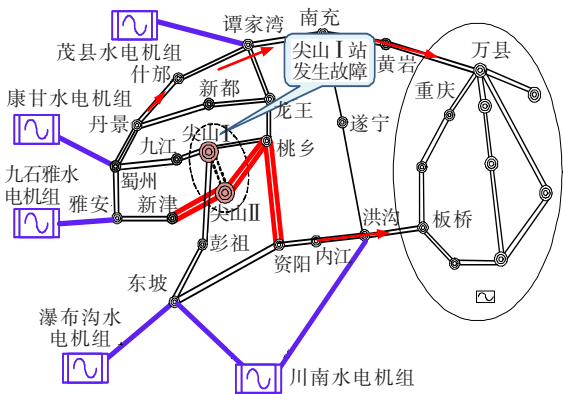


图 9 尖山 I 站发生故障系统拓扑示意

Figure 9 Systematic topological graph of Jianshan I station when fault occurs

4.3 有效性验证

为了验证该文所提方法的有效性,在 PSASP 仿真平台上进行仿真验证,设置故障为尖山—桃乡线路尖山侧发生 $N-2$ 故障。在尖山节点未分裂运行时,尖山 $N-2$ 故障后川渝联络线输送的有功功

率如图 10 所示。结果表明,故障隔离后川渝通道的输送功率增加,引发联络线功率摇摆,最终系统失去稳定,而在尖山节点分裂运行后,根据图 11 所示的仿真曲线可以发现,节点分裂运行后的系统能够保持同步运行。

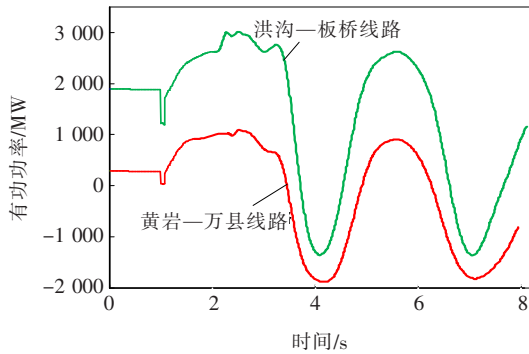


图 10 尖山节点不分裂运行时故障仿真曲线

Figure 10 Simulation curve of Jianshan node faults under no splitting operation

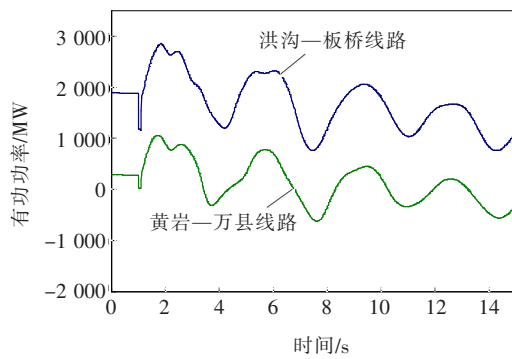


图 11 尖山节点分裂运行时故障仿真曲线

Figure 11 Simulation curve of Jianshan node faults under splitting operation

5 结语

1) 大规模电网本身结构特性存在的安全隐患是大停电事故发生的内因。

2) 基于线路潮流转移比概念,提出了节点潮流转移度指标,结合省内和省间联络线对系统安全稳定影响的程度,定义局部和全局潮流转移度来表征节点移除后系统潮流大范围转移情况。

3) 考虑到节点移除后系统存在不连通的可能,提出了节点位置重要度概念,结合节点电气耦合连接度和节点潮流转移度,运用多属性决策方法综合评价节点重要性。

4) 在电力系统关键节点后,通过指标权重系数发现,节点潮流转移度是影响电力系统节点成为功

率输送的枢纽节点重要因素。基于此提出了节点分裂运行策略,能够有效降低节点潮流转移度。

参考文献:

- [1] 刘振亚,张启平,董存,等.通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究[J].中国电机工程学报,2014,34(16):2513-2522.
LIU Zhenya, ZHANG Qiping, DONG Cun, et al. Efficient and security transmission of wind, photovoltaic and thermal power of large-scale energy resource bases through UHVDC projects[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2513-2522.
- [2] 李明节.大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J].电网技术,2016,40(4):985-991.
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.
- [3] 汤涌,郭强,周勤勇,等.特高压同步电网安全性论证[J].电网技术,2016,40(1):97-104.
TANG Yong, GUO Qiang, ZHOU Qinyong, et al. Security evaluation for UHV synchronized power grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 97-104.
- [4] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架(一)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 lines to coordinated defending[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 8-16.
- [5] Diego Cirio, Dario Lucarella, Stefano Massucco. On-line dynamic Security assessment to mitigate the risk of blackout in the Italian power system[J]. European Transactions on Electrical Power, 2008, 18(8): 784-801.
- [6] 丁茂生,孙维佳,蔡星浦,等.电力系统极端事件的风险评估与防范[J].中国电力,2020,53(1):32-39+65.
DING Maosheng, SUN Weijia, CAI Xingpu, et al. Risk assessment and prevention of extreme events in power systems[J]. Electric Power, 2020, 53(1): 32-39+65.
- [7] 竺炜,黄明涛,钟鹏.基于状态拓扑模型的电网安全稳定研究及展望[J].电力科学与技术学报,2016,31(1):70-77.
ZHU Wei, HUANG Mingtao, ZHONG Peng. Research and prospect of grid security and stability based on state topology model[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(1): 70-77.
- [8] Wang J W, Rong L L. Cascade-based attack vulnerability on the US power grid[J]. Safety Science, 2009, 47(10): 1332-1336.
- [9] 徐林,王秀丽,王锡凡.基于电气介数的电网连锁故障传播机制与积极防御[J].中国电机工程学报,2010,30(13):61-68.
XU Lin, WANG Xiu-li, WANG Xi-fan. Cascading failure mechanism in power grid based on electric betweenness and active defence[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 61-68.
- [10] 杨文辉,毕天姝,黄少锋,等.基于电网生存性评估的关键线路识别方法[J].中国电机工程学报,2011,31(7):29-35.
YANG Wenhui, BI Tianshu, HUANG Shaofeng, et al. An approach for critical lines identification based on the survivability of power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 29-35.
- [11] 朱天瞳,丁坚勇,田世明,等.基于复合脆性关联度与改进 Floyd 算法的连锁故障预测[J].电力科学与技术学报,2018,33(4):58-65+72.
ZHU Tiantong, DING Jianyong, TIAN Shiming, et al. Cascading failure forecast based on compound vulnerability relevance and improved Floyd algorithm [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(4): 58-65+72.
- [12] 任鹏,李翀,陶鹏,等.基于加权熵 TOPSIS 法的电网节点脆弱度评估[J].电力科学与技术学报,2019,34(3):143-149.
REN Peng, LI Chong, TAO Peng, et al. Node vulnerability evaluation for power network based on weighted entropy TOPSIS method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 143-149.
- [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] 于会,刘尊,李勇军.基于多属性决策的复杂网络节点重要性综合评价方法[J].物理学报,2013,62(2):1-9.
YU Hui, LI Zun, LI Yongjun. Key nodes in complex networks identified by multi-attribute decision-making method[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(2): 1-9.
- [15] Dejun Shao, Shun Zhang, Youping Xu, et al. Controlled islanding strategy of central china power grid based on branch potential energy[C]// IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Xi'an, China, 2016.