

基于地理分区的关键输电断面识别

为提高电网实时监控水平,提出一种基于地理分区的关键输电断面识别方法。修正地理分区以得到电网分区结构图和各分区间联络线。利用直流潮流法计算联络线断开时其他联络线支路的支路开断分布系数,筛选得到各联络线所属的输电断面。考虑断面输送潮流、断面平均安全裕度和断面支路最小安全裕度,定义断面重要度指标识别关键输电断面。该方法在搜索输电断面时避免了计算电网所有割集,同时不需计算断面功率输送极限即可得到输电断面关键性排序,大幅度减少了计算量。利用IEEE 39节点系统对该方法的正确性进行了验证。

徐 岩 郅 静/新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学)

0 引言

加强电网监控对保障系统安全稳定运行十分重要,实际电网规模庞大,对每个元件都进行严密监控是不现实的。运行人员通常结合运行经验及地理属性对电网进行分区,利用区域间输电断面代替单一元件对电网进行监测和控制,从而使调度人员的工作更加有针对性,方便了电力系统调度与运行工作的开展。但传统的基于人工经验识别输电断面的方法难以适应在线实时分析的需要,因此输电断面自动识别具有重大意义。

文献[1]在地理分区的基础上计算电网的所有割集作为初始断面,从中筛选满足约束条件且安全裕度较小的关键输电断面,但该方法搜索初始断面和筛选输电断面时的计算量较大;文献[2]对各地理分区的边界节点分区进行了优化,

利用图论搜索输电断面,但是该方法在识别关键断面时,需要计算各断面的静稳极限潮流,计算复杂;文献[3-6]将与过载或故障支路联系紧密的相关线路集合作为输电断面,该类方法依赖于过载或故障支路的选取,分析结果仅用于紧急控制,无法用于电网实时状态的监测。

针对已有方法的缺点,提出一种基于地理分区的关键输电断面识别方法。以电网地理分区为基础,对树枝节点及分区交界节点分区进行优化,得到电网的分区结构图和各分区间联络线。利用直流潮流法计算联络线断开时其他联络线支路的支路开断分布系数,筛选得到各联络线所属的输电断面。考虑断面输送潮流、断面平均安全裕度和断面支路最小安全裕度,定义断面重要度指标识别关键输电断面。该方法避免了计算电网的所有割集,不需计算断面功率输送极限即可得到输电断面关键性排序,大幅度减少了计算量。

1 输电断面

结合电网运行专家给出的输电断面选取结果,已有文献对输电断面特征进行总结。特征1:输电断面是电网的割集;特征2:组成输电断面的各条支路有功潮流方向一致,对于轻载支路或传输的有功相对于其他支路较小的支路允许潮流反向;特征3:组成输电断面的多条支路联系紧密,相互之间的支路开断分布系数较大。

系统输电断面中潮流重、安全裕度



徐 岩/副教授

关键词/Keywords

电力系统·
输电断面·
地理分区·
直流潮流法·
关键输电断面·

国家自然科学基金(50777016),中央高校基本科研业务费专项资金(NO.12MS110)。

小,对电网安全性有重要影响的断面为关键输电断面。

2 基于地理分区的关键输电断面识别

2.1 地理分区的修正

2.1.1 树枝节点分区修正

以电网地理分区为基础,若某树枝节点仅通过一条支路与环相连,且与该树枝节点相连的其他节点均为树枝节点,则将该节点及与其相连的所有树枝节点都归入所连的环所属的区域。如图1所示,节点c为只通过一条支路c-d与环相连的树枝节点,并且与节点c相连的节点a和节点b均为树枝节点。因此,将节点a、节点b和节点c均归入节点d所属的分区中。

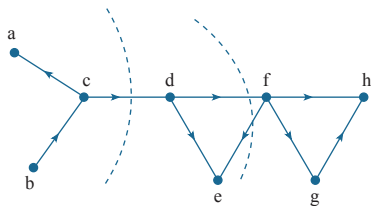


图1 网络分区示意图

2.1.2 交界节点分区修正

为保证输电断面中各条支路有功潮流方向一致,对分区之间的交界节点归属区域进行修正。若支路 l_{ij} 的潮流与该支路所属联络线的总体潮流方向相反,计算支路 l_{ij} 的潮流量与联络线其余支路潮流和之比,若该比值小于给定阈值 λ ,则认为联络线潮流方向一致,交界节点 i 和 j 的分区合理;若该比值超过 λ ,则需对节点 i 或 j 的分区进行调整,将 i 并入 j 所属分区或相反,检验此时分区间联络线潮流方向,直至潮流方向一致。已有方法证明,优先修改节点度数小的节点更易达到一致性要求。

观察图1,支路d-f和e-f构成联络线,但两支路潮流方向相反,设线路d-f潮流较大,且支路e-f潮流与d-f潮流之比大于给定阈值,因此该联络线不满足潮流方向一致性,需要对支路e-f的两端节点分区进行修正,改变节点度数较小的节点e的分区,此时联络线组成变为支路d-f和支路d-e,满足潮流方向一致性,交界节点分区得到修正。取

阈值 $\lambda=0.01$,实际电网运行中依情况而定。

2.2 输电断面的搜索

利用上文所述方法对地理分区进行修正,得到电网分区结构图和各分区间联络线。对各联络线进行开断模拟,利用直流潮流法计算联络线断开时其他联络线支路的支路开断分布系数,筛选得到各联络线所属的输电断面。

2.2.1 直流潮流法

设电网中有 n 个节点,采用直流潮流法时,其潮流满足

$$P = B'\theta \quad (1)$$

式中, P 为除平衡节点外的节点注入有功功率列向量, $P \in R^{(n-1) \times 1}$; θ 为除平衡节点外的节点电压相角列向量, $\theta \in R^{(n-1) \times 1}$; B' 为直流节点电纳矩阵,其中无对应于平衡节点的相应行和相应列,

$$B' \in R^{(n-1) \times (n-1)}, B'_{ij} = b_{ij}, B'_{ii} = -\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n B'_{ij}。$$

设某联络线 L 由 l_{ef} 和 l_{km} 两条支路构成,当该联络线断开时, B' 矩阵和 θ 列向量将偏离正常情况下的值,得到

$$P = (B' + \Delta B^{ef} + \Delta B^{km})(\theta + \Delta\theta) \quad (2)$$

式中, $\Delta\theta$ 为 θ 列向量的偏离量; ΔB^{ef} 、 ΔB^{km} 分别为单一支路 l_{ef} 开断和单一支路 l_{km} 开断时电导偏离矩阵, ΔB^{ef} 满足 $\Delta B^{ef}_{ef} = -b_{ef}$, $\Delta B^{ef}_{fe} = -b_{fe}$, $\Delta B^{ef}_{ee} = b_{ef}$, $\Delta B^{ef}_{ff} = b_{ef}$; ΔB^{km} 满足 $\Delta B^{km}_{km} = -b_{km}$, $\Delta B^{km}_{mk} = -b_{mk}$, $\Delta B^{km}_{kk} = b_{km}$, $\Delta B^{km}_{mm} = b_{km}$; ΔB^{ef} 、 ΔB^{km} 中其他元素为0。

将式(2)展开可得

$$P = B'\theta + \Delta B^{ef}\theta + \Delta B^{km}\theta + B'\Delta\theta + \Delta B^{ef}\Delta\theta + \Delta B^{km}\Delta\theta \quad (3)$$

将式(1)代入式(3)中可得

$$\Delta\theta = -[B' + \Delta B^{ef} + \Delta B^{km}]^{-1}(\Delta B^{ef} + \Delta B^{km})\theta \quad (4)$$

当联络线断开后,其他联络线中某支路 l_{ij} 的潮流为

$$\begin{aligned} P_{ij(1)} &= -b_{ij}(\theta_{i(1)} - \theta_{j(1)}) \\ &= -b_{ij}(\theta_{i(0)} - \theta_{j(0)}) - b_{ij}(\Delta\theta_i - \Delta\theta_j) \\ &= P_{ij(0)} + \Delta P_{ij} \end{aligned} \quad (5)$$

受联络线断开引起的潮流转移影响,支路 l_{ij} 的

潮流增量为

$$\Delta P_{ij} = -b_{ij}(\Delta \theta_i - \Delta \theta_j) \quad (6)$$

因此, 联络线 L 断开后, 支路 l_{ij} 的支路开断分布系数为

$$\lambda_{ij}^L = \frac{\Delta P_{ij}}{P_L} = \frac{\Delta P_{ij}}{P_{\text{ef}(0)} + P_{\text{km}(0)}} \quad (7)$$

式中, P_L 为联络线 L 断开前所传输的有功功率; $P_{\text{ef}(0)}$ 和 $P_{\text{km}(0)}$ 分别为支路 l_{ef} 和 l_{km} 断开前功率。

当开断的联络线中包含两条以上支路时, 利用直流潮流法仍可以快速准确地计算其他联络线支路的支路开断分布系数, 推导过程类比式(1)~式(7)。

2.2.2 基于地理分区的输电断面搜索

基于地理分区的输电断面搜索步骤如下。

1) 对电网地理分区进行修正, 得到电网的分区结构图和各分区间联络线。

2) 以联络线 L 为例说明搜索该联络线所属输电断面的方法: ①判断联络线 L 内所有支路是否构成割集, 若是, 则联络线 L 本身是一个输电断面, 搜索结束; 若否, 断开联络线 L 内所有支路, 将联络线 L 归入已开断联络线集合。②利用直流潮流法计算已开断联络线中所含支路断开后, 其余联络线内支路的支路开断分布系数。③选支路开断分布系数最大的支路所属的联络线为预开断联络线。④判断预开断联络线潮流与已开断联络线潮流方向是否一致, 若是, 则转到⑤; 若否, 判断预开断联络线潮流与已开断联络线潮流之比是否小于给定阈值 λ , 若是, 则转到⑤; 若否, 将支路开断分布系数最大的支路的开断分布系数值置0, 将该支路所属的联络线放回未开断联络线集合, 转到③。⑤判断预开断联络线与已开断联络线能否构成电网割集, 若能, 则预开断联络线与已开断联络线构成输电断面, 断面搜索结束; 若否, 则将预开断联络线断开, 归入已开断联络线集合, 重复步骤②~步骤⑤, 直至预开断联络线与已开断联络线可构成电网割集。

利用上述搜索方法得到的输电断面能很好地满足上文所述的断面特征, 其中特征1显然满足,

对于特征2和特征3分析如下: 利用交界节点分区修正和上述搜索步骤④, 可以保证所得输电断面满足上述断面特征2, 即断面潮流方向一致性; 利用上述搜索步骤③, 某联络线断开后, 选取支路开断分布系数最大的支路所属的联络线为预开断联络线, 从而保证所得输电断面满足上述断面特征3, 即断面支路联系紧密性。

2.2.3 确定关键输电断面

系统中潮流重、安全裕度小, 对电网安全性有重要影响的输电断面为关键输电断面。文献[1-2]分别利用断面暂态稳定极限功率和静稳极限功率计算断面重要度, 计算过程复杂。本文考虑断面输送潮流、断面平均安全裕度和断面支路最小安全裕度, 定义断面重要度指标识别关键输电断面。

设系统中共有 n 个输电断面, 其中断面 s 的功率是 P_s , 按照式(8)将 P_s 归一化为

$$P'_s = \frac{P_s - \min\{P_k\}}{\max\{P_k\} - \min\{P_k\}} \quad k=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

式中, $\max\{P_k\}$ 、 $\min\{P_k\}$ 分别为电网输电断面功率的最大值和最小值。

设断面 s 中第 i 条支路的功率为 $P_{s(i)}$, 其最大传输功率为 $P_{s(i)\text{max}}$, 该支路的功率裕度为

$$Y_{s(i)} = \frac{P_{s(i)\text{max}} - P_{s(i)}}{P_{s(i)\text{max}}} \quad (9)$$

设该断面共有 m 条支路, 则该断面所有支路的平均功率裕度为

$$\bar{Y}_s = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Y_{s(i)} \quad (10)$$

断面的安全裕度不仅与断面支路的平均负载程度有关, 还与断面中负载程度最大的支路密切相关。一旦断面中某条支路发生过载, 很容易导致整个断面的切除, 而断面中负载程度最大的支路为断面中最易过载的支路。因此, 断面的安全裕度不仅与断面各支路的平均功率裕度有关, 还与断面中支路的功率裕度最小值 $\min\{Y_{s(i)}\}$ 密切相关。

综合考虑输电断面潮流和断面裕度, 定义断

面重要度指标为

$$D_s = P'_s - \ln(\bar{Y}_s) - \ln(\min\{Y_{s(i)}\}) \quad (11)$$

式(11)综合考虑了断面输送潮流、断面平均安全裕度和断面支路最小安全裕度对断面重要度的影响。当断面支路的功率裕度都很大时, $\ln(\bar{Y}_s)$ 和 $\ln(\min\{Y_{s(i)}\})$ 都接近于0。断面的重要度主要由其输送的功率 P'_s 决定;当断面传输功率相近时,则具有较小功率裕度的断面重要性更大。利用断面重要度指标 D_s 对各断面的重要度进行排序,可得到关键输电断面。

需要说明的是,支路最大传输功率既受到热稳定功率极限的限制,也受到其后备保护整定值所对应的最小传输功率的限制,应将支路最大允许传输功率取为上述二者中的最小值^[10]。本文将支路热稳定功率极限作为其最大传输功率,实际电网运行中依情况而定。

3 仿真算例

在IEEE 39节点系统中,采用文献[2]中的地理分区对本文方法进行验证,IEEE 39节点系统及其地理分区情况如图2所示。

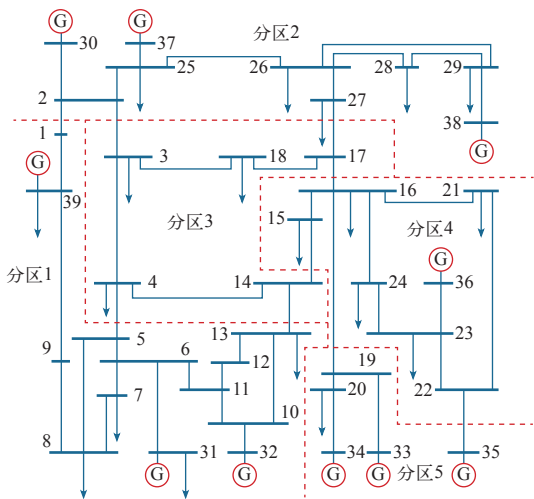


图2 IEEE 39节点系统地理分区图

利用上文所述方法对地理分区进行修正。节点19、节点20、节点33、节点34和节点35都是仅通过一条支路与环相连的树枝节点,且与该树枝节点相连的其他节点均为树枝节点,因此将节点19、节点20、节点33、节点34和节点35都归入分

区4。

修正交界节点分区以保证各分区间联络线满足潮流方向一致性。以分区2、分区3之间的联络线 L_{2-3} 为例进行说明,该联络线由支路 l_{17-27} 和 l_{2-3} 组成,支路 l_{2-3} 潮流较大,两条支路潮流方向相反,且潮流大小之比大于阈值,因此要对支路 l_{17-27} 两端节点分区进行修正,优先更改度数较小的节点27的分区,此时 l_{26-27} 和 l_{2-3} 组成联络线,满足潮流方向一致性。因此分区2、分区3之间的联络线 L_{2-3} 组成改为 l_{26-27} 和 l_{2-3} 。其余分区间联络线按上述步骤进行潮流方向一致性校验,得到分区3、分区4之间的联络线组成由 l_{16-17} 、 l_{14-15} 改为 l_{16-17} 和 l_{16-15} ,其余分区间联络线组成不变。

对地理分区修正后的系统图如图3所示。

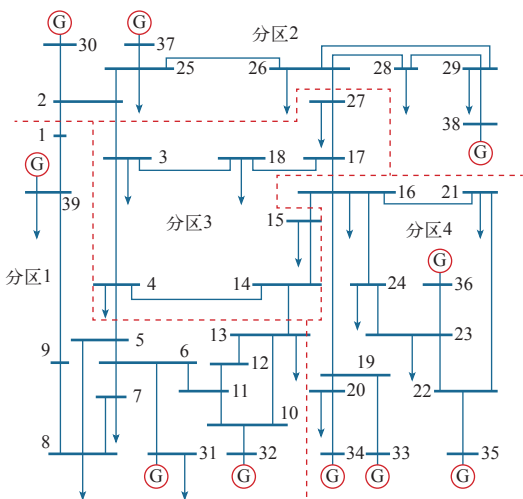


图3 IEEE 39节点系统优化分区图

对各联络线进行开断模拟,利用基于地理分区的输电断面搜索方法识别输电断面,并利用确定关键输电断面方法计算各断面重要度,结果如下表所示。

表 输电断面及其重要度

开断联络线	支路开断分布系数		断面
	最大的联络线支路	输电断面	重要
	(支路开断分布系数)		度
L_{1-2} (l_{2-1})	l_{2-3} (0.812)	$l_{2-1}, l_{2-3}, l_{26-27}$	2.351
L_{1-3} (l_{3-4}, l_{3-14})	l_{2-3} (0.810)	$l_{3-4}, l_{3-14}, l_{2-3}, l_{26-27}$	2.972
L_{2-3} (l_{2-3}, l_{26-27})	l_{2-1} (0.979)	$l_{2-3}, l_{26-27}, l_{2-1}$	2.351
L_{3-4} (l_{16-17}, l_{16-15})	无	l_{16-17}, l_{16-15}	1.186

仿真分析如下。

1) 观察上表,该方法所得输电断面能很好地满足输电断面特征,同时,所得输电断面识别结果及断面重要度排序与文献[2]完全相同,证明了该方法的正确性。

2) 在地理分区的基础上搜索输电断面时,该方法避免了搜索电网所有割集,对各联络线进行开断模拟,利用直流潮流法计算联络线断开时其他联络线支路的支路开断分布系数,筛选得到各联络线所属的输电断面,减少了计算量。

3) 考虑断面输送潮流、断面平均安全裕度和断面支路最小安全裕度,定义断面重要度指标识别关键输电断面,不需计算断面暂态稳定极限功率和静稳极限功率,在保证断面重要度排序正确性的同时,减少了计算量。

4 结束语

提出一种基于地理分区的关键输电断面识别方法。修正地理分区以得到电网分区结构图和各分区间联络线;利用直流潮流法计算部分联络线断开时其他联络线支路的支路开断分布系数,筛选得到各联络线所属的输电断面;考虑断面输送潮流、断面平均安全裕度和断面支路最小安全裕度,定义断面重要度指标识别关键输电断面。该

方法避免了计算电网所有割集,不需计算断面功率输送极限即可得到输电断面关键性排序,大幅度减少了计算量。

参考文献

- [1] 赵峰,孙宏斌,张伯明.基于电气分区的输电断面及其自动发现[J].电力系统自动化,2011,35(5):42-46.
- [2] 王涛,李渝,顾雪平,等.考虑地理分区边界优化的电网关键输电断面辨识[J].电工技术学报,2014,29(4):220-228.
- [3] 周德才,张保会,姚峰.基于图论的输电断面快速搜索[J].中国电机工程学报,2006,26(12):32-38.
- [4] 程临燕,张保会,郝治国,等.基于线路功率组成的关键输电断面快速搜索[J].中国电机工程学报,2010,30(10):50-56.
- [5] 倪宏坤,徐玉琴.基于动态规划原理分支界限算法的关键输电断面搜索方法[J].华北电力大学学报,2009,36(4):11-15.
- [6] 苗世洪,马帅,尚亚男,等.基于割点和路径搜索的输电断面快速识别方法[J].电力系统自动化,2014,38(2):39-45.

(收稿日期:2015-06-04) EA



典藏技术 革新应用

专业专注

时刻关注并推动中国电气技术的发展



《电气应用》是一本拥有光荣发展历程的全国优秀科技期刊。

自1982年创刊至今,已走过了33年艰苦创业、改革发展的光辉历程。其所荣获的“全国优秀期刊、中国期刊方阵‘双奖期刊’和国家期刊奖‘百种重点期刊’、中文核心期刊”等诸多荣誉见证了编辑们的专业与勤奋,也博得了广大读者和业内专家的支持与厚爱,在众多电类专业科技期刊中颇具影响力。