

基于局部拓展理论的直流多馈入系统分区方法

曹 昕¹, 韩民晓¹, 马立民¹, 郭知非², 蔡万通², 张夏辉¹, 文 俊¹

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510663)

摘要: 针对多回电网换相型高压直流输电(LCC-HVDC)馈入的交流系统容易发生同时换相失败的问题,本文采用了对多馈入系统进行电网分区的方案,以隔断多回直流之间的耦合,减少发生同时换相失败概率。首先,对多馈入系统进行N-1故障扫描,找出三永交流故障能够引起多回直流发生同时换相失败的线路集合,并将线路负载率较高的线路从线路集合中剔除。随后,基于局部拓展理论对系统中的节点进行自下而上的聚合,形成初始分区。在此过程中,首先给出了考虑PV节点和传统直流的电压/无功灵敏度矩阵的计算方法,随后采用节点聚合度函数和分区适应度函数分别计算节点聚合度和分区适应度。最后,综合考虑线路集合和分区短路比对分区结果进行修正,并给出了分区方案的流程。以IEEE 39节点系统为参考给出了算例,对整个分区过程进行验证。并结合某实际电网给出了分区方案。

关键词: 多馈入系统; 传统直流; 电网分区; N-1预想事故集; 局部拓展理论

DOI: 10.12067/2101037

文章编号: 1003-3076(2021)06-0032-11

中图分类号: TM721.1

1 引言

随着大规模电网建设,我国局部电网逐渐形成了多回电网换相型高压直流输电(Line Commutated Converter based High Voltage Direct Current, LCC-HVDC,以下简称传统直流)密集馈入的受端交流电网(以下简称多馈入系统)^[1]。截至2018年底,有8回直流馈入华东电网^[2];截至2019年底,有10回直流馈入广东电网^[3]。

多馈入系统存在发生同时换相失败的风险。当交流系统发生故障,造成换流母线电压跌落引起直流发生换相失败,与其电气距离较近的其他传统直流受交流故障影响也会同时发生换相失败。若故障不能及时清除,可引起多次换相失败,严重时甚至停运。此时,交流系统因有功的大量缺失导致频率不稳定,引发系统解列的风险^[4,5]。

扩大交流系统规模是解决上述问题的方法之一。但是,文献[6]指出同步电网的规模受频率稳定、低频振荡频率和同步支持效应三方面的约束,仅凭扩大交流系统规模可能会带来其他问题。因此,

南方电网公司拟采用传统直流分区馈入的运行方式^[7]。文献[8]将广东电网分为四个组团,将传统直流分区馈入交流系统,分区之间采用柔性直流连接。初步解决了广东电网存在的问题。此外,国网河南省公司也开展了采用柔性直流对河南省网进行分区的研究^[9]。

现有的针对多馈入系统分区方法的研究较少,且以评价模型和N-1校验两种方法为主。文献[10,11]以多馈入相互作用因子(Multi-Infeed Interaction Factor, MIIF)、多馈入短路比和频率偏差因子为指标,建立评价模型。该方法通过评价备选方案获取最优分区,且没有考虑N-1下分区方案是否满足要求。文献[12,13]对线路进行N-1故障扫描,搜索引起多回直流同时换相失败的线路,在这些线路中选取考虑柔直改造的线路,以增大传统直流之间的电气距离。该方法并没有将两回直流之间的交流联系完全断开。

目前,对电网分区的研究多是针对无功电压分区控制以实现电力系统稳定运行^[14]。文献[15]采用了以边介数^[16]聚类的方法进行电网分区。文献

收稿日期: 2021-01-20

基金项目: 直流输电技术国家重点实验室开放基金项目(SKLVHDC-2020-KF-19)

作者简介: 曹 昕(1994-),男,新疆籍,博士研究生,研究方向为电力电子在电力系统中的应用;

韩民晓(1961-),男,北京籍,教授,博士生导师,研究方向为电力电子在电力系统中的应用。

[17-20]研究了社团理论在电网分区中的应用。文献[21]提出了基于局部拓展的社区发现算法(Local Fitness Measure, LCM),可以选择起始节点实现最终分区。考虑到传统直流发生换相失败多是由换流母线的电压不足引起的^[22],以换流母线节点作为初始节点开始聚合更能反映分区节点间的电压/无功关系。

针对多馈入系统的分区问题,本文提出了一种主动获取分区方案的方法。首先,通过剔除 N-1 预想事故集中负载率较高的线路得到可开断线路集合。随后,根据全系统电压/无功灵敏度,基于局部拓展理论计算分区适应度,给出了分区过程。充分考虑可开断线路集合和分区短路比对分区结果进行修正。文章以 IEEE 39 节点模型为基础,建立了两回传统直流馈入的多馈入系统。给出了可开断线路集合,计算了全系统灵敏度矩阵,对分区过程和相关数据进行了展示,并验证了分区可行性。最后,结合某实际电网数据,给出了分区方案,并在 PSD-BPA 中验证了分区可行性。

2 分区可开断线路集合

对多馈入传统直流系统进行分区,首先需要确定分区时可以开断的线路集合。随后,找出线路集合中负载率较高的线路并从集合中剔除,给出最终的可开断线路集合。

2.1 以 N-1 预想事故初步确定可开断线路集合

多馈入传统直流系统中,当交流故障时,可能会引起电气距离较近的多回直流同时发生换相失败。由换流母线及其附近线路的故障造成的换流母线电压跌落是引起换相失败的重要原因之一。这种情况下,多馈入系统发生同时换相失败的发展过程描述为如图 1 所示。

对多馈入系统做 N-1 故障扫描,对于每回传统直流,标记出能够引起该回直流发生换相失败的线路,构成换相失败线路集合。两回传统直流的换相失败线路集合的重叠部分所对应的线路,即是可开断线路集合。其示意图如图 2 所示。

2.2 剔除高负载率线路

负载率较高的线路说明该线路向负荷密集区域供电,开断该线路会使潮流大范围转移,影响交流系统的安全稳定运行。因此,需要从可开断线路集合中剔除这些线路。

在 N-1 下,通过潮流计算可以计算出各条线路

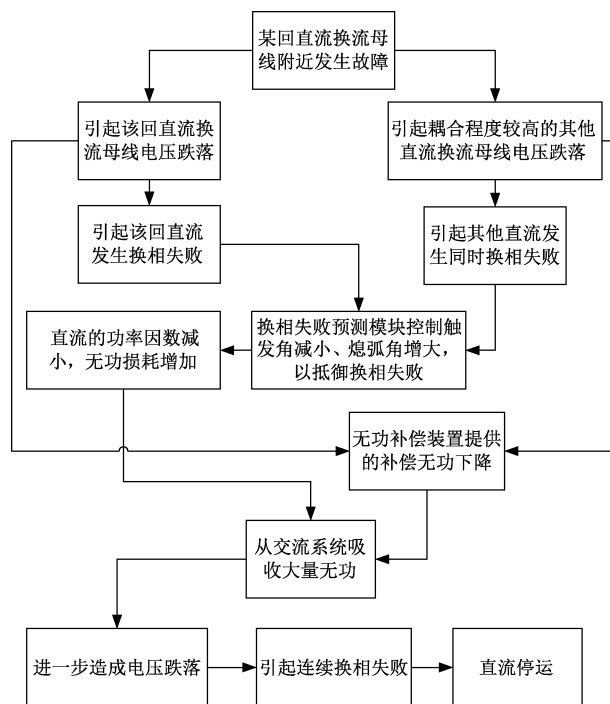


图 1 同时换相失败发展过程

Fig. 1 Process of simultaneous commutation failure

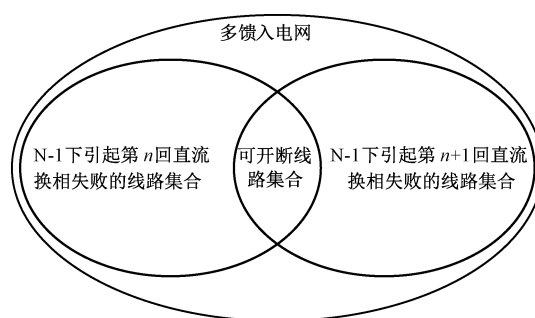


图 2 以 N-1 预想事故初步确定可开断线路集合

Fig. 2 Initial aggregate of interruptible lines based on N-1

传输的功率。考虑线路热稳定约束可以给出各条线路的负载率。将负载率由低到高排序,优先考虑负载率较低的线路开断,更新可开断线路集合,从中挑选可开断的输电断面割集。

3 基于电压/无功灵敏度的分区方法

考虑到传统直流发生换相失败多是由交流故障造成换流母线电压跌落引起的,同时系统的无功功率平衡与节点电压稳定关系密切。因此,可基于社区理论,设置多馈入系统的分区数量为馈入的传统直流回数,对与传统直流换流母线的电压/无功灵敏度相似的节点进行合并,自下而上由小分区逐渐合并成大分区,形成初步分区方案。

3.1 考虑 PV 节点和传统直流的电压/无功灵敏度矩阵

对于交流系统,通过计算雅可比矩阵的逆矩阵可以获得系统中 PQ 节点的电压/无功灵敏度。其表达式如下:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} &= J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = S_{PQ} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} S_{P\theta} & S_{Q\theta} \\ S_{PU} & S_{QU} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, θ 、 U 、 P 和 Q 分别为节点相角、电压、有功和无功功率的列向量; J 为 PQ 节点的雅可比矩阵; J 的逆矩阵,即 S_{PQ} 表示 PQ 节点的电压/无功灵敏度矩阵; $S_{P\theta}$ 、 $S_{Q\theta}$ 、 S_{PU} 和 S_{QU} 为 S_{PQ} 的分块矩阵,分别表示各节点注入有功、无功对相角的灵敏度矩阵,各节点注入有功、无功对电压幅值的灵敏度矩阵。

对于高电压等级交流系统,各元件的电抗远远大于电阻,此时可认为,各节点的相角只与有功有关,各节点的电压幅值只与无功有关。则各 PQ 节点电压/无功灵敏度可以描述为:

$$\Delta U / \Delta Q = S_{QU} \quad (2)$$

式(2)仅是考虑了 PQ 节点的电压/无功灵敏度,对于全系统的电压/无功灵敏度,还需计及 PV 节点以及传统直流的特性对各节点的影响。

3.1.1 传统直流外特性及其对节点的影响

当传统直流整流侧采用定功率控制、逆变侧采用定熄弧角控制时,直流注入的有功功率与换流母线电压幅值几乎无关。此时,其逆变侧外特性可描述为:

$$Q_{LCC} = -P_{LCC} \tan \varphi + \omega B_c U^2 \quad (3)$$

式中, P_{LCC} 、 Q_{LCC} 分别为传统直流注入交流系统的有功和无功功率; φ 为传统直流的功率因数角; ω 为系统角频率; B_c 为无功补偿装置的等效电纳; U 为换流母线电压。可建立功率因数角 φ 和换流母线电压 U 的关系为:

$$\varphi(U) = \tan \left[\arccos \left(\cos \gamma - \frac{X i_{dc}}{\sqrt{2} k_T U} \right) \right] \quad (4)$$

式中, γ 为熄弧角; X 为换相电抗; i_{dc} 为直流电流; k_T 为换流变压器变比。将式(4)代入式(3)中,可以建立传统直流的功率因数角 φ 和换流母线电压 U 的关系为:

$$\frac{\partial \varphi(U)}{\partial U} = K(a) \frac{\partial a}{\partial U} \quad (5)$$

式中

$$K(a) = \frac{1}{(\cos \gamma - a)^2 \sqrt{1 - (\cos \gamma - a)^2}}$$

$$a = \frac{X i_{dc}}{\sqrt{2} k_T U}$$

式(5)等号两边同时对 U 求导并整理,可得:

$$\begin{cases} \frac{\Delta Q_{LCC}}{\Delta U} = \frac{P_{LCC}}{U^2} T(U, \xi) \\ T(U, \xi) = 2aK(a) + 2\omega B_c U^2 / P_{LCC} \end{cases} \quad (6)$$

当传统直流接入交流系统时,系统的雅可比矩阵 J 中的 J_{QU} 元素需要进行修正。即:

$$J'_{QU} = J_{QU} + \frac{\Delta Q_{LCC}}{\Delta U} \quad (7)$$

3.1.2 计及 PV 节点的全系统电压/无功灵敏度

由于 PV 节点对其他节点存在耦合关系,则需要将各 PV 节点增维到电压/无功灵敏度矩阵 S_{QU} 中。对于 n 节点系统,有 m 个 PQ 节点, $n-m-1$ 个 PV 节点,在求解某一个 PV 节点对其他 PQ 节点的电压/无功灵敏度时,通过潮流计算求解出其注入交流系统的有功、无功功率并将其转化为 PQ 节点,保持其他 PV 节点不变,计算此时的增广电压/无功灵敏度矩阵 S'_{QU} , 如下:

$$S'_{QU} = \begin{bmatrix} S_{QU,11} & \cdots & S_{QU,1m} & S_{QU,1(m+1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ S_{QU,m1} & \cdots & S_{QU,mm} & S_{QU,m(m+1)} \\ S_{QU,(m+1)1} & \cdots & S_{QU,(m+1)m} & S_{QU,(m+1)(m+1)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中,最后一行和最后一列的前 m 个元素表示该 PV 节点转化为 PQ 节点后,对系统中其他 PQ 节点的电压/无功灵敏度; $S_{QU,(m+1)(m+1)}$ 为该 PV 节点对自己的电压/无功灵敏度。

考虑到潮流平衡时,各节点的有功、无功、电压幅值和相角的微增量为 0,雅可比矩阵中的元素只与潮流分布有关。因此,当以 PV 节点的注入功率将其转化为 PQ 节点时,潮流仍处于平衡状态且与节点转化前后基本相同,所以增广灵敏度矩阵 S'_{QU} 的元素 $S_{QU,11} \sim S_{QU,mm}$ 与原灵敏度矩阵 S_{QU} 中的元素基本相同。

求出该 PV 节点的灵敏度后,将该节点重置为 PV 节点,即可对下一 PV 节点计算灵敏度。最终形成的全系统灵敏度矩阵 S 可以表示为:

$$S = \begin{bmatrix} S_{PQ, m \times m} & M_{m \times (n-m-1)} \\ N_{(n-m-1) \times m} & S_{PV, (n-m-1) \times (n-m-1)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, $S_{PQ, m \times m}$ 为系统中 m 个 PQ 节点的灵敏度矩阵; $M_{m \times (n-m-1)}$ 为 PQ 节点电压变化对 PV 节点无功变化灵敏度矩阵; $N_{(n-m-1) \times m}$ 为 PV 节点电压变化对 PQ 节点无功变化灵敏度矩阵; $S_{PV, (n-m-1) \times (n-m-1)}$ 为 $n-m-1$ 个 PV 节点的灵敏度矩阵, 为对角矩阵。

3.2 基于局部拓展理论的分区方法

社区结构可用于复杂网络节点的聚合和分裂, 已经在电力系统的电压分区控制中大量应用。但是, 对于多馈入系统分区问题的研究少有涉及。

本文对多馈入系统的分区是要解决多回直流发生同时换相失败的问题。由图 1 可以发现, 直流换流母线之间的耦合是引起同时换相失败的重要因素。通过将具有相似电压/无功特性的节点聚合为同一社区, 断开耦合较强的联络线, 即可实现对交流系统的分区。但是, 不同于纯交流系统可将分区主导节点选取为某一节点的特点, 多馈入系统的分区主导节点应选取为传统直流换流母线。其原因如下:

(1) 传统直流馈入大量功率, 严重影响到受端系统的稳定。而传统直流稳定运行的关键即是换流母线的电压稳定。

(2) 将换流母线节点选取为分区主导节点, 从而明确了分区数量。

(3) 将换流母线节点选取为分区主导节点, 明确了分区的无功控制关键节点, 方便无功补偿装置扩容或柔性直流接入位置确定等研究的开展。

(4) 各个分区的边界可能存在归属不明确的节点, 需要找出这些节点, 考虑采用背靠背柔直进行分区。

综合以上原因, 本文采用了基于局部拓展理论对多馈入系统进行分区。基于局部拓展理论的社区函数可以描述为:

$$f(c) = \frac{\beta_{in}^c}{(\beta_{in}^c + \beta_{out}^c)^\alpha} \quad (10)$$

式中, $f(c)$ 为社区 c 的局部适应度函数; β_{in}^c 和 β_{out}^c 为社区 c 内部和外部节点的聚合度; α 为分辨率, 用以控制分区规模。一般的, 分辨率 α 取 1 更能体现系统的物理意义^[21]。对于节点聚合度需要给出进一步的计算过程。

首先, 由 3.1 节获取了全系统的电压/无功灵敏度矩阵 S 。但是, 灵敏度矩阵 S 只是反映节点之间的电压和无功变化关系, 不包含节点之间的连接关系, 因此, 需要引入关联矩阵对灵敏度矩阵进行信息补充。设置关联矩阵 A , 其元素为^[23]:

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 & i \text{ 和 } j \text{ 之间有连接} \\ 0 & i \text{ 和 } j \text{ 之间无连接} \end{cases} \quad (11)$$

则对灵敏度矩阵元素的修改可以表示为:

$$S'_{ij} = S_{ij} A_{ij} \quad (12)$$

其中, S'_{ij} 为修正后的灵敏度矩阵 S' 的元素。此时, S'_{ij} 包含了节点之间的连接关系、电压/无功等信息, 可以充分表示社区节点之间的关系。

注意到节点 i 的电压相对于节点 j 的无功的灵敏度与节点 j 的电压相对于节点 i 的无功的灵敏度是不同的。但是, 从社区角度描述两节点之间的关系是相同的, 因此, 取两节点的关系为:

$$B_{ij} = B_{ji} = \frac{S'_{ij} + S'_{ji}}{2} \quad (13)$$

随后, 基于模块度函数给出节点聚合度函数计算方法, 如下:

$$\beta^c = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} \left(B_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right) \delta(i, j) \quad (14)$$

其中

$$\begin{cases} k_i = \sum_{j=1}^{n-1} B_{ij} \\ m = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} B_{ij} / 2 \\ \delta(i, j) = \begin{cases} 1 & i \text{ 和 } j \text{ 在社区 } c \text{ 中} \\ 0 & i \text{ 或 } j \text{ 不在社区 } c \text{ 中} \end{cases} \end{cases} \quad (15)$$

综合考虑上述过程, 整个分区过程可描述为图 3 所示的流程。

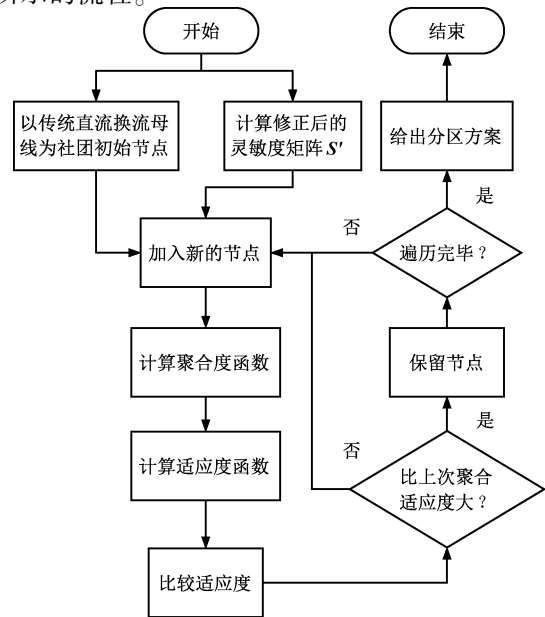


图 3 基于局部拓展理论的分区方法

Fig. 3 Segmentation method based on local fitness measure

具体的,首先计算出全系统修正后的灵敏度矩阵 S' 。随后,以传统直流换流母线为初始节点,计算节点聚合度函数,再计算适应度函数。加入新的节点,再次计算聚合度函数和适应度函数,比较加入前后适应度的大小。若适应度增大,则保留该节点增大社区规模;若适应度减小,则舍弃该节点。遍历搜索所有节点,给出最后的社区即为分区方案。

当某节点同时属于不同的社区时,不再向下搜索与其相连的节点。该节点在分区时考虑采用背靠背柔直分区方案。

3.3 分区方法

综合第2节和第3.1节、3.2节的研究,本文提出的对于多馈入系统的分区方法可总结为:通过基于局部拓展理论给出分区结果后,首先需要根据可开断线路集合对分区边界进行修正。随后需要校验分区的短路比。若短路比满足系统强度要求,即可采纳分区方案;若短路比不满足系统强度要求,需要将短路比较大的系统中的部分边界节点重新分配给短路比较小的系统,使所有系统满足系统强度要求。

4 算例分析

4.1 分区结果

本节将以 IEEE 39 节点系统给出算例,以展示整个分区过程。设置两回传统直流接入节点 35 和 38,传统直流采用 CIGRE Benchmark 模型参数;整流侧采用定功率控制,逆变侧采用定熄弧角控制;注入交流系统的有功功率均为 1 000 MW;考虑无功补偿装置过补偿,注入交流系统的无功均为 45 Mvar,节点转化为 PQ 节点。节点 30、31、33、34、36、37、39 为 PV 节点,节点 32 为平衡节点。经计算整个系统的潮流是收敛的,且各节点和支路均未发生电压和功率的越限。整个系统如图 4 所示。

根据本文提出的方法,该系统将分为两个分区。首先,对系统进行 N-1 故障扫描,能够引起两回直流发生换相失败的线路如表 1 所示。

分析表 1 发现,线路 L_7 在 N-1 下退出运行会引起两回直流发生同时换相失败。因此, L_7 被初步归入可开断线路集合中。

下面校验可开断线路集合中的负载率。正常运行时,线路 L_7 的负载率为 39.64%。在 N-1 下,线路 L_7 的开断没有引起其他支路的过载;其他支路的 N-1 扫描,引起线路 L_7 的负载率变化的线路如表 2 所示。

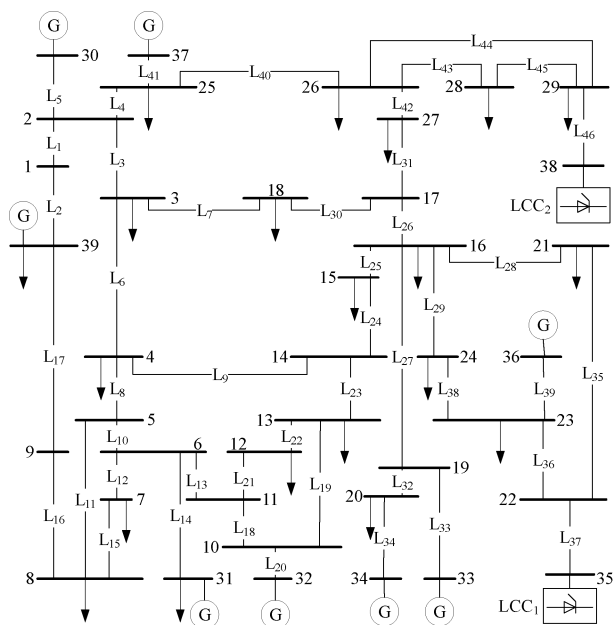


图4 考虑两回传统直流馈入的 IEEE 39 节点模型

Fig. 4 IEEE 39 nodes model considering double-infeed LCC-HVDC

表 1 引起直流发生换相失败的线路

Tab.1 Transmission lines causing commutation failure		
发生换相失败的直流	线路	电压降低量 (pu)
LCC ₁	L_7	0.232
	L_{26}	0.264
	L_{30}	0.232
LCC ₂	L_1	0.212
	L_7	0.208
	L_{16}	0.208
	L_{17}	0.200

表 2 引起线路 L_7 负载率变化的线路

Tab.2 Transmission lines causing changes of load rate of L_7		
线路	N-1 下 L_7 的负载率 (%)	负载率变化量 (%)
L_9	50.71	+11.07
L_{13}	42.86	+3.22

综上,N-1 下线路 L_7 的开断没有引起其他支路的过载;能够引起 L_7 负载率变化的线路较少,且负载率没有达到重载;但是 L_7 能够引起两回直流的同时换相失败,是可以考虑开断的。

随后,由第3节给出的计算方法,计算出全系统的电压/无功灵敏度,如附录所示。再由局部拓展社区发现算法对系统进行分区。分区结果如图 5 所示。分区聚合过程如图 6 所示。

由图 5 可知,该分区方案是将线路 L_{24} 、 L_{30} 和 L_{31}

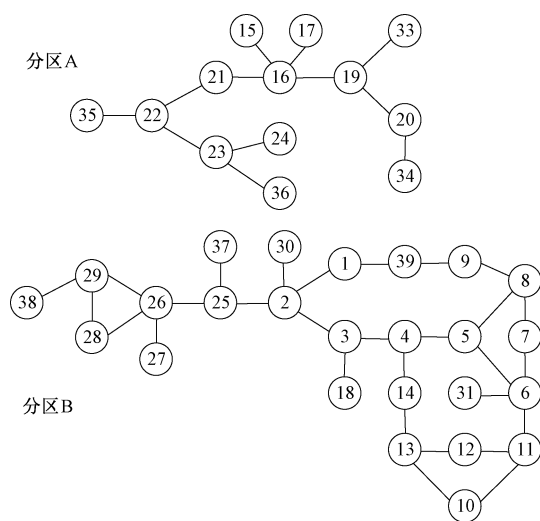
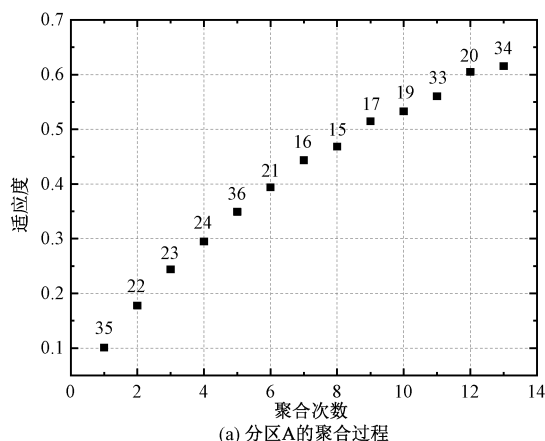
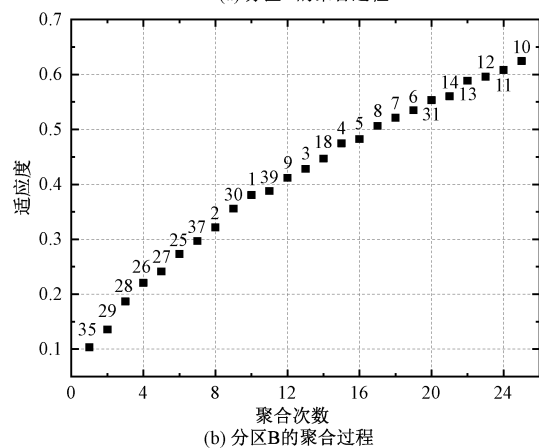


图 5 基于局部拓展的社区发现算法分区结果

Fig. 5 Segmentation result based on LCM



(a) 分区A的聚合过程



(b) 分区B的聚合过程

图 6 分区聚合过程

Fig. 6 Process of segmentation

断开实现的。计算分区的短路比分别为 2.643 8 和 3.526 1。可以发现,分区 A 因所含节点数较少,使得系统强度较弱。根据可开断线路集合,即考虑断开 L_7 ,同时将节点 10、11、12、13 和 14 节点分入分区

A。因为 L_7 、 L_9 和 L_{13} 同时断开,线路之间的相互影响也将消失。平衡节点 32 也归入分区 A。此时,分区的短路比分别为 3.183 4 和 3.026 4,分区的最终适应度有所下降,分别为 0.558 2 和 0.544 4。最终的分区分方案如图 7 所示。

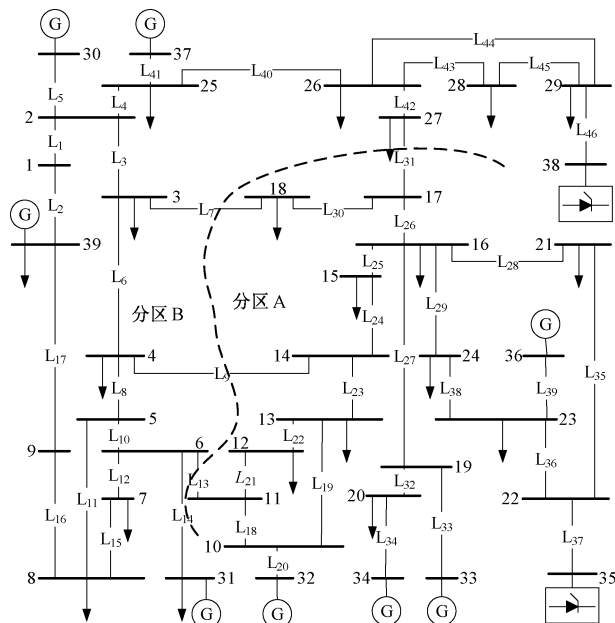


图 7 最终分区结果

Fig. 7 Final segmentation result

4.2 分区结果验证

在 PSD-BPA 软件中搭建了如图 7 所示的模型。按照 4.1 节的分区结果,将线路 L_7 、 L_9 、 L_{13} 和 L_{31} 全部断开,则分区潮流不能收敛。这是因为分区 A 和 B 之间仍需要交换功率。

将线路 L_7 改造为柔性直流,其他线路保持断开。柔性直流需要向节点 18 传输 405.71 MW 的有功和 -815.91 Mvar 的无功。由 PSD-BPA 计算得到的传统直流短路比分别为 3.211 4 和 3.004 2,该结果与 4.1 节的计算结果相似。随后,对分区 A 和 B 分别进行 N-1 故障扫描,各分区内的线路发生三永故障只对馈入本分区的传统直流有影响,对其他分区的传统直流没有影响,即没有发现能够引起两回传统直流同时换相失败的线路。

综上,本文提出的分区方法基本解决了多回直流同时发生换相失败的问题,且能基本保证各分区的稳定运行。需要指出,改造线路 L_7 为柔性直流只是其中一种改造方案,具体的改造方案仍需进一步的研究。

针对多馈入系统的分区问题,本文提出了一种

基于局部拓展理论给出初步分区,再由可开断线路集合和短路比对分区边界进行修正的主动分区方法。首先,以 IEEE 39 节点模型为基础,搭建了两回传统直流馈入的系统。按照本文提出的方法给出了分区方案,详细展示了全系统灵敏度计算过程、分区聚合过程、可开断线路集合搜索过程和分区边界修正过程。并在 PSD-BPA 中对分区结果进行了验证,

通过柔直改造解决了分区间功率交换的问题。分区结果能够解决多回传统直流同时换相失败的问题,并保证分区的稳定运行。随后,结合某实际电网,给出了分区方案,并对分区方案进行了验证。分区结果与该实际电网的南北输电断面基本相同,解决了同时换相失败的问题,并保证了分区稳定运行。下一步将具体研究柔性直流的改造方案。

附录

附表 1 全系统灵敏度矩阵(节点 1~18)

Appl.Tab.1 Sensitivity matrix of whole system (from node 1 to 18)

节点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	0.017 8	0.006 2	0.004 3	0.002 4	0.001 5	0.001 4	0.001 4	0.001 4	0.000 5	0.001 3	0.001 3	0.001 5	0.001 5	0.002 0	0.002 4	0.002 5	0.003 5	0.003 8
2	0.006 0	0.015 7	0.011 0	0.006 1	0.003 8	0.003 5	0.003 5	0.003 4	0.001 3	0.003 2	0.003 3	0.003 7	0.003 8	0.005 0	0.006 0	0.006 2	0.008 8	0.009 7
3	0.004 1	0.010 8	0.016 8	0.009 0	0.005 6	0.005 1	0.005 1	0.005 0	0.002 0	0.004 7	0.004 8	0.005 3	0.005 4	0.007 2	0.008 1	0.008 1	0.011 3	0.013 5
4	0.002 3	0.005 9	0.008 9	0.014 7	0.008 9	0.008 0	0.008 0	0.007 9	0.003 1	0.006 9	0.007 3	0.007 9	0.007 9	0.010 2	0.007 7	0.006 2	0.007 3	0.008 0
5	0.001 4	0.003 7	0.005 6	0.009 0	0.012 1	0.010 5	0.010 6	0.010 6	0.004 1	0.007 0	0.008 2	0.008 0	0.007 2	0.007 5	0.005 4	0.004 2	0.004 8	0.005 2
6	0.001 3	0.003 4	0.005 1	0.008 1	0.010 5	0.011 1	0.010 4	0.010 0	0.003 9	0.007 1	0.008 4	0.008 1	0.007 1	0.007 0	0.005 0	0.003 9	0.004 4	0.004 7
7	0.001 3	0.003 4	0.005 0	0.008 0	0.010 6	0.010 4	0.015 7	0.013 6	0.005 3	0.006 7	0.008 0	0.007 7	0.006 8	0.006 9	0.004 9	0.003 9	0.004 4	0.004 7
8	0.001 3	0.003 3	0.005 0	0.008 0	0.010 6	0.010 0	0.013 6	0.015 4	0.006 0	0.006 5	0.007 7	0.007 5	0.006 6	0.006 7	0.004 8	0.003 8	0.004 3	0.004 6
9	0.000 5	0.001 4	0.002 0	0.003 3	0.004 3	0.004 1	0.005 6	0.006 3	0.016 8	0.002 7	0.003 1	0.003 0	0.002 7	0.002 8	0.002 0	0.001 6	0.001 8	0.001 9
10	0.001 2	0.003 2	0.004 7	0.007 1	0.007 0	0.007 1	0.006 8	0.006 6	0.002 6	0.011 0	0.009 7	0.010 4	0.010 2	0.008 2	0.005 5	0.004 1	0.004 4	0.004 6
11	0.001 3	0.003 3	0.004 9	0.007 5	0.008 2	0.008 5	0.008 0	0.007 7	0.003 0	0.009 7	0.012 0	0.011 1	0.009 3	0.007 9	0.005 4	0.004 1	0.004 5	0.004 6
12	0.001 4	0.003 6	0.005 3	0.007 9	0.007 9	0.008 0	0.007 7	0.007 4	0.002 9	0.010 2	0.010 9	0.034 4	0.011 4	0.009 2	0.006 2	0.004 6	0.005 0	0.005 1
13	0.001 4	0.003 7	0.005 4	0.008 0	0.007 2	0.007 2	0.006 9	0.006 7	0.002 6	0.010 1	0.009 3	0.011 6	0.013 0	0.010 0	0.006 6	0.004 9	0.005 2	0.005 3
14	0.001 9	0.004 9	0.007 2	0.010 3	0.007 4	0.007 0	0.006 8	0.006 7	0.002 6	0.008 0	0.007 8	0.009 2	0.009 9	0.014 5	0.009 5	0.006 9	0.007 2	0.007 2
15	0.002 2	0.005 7	0.007 8	0.007 5	0.005 2	0.004 9	0.004 8	0.004 7	0.001 8	0.005 3	0.005 2	0.006 1	0.006 4	0.009 3	0.018 4	0.012 2	0.011 0	0.009 8
16	0.002 3	0.005 9	0.007 9	0.006 1	0.004 1	0.003 8	0.003 8	0.003 7	0.001 5	0.004 0	0.004 0	0.004 6	0.004 8	0.006 8	0.012 2	0.014 1	0.012 4	0.010 7
17	0.003 2	0.008 4	0.011 0	0.007 2	0.004 7	0.004 3	0.004 3	0.004 2	0.001 7	0.004 3	0.004 4	0.004 9	0.005 1	0.007 1	0.011 1	0.012 4	0.018 5	0.015 7
18	0.003 6	0.009 4	0.013 3	0.008 0	0.005 1	0.004 6	0.004 6	0.004 5	0.001 8	0.004 5	0.004 6	0.005 1	0.005 3	0.007 2	0.010 0	0.010 8	0.015 8	0.020 0
19	0.000 8	0.002 2	0.002 9	0.002 3	0.001 5	0.001 4	0.001 4	0.001 4	0.000 5	0.001 5	0.001 5	0.001 7	0.001 8	0.002 5	0.004 5	0.005 2	0.004 6	0.003 9
20	0.000 5	0.001 2	0.001 6	0.001 2	0.000 8	0.000 8	0.000 8	0.000 7	0.000 3	0.000 8	0.000 8	0.000 9	0.001 0	0.001 4	0.002 4	0.002 8	0.002 5	0.002 1
21	0.002 1	0.005 5	0.007 3	0.005 7	0.003 8	0.003 5	0.003 5	0.003 4	0.001 3	0.003 7	0.003 7	0.004 2	0.004 4	0.006 3	0.011 2	0.013 0	0.011 4	0.009 9
22	0.001 8	0.004 7	0.006 3	0.004 9	0.003 3	0.003 0	0.003 0	0.002 9	0.001 2	0.003 2	0.003 2	0.003 6	0.003 8	0.005 4	0.009 7	0.011 2	0.009 8	0.008 5
23	0.001 5	0.003 9	0.005 2	0.004 1	0.002 7	0.002 5	0.002 5	0.002 5	0.001 0	0.002 6	0.002 6	0.003 0	0.003 2	0.004 5	0.008 1	0.009 3	0.008 2	0.007 1
24	0.002 2	0.005 6	0.007 5	0.005 9	0.003 9	0.003 6	0.003 6	0.003 5	0.001 4	0.003 8	0.003 8	0.004 4	0.004 6	0.006 5	0.011 6	0.013 5	0.011 8	0.010 2
25	0.004 5	0.011 7	0.008 9	0.005 0	0.003 2	0.002 9	0.002 9	0.002 8	0.001 1	0.002 7	0.002 8	0.003 1	0.003 2	0.004 3	0.005 5	0.005 8	0.008 3	0.008 6
26	0.005 1	0.013 4	0.013 3	0.008 2	0.005 3	0.004 8	0.004 8	0.004 7	0.001 8	0.004 7	0.004 8	0.005 4	0.005 5	0.007 6	0.011 1	0.012 2	0.017 9	0.016 2
27	0.004 3	0.011 2	0.012 4	0.007 8	0.005 1	0.004 6	0.004 6	0.004 5	0.001 8	0.004 6	0.004 6	0.005 2	0.005 4	0.007 4	0.011 2	0.012 4	0.018 4	0.016 1
28	0.006 6	0.017 2	0.017 1	0.010 5	0.006 8	0.006 2	0.006 2	0.006 1	0.002 4	0.006 0	0.006 1	0.006 9	0.007 1	0.009 8	0.014 3	0.015 7	0.023 0	0.020 8
29	0.006 9	0.018 0	0.017 8	0.011 0	0.007 1	0.006 5	0.006 4	0.006 3	0.002 5	0.006 3	0.006 4	0.007 2	0.007 4	0.010 2	0.014 9	0.016 4	0.024 0	0.021 7
30	0.005 7	0.015 0	0.010 5	0.005 8	0.003 6	0.003 3	0.003 3	0.003 2	0.001 3	0.003 1	0.003 2	0.003 5	0.003 6	0.004 8	0.005 8	0.005 9	0.008 4	0.009 2
31	0.001 1	0.002 7	0.005 9	0.011 2	0.015 1	0.016 1	0.015 1	0.014 5	0.005 6	0.010 1	0.012 1	0.011 6	0.010 1	0.009 8	0.006 5	0.004 9	0.005 2	0.005 5
33	0.000 9	0.002 4	0.004 6	0.003 9	0.002 7	0.002 5	0.002 4	0.002 4	0.000 9	0.002 6	0.002 6	0.003 0	0.003 2	0.004 5	0.008 6	0.010 0	0.008 3	0.006 9
34	0.000 6	0.001 4	0.002 7	0.002 3	0.001 6	0.001 5	0.001 4	0.001 4	0.000 6	0.001 6	0.001 5	0.001 8	0.001 9	0.002 7	0.005 1	0.005 9	0.004 9	0.004 1
35	0.001 8	0.004 7	0.006 3	0.004 9	0.003 3	0.003 1	0.003 0	0.003 0	0.001 2	0.003 2	0.003 2	0.003 6	0.003 8	0.005 4	0.009 7	0.011 3	0.009 9	0.008 6
36	0.007 3	0.019 0	0.034 3	0.028 5	0.019 2	0.017 8	0.017 6	0.017 3	0.006 7	0.018 9	0.018 7	0.021 7	0.022 9	0.032 8	0.062 9	0.073 9	0.063 0	0.052 0
37	0.001 6	0.004 2	0.006 1	0.004 8	0.003 3	0.003 0	0.003 0	0.002 9	0.001 1	0.003 2	0.0031	0.003 6	0.003 8	0.005 4	0.009 8	0.011 4	0.010 0	0.008 6
38	0.006 9	0.018 1	0.017 9	0.011 0	0.007 1	0.006 5	0.006 4	0.006 4	0.002 5	0.006 3	0.0064	0.007 2	0.007 5	0.010 2	0.014 9	0.016 4	0.024 1	0.021 8
39	0.003 6	0.003 1	0.005 3	0.004 7	0.003 5	0.003 3	0.003 5	0.003 5	0.003 6	0.003 2	0.0033	0.003 7	0.003 8	0.005 2	0.009 3	0.010 7	0.009 1	0.007 7

附表 2 全系统灵敏度矩阵(节点 19~31,33~39)

Appl.Tab.2 Sensitivity matrix of whole system (from node 19 to 31 and 33 to 39)

节点	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39
1	0.000 9	0.000 5	0.002 3	0.002 0	0.001 6	0.002 3	0.004 7	0.005 5	0.004 7	0.007 4	0.007 9	0.005 8	0.001 2	0.001 1	0.000 6	0.002 1	0.009 6	0.001 8	0.008 2	0.004 1
2	0.002 2	0.001 3	0.005 9	0.005 1	0.004 2	0.005 9	0.012 0	0.014 2	0.011 9	0.019 0	0.020 1	0.014 9	0.002 9	0.002 7	0.001 6	0.005 3	0.024 6	0.004 7	0.021 1	0.003 5
3	0.002 9	0.001 7	0.007 7	0.006 7	0.005 5	0.007 7	0.008 9	0.013 7	0.012 8	0.018 4	0.019 5	0.010 3	0.006 1	0.004 9	0.002 8	0.006 9	0.042 6	0.006 7	0.020 4	0.005 8
4	0.002 2	0.001 3	0.005 9	0.005 1	0.004 2	0.006 0	0.005 0	0.008 4	0.008 0	0.011 2	0.011 9	0.005 6	0.011 4	0.004 2	0.002 4	0.005 3	0.035 0	0.005 2	0.012 4	0.005 1
5	0.001 5	0.000 9	0.004 0	0.003 5	0.002 9	0.004 0	0.003 2	0.005 4	0.005 2	0.007 3	0.007 7	0.003 6	0.015 5	0.002 9	0.001 6	0.003 6	0.024 0	0.003 6	0.008 1	0.003 8
6	0.001 4	0.000 8	0.003 7	0.003 2	0.002 6	0.003 7	0.002 9	0.005 0	0.004 8	0.006 7	0.007 1	0.003 2	0.016 5	0.002 7	0.001 5	0.003 3	0.022 3	0.003 3	0.007 4	0.003 6
7	0.001 4	0.000 8	0.003 7	0.003 2	0.002 6	0.003 7	0.002 9	0.004 9	0.004 7	0.006 6	0.007 0	0.003 2	0.015 4	0.002 6	0.001 5	0.003 3	0.022 0	0.003 2	0.007 3	0.003 8
8	0.001 4	0.000 8	0.003 6	0.003 1	0.002 6	0.003 6	0.002 9	0.004 9	0.004 7	0.006 5	0.006 9	0.003 2	0.014 8	0.002 6	0.001 5	0.003 2	0.021 6	0.003 2	0.007 2	0.003 8
9	0.000 6	0.000 3	0.001 5	0.001 3	0.001 0	0.001 5	0.001 2	0.002 0	0.001 9	0.002 7	0.002 8	0.001 3	0.006 0	0.001 0	0.000 6	0.001 3	0.008 8	0.001 3	0.003 0	0.004 1
10	0.001 5	0.000 8	0.003 9	0.003 4	0.002 8	0.003 9	0.002 8	0.004 9	0.004 7	0.006 5	0.006 9	0.003 0	0.010 5	0.002 8	0.001 6	0.003 5	0.023 7	0.003 5	0.007 2	0.003 5
11	0.001 5	0.000 8	0.003 9	0.003 4	0.002 8	0.003 9	0.002 8	0.004 9	0.004 8	0.006 6	0.007 0	0.003 1	0.012 5	0.002 8	0.001 6	0.003 5	0.023 5	0.003 4	0.007 3	0.003 6
12	0.001 7	0.000 9	0.004 4	0.003 8	0.003 1	0.004 4	0.003 1	0.005 5	0.005 3	0.007 3	0.007 8	0.003 4	0.011 8	0.003 2	0.001 8	0.003 9	0.026 7	0.003 9	0.008 1	0.004 0
13	0.001 8	0.001 0	0.004 7	0.004 0	0.003 3	0.004 7	0.003 2	0.005 7	0.005 6	0.007 7	0.008 1	0.003 5	0.010 4	0.003 4	0.002 0	0.004 2	0.028 5	0.004 2	0.008 5	0.004 2
14	0.002 5	0.001 4	0.006 5	0.005 7	0.004 7	0.006 6	0.004 3	0.007 8	0.007 6	0.010 4	0.011 0	0.004 6	0.010 0	0.004 8	0.002 8	0.005 9	0.040 2	0.005 8	0.011 6	0.005 7
15	0.004 3	0.002 5	0.011 5	0.010 0	0.008 2	0.011 6	0.005 4	0.011 1	0.011 2	0.014 9	0.015 7	0.005 4	0.006 5	0.008 9	0.005 1	0.010 4	0.073 3	0.010 4	0.016 5	0.009 9
16	0.005 0	0.002 9	0.013 4	0.011 6	0.009 5	0.013 4	0.005 7	0.012 2	0.012 5	0.016 4	0.017 4	0.005 6	0.004 9	0.010 5	0.006 0	0.012 0	0.085 6	0.012 1	0.018 2	0.011 4
17	0.004 4	0.002 5	0.011 8	0.010 2	0.008 4	0.011 9	0.008 2	0.018 0	0.018 5	0.024 2	0.025 7	0.008 0	0.005 3	0.008 7	0.005 0	0.010 6	0.074 5	0.010 8	0.026 9	0.009 7
18	0.003 9	0.002 2	0.010 3	0.008 9	0.007 3	0.010 3	0.008 5	0.016 5	0.016 4	0.022 1	0.023 4	0.008 9	0.005 6	0.007 3	0.004 2	0.009 2	0.062 6	0.009 2	0.024 5	0.008 3
19	0.008 8	0.005 0	0.004 9	0.004 3	0.003 5	0.004 9	0.002 1	0.004 5	0.004 6	0.006 0	0.006 4	0.002 1	0.001 8	0.019 5	0.011 3	0.004 4	0.031 5	0.004 5	0.006 7	0.004 2
20	0.004 8	0.010 9	0.002 7	0.002 3	0.001 9	0.002 7	0.001 1	0.002 5	0.002 5	0.003 3	0.003 5	0.001 1	0.001 0	0.010 6	0.024 6	0.002 4	0.017 2	0.002 4	0.003 6	0.002 3
21	0.004 6	0.002 7	0.023 5	0.018 5	0.013 7	0.013 1	0.005 3	0.011 3	0.011 5	0.015 1	0.016 0	0.005 2	0.004 5	0.009 7	0.005 5	0.019 2	0.128 5	0.019 2	0.016 7	0.018 6
22	0.004 0	0.002 3	0.018 4	0.024 6	0.017 3	0.012 1	0.004 5	0.009 7	0.009 9	0.013 0	0.013 8	0.004 5	0.003 9	0.008 3	0.004 8	0.025 5	0.162 1	0.025 6	0.014 4	0.025 0
23	0.003 3	0.001 9	0.013 9	0.017 6	0.018 8	0.010 7	0.003 8	0.008 1	0.008 2	0.010 9	0.011 5	0.003 7	0.003 2	0.006 9	0.004 0	0.018 2	0.156 0	0.018 3	0.012 0	0.017 8
24	0.004 8	0.002 7	0.013 5	0.012 5	0.010 9	0.018 2	0.005 4	0.011 6	0.011 9	0.015 6	0.016 6	0.005 4	0.004 7	0.010 0	0.005 7	0.013 0	0.096 8	0.013 1	0.017 3	0.012 4
25	0.002 1	0.001 2	0.005 5	0.004 8	0.003 9	0.005 5	0.015 2	0.016 0	0.012 7	0.021 5	0.022 8	0.011 1	0.002 6	0.002 9	0.001 7	0.004 9	0.027 8	0.006 2	0.023 9	0.003 6
26	0.004 3	0.002 5	0.011 5	0.010 0	0.008 2	0.011 6	0.015 6	0.044 1	0.032 6	0.059 4	0.062 9	0.012 7	0.005 2	0.007 7	0.004 4	0.010 4	0.077 2	0.011 3	0.065 8	0.008 8
27	0.004 4	0.002 5	0.011 8	0.010 2	0.008 4	0.011 9	0.012 4	0.032 6	0.034 6	0.043 8	0.046 4	0.010 7	0.005 3	0.008 3	0.004 7	0.010 6	0.077 0	0.011 2	0.048 6	0.009 3
28	0.005 6	0.003 2	0.014 9	0.012 9	0.010 6	0.014 9	0.020 1	0.056 8	0.041 9	0.114 1	0.114 6	0.016 4	0.006 6	0.009 9	0.005 6	0.013 4	0.108 6	0.014 6	0.119 9	0.011 2
29	0.005 8	0.003 3	0.015 5	0.013 4	0.011 0	0.015 6	0.020 9	0.059 3	0.043 7	0.112 7	0.127 7	0.017 1	0.006 9	0.010 3	0.005 8	0.013 9	0.114 9	0.015 3	0.133 6	0.011 6
30	0.002 1	0.001 2	0.005 6	0.004 9	0.004 0	0.005 7	0.011 4	0.013 5	0.011 3	0.018 1	0.019 2	0.031 5	0	0	0	0.005 1	0	0	0.020 1	0
31	0.001 7	0.001 0	0.004 6	0.004 0	0.003 3	0.004 7	0.002 6	0.005 2	0.005 3	0.006 8	0.007 2	0	0.040 5	0	0	0.004 2	0	0	0.007 5	0
33	0.018 3	0.010 4	0.009 5	0.008 3	0.006 8	0.009 6	0.002 8	0.007 4	0.007 9	0.009 9	0.010 4	0	0	0.032 6	0	0.008 6	0	0	0.010 9	0
34	0.010 8	0.024 9	0.005 6	0.004 9	0.004 0	0.005 6	0.001 6	0.004 3	0.004 6	0.005 7	0.006 0	0	0	0	0.041 5	0.025 0	0	0	0.006 3	0
35	0.004 0	0.002 3	0.018 5	0.024 7	0.017 4	0.012 2	0.004 6	0.009 8	0.010 0	0.013 1	0.013 9	0.004 5	0.003 9	0.008 4	0.004 8	0.041 0	0.159 7	0.006 2	0.014 5	0.011 7
36	0.025 2	0.014 3	0.118 7	0.156 1	0.149 2	0.084 4	0.022 4	0.065 3	0.065 3	0.097 5	0.105 4	0	0	0	0	0.151 0	0.186 1	0	0.112 1	0
37	0.004 1	0.002 3	0.018 6	0.024 8	0.017 5	0.012 3	0.005 7	0.010 7	0.010 6	0.014 5	0.015 3	0	0	0	0	0.005 9	0	0.041 1	0.016 0	0
38	0.005 9	0.003 4	0.015 6	0.013 5	0.011 1	0.015 7	0.021 0	0.059 6	0.043 9	0.113 3	0.128 3	0.017 1	0.006 9	0.010 4	0.005 8	0.014 0	0.117 0	0.015 4	0.151 2	0.004 2
39	0.003 8	0.002 2	0.017 9	0.024 2	0.017 0	0.011 6	0.003 3	0.008 2	0.008 7	0.010 9	0.011 5	0	0	0	0	0.012 0	0	0	0.003 8	0.040 4

参考文献 (References):

- [1] 杨海涛, 吉平, 苗淼, 等 (Yang Haitao, Ji Ping, Miao Miao, et al.). 未来中国特高压电网结构形态与电源组成相互关系分析 (Analysis on interrelationship between future UHV power grid structural form and power source composition in China) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2018, 42 (6): 9-17.
- [2] 王少辉, 唐飞, 向农 (Wang Shaohui, Tang Fei, Xiang Nong). 华东电网多直流同时换相失败仿真分析 (Commutation failure simulation analysis of East China power grid multiple HVDC lines) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2017, 45 (12): 16-21.
- [3] 张东辉 (Zhang Donghui). 多直流集中馈入受端广东电网发展的思考 (Reflect on development of centralized

feed-in of multi direct current into receiving-end Guangdong power grid) [J]. 广东电力 (Guangdong Electric Power), 2015, 28 (8): 33-37, 100.

- [4] 邵瑶, 汤涌 (Shao Yao, Tang Yong). 多馈入交直流混合电力系统研究综述 (Research survey on multi-infeed AC/DC hybrid power systems) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2009, 33 (17): 24-30.
- [5] 王玲, 文俊, 崔康生, 等 (Wang Ling, Wen Jun, Cui Kangsheng, et al.). 多馈入直流输电系统换相失败研究综述 (Research survey of commutation failure in MIDC transmission systems) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (8): 56-65.
- [6] 徐政, 董恒锋, 宋鹏程, 等 (Xu Zheng, Dong Huanfeng, Song Pengcheng, et al.). 同步电网合理规模的 3 个基本约束研究 (Three basic constraints for reasonable

- size of synchronous grids) [J]. 电力建设 (Electric Power Construction), 2015, 36 (11): 77-84.
- [7] 周保荣, 洪潮, 金小明, 等 (Zhou Baorong, Hong Chao, Jin Xiaoming, et al.). 南方电网同步运行网架向异步运行网架的转变研究 (Study of backbone structure change from synchronous to asynchronous in China Southern power grid) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (8): 2084-2092.
- [8] 蔡万通, 洪潮, 周保荣, 等 (Cai Wantong, Hong Chao, Zhou Baorong, et al.). 广东电网内外双环网架结构向组团网架结构的转变研究 (Research on structure change from double-ring to cluster of Guangdong power grid) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2020, 40 (20): 6557-6569.
- [9] 安军, 柴旭峥, 王骅 (An Jun, Chai Xuzheng, Wang Hua). 采用柔性直流输电优化河南电网运行的前瞻性研究 (Prospective study of Henan power grid optimized operation with VSC-HVDC) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2016, 40 (1): 86-91.
- [10] 程斌杰 (Cheng Binjie). 电网分区策略关键问题研究 (Research on the key issues of grid segmentation strategy) [D]. 杭州: 浙江大学 (Hangzhou: Zhejiang University), 2016.
- [11] 徐蔚, 程斌杰, 林勇, 等 (Xu Wei, Cheng Binjie, Lin Yong, et al.). 基于多馈入交互作用因子的直流分区原则和方法研究 (DC-segmentation planning based on multi-infeed interaction factor) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2016, 44 (9): 108-116.
- [12] 唐晓骏, 张正卫, 韩民晓, 等 (Tang Xiaojun, Zhang Zhengwei, Han Minxiao, et al.). 适应多直流馈入受端电网的柔性直流配置方法 (VSC-HVDC configuration method suitable for multi-DC feeding receiving power grid) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2019, 47 (10): 57-64.
- [13] 唐晓骏 (Tang Xiaojun). 城市电网分区互联的柔性直流关键技术研究 (Research on key technologies of VSC-HVDC applied to urban power grid partition) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2019.
- [14] 颜湘武, 李若瑾, 徐韵 (Yan Xiangwu, Li Ruojin, Xu Yun). 考虑无功裕度的电压自适应分区方法及主导节点的选择 (Voltage adaptive partitioning method and optimal pilot-node selection considering reactive power margin) [J]. 现代电力 (Modern Electric Power), 2020, 37 (2): 117-124.
- [15] 白宇 (Bai Yu). 交直流混联受端电网的优化分区与降耦策略研究 (Research on optimization partition and coupling reduction strategy of AC/DC hybrid receiving system) [D]. 济南: 山东大学 (Jinan: Shandong University), 2020.
- [16] 魏震波, 关翔友, 刘梁豪 (Wei Zhenbo, Guan Xiangyou, Liu Lianghao). 电网社区结构发现方法及其应用综述 (Overview of power community structure discovery algorithms and their application in power grid analysis) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2020, 44 (7): 2600-2609.
- [17] 魏震波 (Wei Zhenbo). 复杂网络社区结构及其在电网分析中的应用研究综述 (Overview of complex networks community structure and its applications in electric power network analysis) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2015, 35 (7): 1567-1577.
- [18] 魏震波, 苟竞 (Wei Zhenbo, Gou Jing). 复杂网络理论在电网分析中的应用与探讨 (An overview on application of complex network theory in power system analysis) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2015, 39 (1): 279-287.
- [19] 魏震波, 刘俊勇, 程飞, 等 (Wei Zhenbo, Liu Junyong, Cheng Fei, et al.). 利用社区挖掘的快速无功电压分区方法 (Fast power network partitioning method in Mvar control space based on community wining) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2011, 31 (31): 166-172.
- [20] 郑吉祥, 钟俊 (Zheng Jixiang, Zhong Jun). 基于节点类型和分区耦合性的复杂网络无功电压快速分区方法 (A complex network theory fast partition algorithm of reactive voltage based on node type and coupling of partitions) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2020, 44 (1): 223-230.
- [21] Lancichinetti A, Fortunato S, Kertész J. Detecting the overlapping and hierarchical community structure in complex networks [J]. New Journal of Physics, 2009, 11 (3): 033015.
- [22] 王晓辉, 白宇, 张彦涛, 等 (Wang Xiaohui, Bai Yu, Zhang Yantao, et al.). 基于线路阻抗短时调节的多直流连锁换相失败抑制方法 (Suppression method of cascading commutation failure in multi-infeed HVDC system based on temporary impedance regulation of transmission lines) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2021, 45 (2): 130-138.
- [23] 吴杰, 席晓林, 闫晓安, 等 (Wu Jie, Xi Xiaolin, Yan Xiaolan, et al.). 基于节点-线路关联度权重的配电网电能质量评估方法 (Power quality evaluation method of distribution network based on weight of node-route association) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (1): 24-30.

Segmentation method of a multi-infeed LCC system based on local fitness measure

CAO Xin¹, HAN Min-xiao¹, MA Li-min¹, GUO Zhi-fei², CAI Wan-tong², ZHANG Xia-hui¹, WEN Jun¹

(1.School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2.Electric Power Research Institute of CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: There is a great possibility of simultaneous commutation failure for LCC-HVDC when there exists multi-infeed into one AC system. To tackle this issue, one segmentation approach to the AC system is proposed in this paper. By dividing the multi-infeed AC system into several parts, the coupling between the LCC-HVDCs will be eliminated, thereby reduce the probability of simultaneous commutation failure of LCCs. Firstly, lines whose three-phase permanent fault will cause simultaneous commutation failure are selected by N-1 fault scanning on the multi-infeed system, among which lines with high load rate are removed. After that, based on the local fitness measure theory, nodes in the system are aggregated from bottom to top to form the initial partition. In this process, the calculation method of voltage/reactive power sensitivity matrix considering PV node and LCC-HVDC is firstly presented. Then the node aggregation function and partition fitness function are applied to calculate the node aggregation and partition fitness, respectively. Finally, considering the line collection and short-circuit ratio, the partition result is modified, and establishes the segmentation process. The effectiveness of the whole segmentation process is verified on IEEE 39 nodes system, and a segmentation scheme is proposed on an actual power grid.

Key words: multi-infeed system; LCC-HVDC; power grid segmentation; N-1 contingency; local fitness measure