

考虑含新能源孤网稳定特性的主动解列断面搜索方法

刘明顺¹, 陈俊全¹, 马覃峰¹, 张青青¹, 王寅¹, 常东旭^{2,3}, 李成翔^{2,3}

(1.贵州电网有限责任公司电力调度控制中心, 贵州 贵阳 550000; 2.直流输电技术国家重点实验室(南方电网科学研究院), 广东 广州 510663; 3.广东省新能源电力系统智能运行与控制企业重点实验室, 广东 广州 510663)

摘要: 主动解列是保障电力系统稳定性,避免大面积停电的重要措施,通常将解列断面搜索抽象为单目标优化问题的研究方法,对于含新能源的复杂系统解列后孤网子系统的稳定性关注不足,所确定的解列断面合理性存疑。针对这一问题,文章提出了一种考虑含新能源孤网稳定特性的主动解列断面搜索方法。首先,基于节点间电气联系和潮流分布,以最小潮流冲击为目标确定初始解列断面;然后,考虑关键节点的电气耦合连接度和新能源渗透率,在初始解的邻域搜索空间中搜索最终的解列断面,以提升解列后孤网子系统的稳定性;最后,在新英格兰10机39节点系统中所提解列断面搜索方法进行了仿真分析和验证。仿真结果验证了该方法的有效性和优越性。

关键词: 主动解列; 断面搜索; 新能源; 孤网稳定性

中图分类号: TK51; TM612 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)10-1390-09

0 引言

解列作为电力系统“三道防线”的重要手段之一,能够在故障发生后将电力系统分割成若干个独立的同步子系统,从而避免故障蔓延和大规模停电^[1,2]。但随着网架规模的扩大、运行方式的增加,电力系统稳定控制日益复杂,传统基于解列装置在固定薄弱断面实施解列的策略,难以满足当前电力系统运行控制的需求^[3,4]。

在线量测技术和高速通信水平的不断提高,为实现实时决策和控制提供了重要技术支撑,主动解列技术因此成为了研究重点。其旨在依据系统故障后的运行状态和信息实时确定合理的解列断面,主要研究方法包括慢同调理论、图论寻优两类^[5]。

慢同调理论考虑每台发电机的动态特性,根据系统的慢模式及其对应模态进行区域划分,进而搜索区域间的弱连接割集^[6]。但该方法主要基于数学模型,在复杂多变的系统运行方式下适用性存在局限。为避免这一局限性,当前大多数研究方法将电力系统视为带权无向图,考虑节点连通性、发电机同调性等约束条件,以解列后子系统内部不平衡功率最小或解列造成的潮流冲

击最小为目标^[7],采用谱聚类^[8]、蚁群^[9]、粒子群^[10]及凸优化^[11]等算法搜索最优线路割集作为解列断面,但搜索空间的规模和复杂度削弱了方法的实用性。为适应电力系统的发展,在优化模型的约束条件和目标函数中进一步考虑无功功率^[12]、直流短路比^[13]、柔性直流落点^[14]等复杂因素,这无疑增加了解列断面搜索的复杂性。为降低计算复杂度,相关研究提出可基于线路阻抗所表征的电气联系程度将一般节点预先划分至与其电气联系紧密的发电机群,从而缩小解列断面的可行解搜索空间^[15,16],但仅考虑线路阻抗对搜索空间进行简化易造成可行解的丢失。

除易造成可行解丢失外,当前仅有少量文献考虑了含新能源复杂系统解列后孤网子系统的稳定性,且仅考虑了孤网的频率支撑能力^[13,17],忽略了电气耦合连接程度较高、对系统稳定性影响较大的薄弱节点。文献[18]通过分析电网特征指出,电力系统本质上是异质无标度网络,存在电气耦合连接程度较高、对系统稳定性影响较大的少数关键节点。对于含新能源的系统,解列措施应尽量减少对节点电气耦合连接性的改变,避免系统稳定特征发生较大变化,并同时考虑新能源渗透率,

收稿日期: 2023-07-14。

基金项目: 南方电网重点科技项目(066500KK52210040)。

作者简介: 刘明顺(1986-),男,博士,高级工程师,主要从事新能源电力系统稳定分析与控制、新能源并网、电网信息物理融合系统研究工作。

E-mail: liu123mings@163.com

从而提升孤网运行的稳定性。

针对上述问题,本文提出了一种考虑含新能源孤网稳定特性的主动解列断面搜索方法。在现有文献的基础上,综合考虑线路阻抗和传输功率构造节点间电气联系程度评价指标,避免仅依据线路阻抗将节点预先划分至对应机群时易造成的解列断面可行解丢失,然后在缩小后的解列断面搜索空间中以最小潮流冲击为目标求解初始解列断面,并考虑解列策略对节点电气耦合特征及新能源渗透率的影响,对解列断面进行优化调整,提升解列后孤网子系统的稳定性。

1 主动解列的关键问题

主动解列技术依据系统实时运行状态和故障信息确定合理的解列断面,能够有效缓解传统解列方式容易引起的区域不平衡功率、潮流冲击等问题,并减少后续切机、切负荷等稳定控制操作。主动解列主要涉及两方面问题,一方面是何时解列,另一方面是何处解列。

何时解列主要看系统是否存在暂态功角失稳的风险,目前已有众多文献提出了基于电气量响应轨迹的暂态稳定预测方法,具有较好的准确性和实用性,本文重点关注何处解列的问题。何处解列问题的本质是在满足发电机同调性、节点连通性等约束条件的基础上,按照确定的目标函数,从可行解中搜索最优的解列方案,断开的各条线路构成最终的解列断面,如图 1 所示。

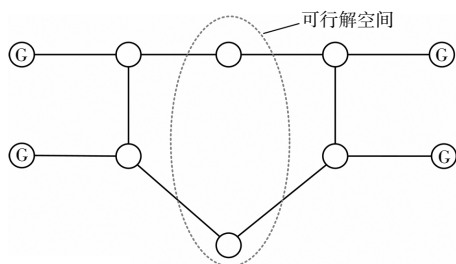


图 1 解列断面的可行解空间
Fig.1 Candidate resolution space of controlled islanding

在理论意义上搜索解列断面时,除与发电机相连的线路外,每条线路都有开断的可能,故求解复杂度较高,属于典型的 NP(Non-deterministic Polynomial) 难题。为解决这一 NP 难题,文献 [15, 16] 基于线路阻抗大小表征节点间的电气联系程度将节点划分为两类:一类是与某一机群联系紧密的一般节点;另一类是与不同机群存在相近联系程度的公共节点。将一般节点划分至对应

发电机群区域后,则解列断面搜索的本质是在公共节点构成的区域中寻找合适的开断线路,因而缩小了可行解的搜索空间。

但线路阻抗反映更多的是节点间的物理联系,忽略了能量传递的紧密程度,故可能会将节点划分至错误机群而造成可行解乃至最优解的丢失。因此,综合考虑物理联系和能量传递以更加准确地反映节点间的电气联系程度,并据此对节点进行预先划分,确定合理的公共节点区域,实现在尽量不丢失可行解的前提下缩小解列断面的搜索空间,是解决何处解列问题的基础和关键。

2 解列断面初始解的搜索方法

2.1 节点间的电气联系

在图 2 所示简单电力系统中分析仅依据电抗表征节点间电气联系强弱的合理性。假设线路电抗 $X_1=X_2$, 负荷 $S_1=2S_2$, 则节点 i 与 m 之间传递的功率是节点 i 与 n 之间传递功率的两倍。若仅以电抗衡量电气联系,则认为节点 i 与节点 m, n 具有相当的联系程度,显然与电气联系所应包含的能量传递关系不符。因此本文考虑能量传递大小和距离,以线路电抗值与有功功率的比值 X_{ij}/P_{ij} 衡量节点间联系的紧密程度,其值越小,即电抗越小,传输的有功功率越大,相邻节点间电气联系越紧密。

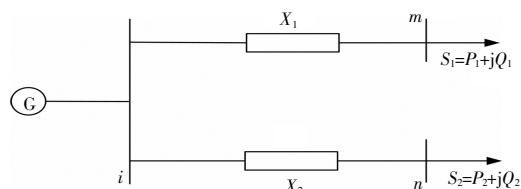
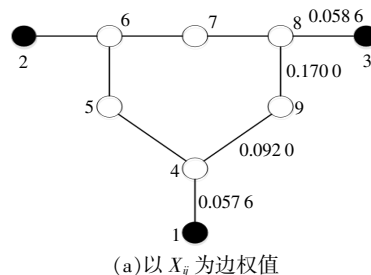


图 2 简单电力系统
Fig.2 A simple power system

在 IEEE 9 节点系统中分析边权值的不同对于节点划分结果的影响。图 3 中(a), (b)分别表示以 X_{ij} 和 X_{ij}/P_{ij} 为边权值的 IEEE 9 节点系统带权图,分别计算节点 9 到发电机节点 1 和 3 的最小边权值累加和,如表 1 所示。



(a)以 X_{ij} 为边权值

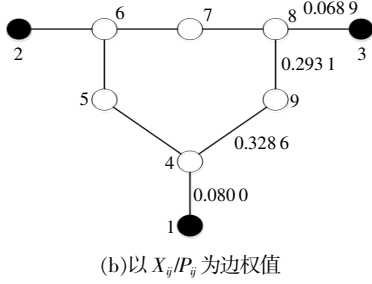


图3 IEEE 9节点系统带权图
Fig.3 Graph model of IEEE 9 bus system

表1 最小边权值累加和
Table 1 Minimum edge weights sum

最小边权值累加和	节点 9,1	节点 9,3
以 X_{ij} 为边权值	0.149 6	0.228 6
以 X_{ij}/P_{ij} 为边权值	0.408 6	0.362 0

由表1可知,当以 X_{ij} 为边权值时,节点9与发电机节点1之间有更小的边权值累加和,即认为节点9与节点1有更紧密的联系;而以 X_{ij}/P_{ij} 为边权值时,节点9实际上与发电机节点3具有更紧密的联系程度。可见,由于忽略了能量传递的影响,仅以电抗作为系统带权图边权值进行节点划分可能会将节点划分入错误的机群,在此基础上得到的公共节点构成的搜索空间可能会造成可行策略的丢失。

2.2 基于节点划分的搜索空间化简

在节点划分之前须要对发电机进行分群,这部分内容已有较成熟研究,本文不再赘述。基于此,以 X_{ij}/P_{ij} 作为系统带权无向图边权值,对节点进行划分,以缩小解列断面的搜索空间,具体方法如下。

①计算系统带权无向图的边权值。

$$W_{ij} = \begin{cases} X_{ij}/P_{ij} & \text{节点 } i, j \text{ 相连} \\ 0 & i=j \\ +\infty & \text{节点 } i, j \text{ 不相连} \end{cases} \quad (1)$$

式中: W_{ij} 为节点 i 与机群 m 中发电机节点 j 之间的最小边权值累加和; X_{ij}, P_{ij} 分别为节点 i 和 j 之间的电抗和传输功率。

②基于图论中最短路径 Floyd 算法求取节点 i 到机群 m 的平均最小边权值累加和。

$$D_{i \rightarrow m} = \frac{1}{N_m} \sum_{j=1}^{N_m} W_{ij} \quad (2)$$

式中: N_m 为机群 m 中发电机数目。

③对于任意两发电机群 m_1 和 m_2 , 计算节点 i 到不同机群平均最小边权值累加和的差异。

$$\gamma = |D_{i \rightarrow m_1} - D_{i \rightarrow m_2}| \quad (3)$$

设定阈值 ε , 若 $\gamma \leq \varepsilon$, 则节点 i 属于与两机群有相近联系程度的公共节点; 若 $\gamma > \varepsilon$, 则 i 属于一般节点, 通过比较 γ 的正负将 i 归入与其存在紧密联系的对应机群。其中阈值 ε 根据统计数据、运行经验具体整定, 通常公共节点数目为节点总数的 20% 左右^[15]。

2.3 解列断面的初始解

将占大多数的一般节点划分入与其联系紧密的机群后, 则搜索解列断面实质上是确定解列方案, 将公共节点合理划分至相应机群, 因而有效缩小了搜索空间。

解列断面搜索的目标函数主要有两种: 一种是解列后区域内发电机与负荷之间的不平衡功率最小, 目的是减少解列后各子系统后续的切机、切负荷操作; 另一种是潮流冲击最小, 旨在减小解列造成的潮流转移及其对系统的冲击。两种目标函数的数学形式分别为

$$\min |P_G - P_L| \quad (4)$$

$$\min \sum_{i \in V_1, j \in V_2} |P_{ij}| \quad (5)$$

式中: P_G, P_L 分别为解列后区域中发电机功率和负荷功率; i, j 分别属于不同区域 V_1, V_2 。

相关研究表明, 与不平衡功率相比, 解列造成的潮流冲击对于系统稳定性具有更大的影响, 因为子系统内部的不平衡功率可以进一步通过少量的切机或切负荷操作缓解^[19]。故本文以式(5)所表征的最小潮流冲击为目标搜索解列断面的初始解, 采用图论中求取最小割的最大流算法, 将任意两同调机群构成的子图分别视作等值源点和汇点进行寻优迭代, 进而在缩小后的可行解空间中确定使式(5)最小的一组线路作为解列断面的初始解, 求解过程中须满足式(6)所示的节点联通性约束:

$$\begin{cases} \forall V_{Gi}, V_{Gj} \in V_G, \exists y_{ij} \in \Pi(V_{Gi} \cap V_{Gj}) \\ \forall V_{Gi} \in V_G, V_{Lj} \in (V - V_G), \exists y_{ij} \in \Pi(V_{Gi} \cap V_{Lj}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: V_G 为发电机节点; V_L 为负荷节点; y_{ij} 为节点 i 和 j 之间的连通路径。

3 解列断面方案的确定策略

3.1 初始解的邻域可行解集

依据上述流程确定的解列断面初始解仅考虑了解列操作对系统的暂态冲击,对解列后各孤网子系统的运行稳定性及控制难度考虑不足。事实上,在初始解列断面的周边范围内可能存在某些具有相近潮流冲击大小的可行解,但对解列后子系统的稳定特性及运行控制的影响可能具有较大差异。因此,在初始解的基础上,有必要进一步考虑解列后孤网子系统的稳定特性,在初始解的邻域搜索空间中确定最终的解列方案,在潮流冲击相近的条件下提升解列后孤网子系统的稳定性,减小其运行控制的复杂性。

在初始解列断面的周边范围内划定邻域搜索空间。定义开断线路两端的节点为第0度节点,与第0度节点通过1条线路相连的节点为第1度节点,与第1度节点再通过1条不重复线路相连的节点定义为第2度节点。将第1,2度节点所构成的线路范围定义为初始解的邻域搜索空间,将解列造成的潮流冲击相差20%视为水平相近,构成邻域搜索空间中的候选解集。

3.2 解列断面的调整策略

电力系统是一个异质无标度网络,其中大多数节点具有相近的耦合程度,但有少数节点与其他节点总体耦合程度较高。文献[18]指出,若故障发生在这些节点则更易引起系统严重故障乃至暂态失稳,故可认为这类节点是影响系统稳定性的关键节点或薄弱节点,耦合程度大小的相对关系与系统的稳定特性存在相关性。

电力系统中任意两节点间的耦合程度可通过节点阻抗矩阵的元素计算得到,如式(7)所示。

$$Z'_{ij} = Z_{ii} + Z_{jj} - 2Z_{ij} \quad (7)$$

式中: Z_{ii} 为节点阻抗矩阵第*i*行、第*i*列元素; Z_{jj} 为节点阻抗矩阵第*j*行、第*j*列元素; Z_{ij} 为节点阻抗矩阵第*i*行、第*j*列元素。

节点在系统中的总体耦合连接度可由式(8)所定义的连接度指标表征,其值越大,则节点与其他节点的总体耦合程度及对系统稳定特性的影响程度越大,是影响系统稳定性的关键节点或被视为薄弱节点。

$$C_i = \frac{1}{\sum_{j=1, j \neq i}^N Z'_{ij}} \quad (8)$$

式中: N 为节点数目。

当节点电气耦合连接度较大时,发生在该节点的故障更容易引起系统的全局性故障。从时域仿真结果上看,发生在该节点的故障引起系统电压失稳或功角失稳的概率更大^[18]。根据式(8)的计算结果,求取各节点的累积概率分布:

$$P_c(C) = \sum_{C=C'}^{C_{\max}} p, C \geq C', C' \in [C_{\min}, C_{\max}] \quad (9)$$

式中: C_{\min}, C_{\max} 分别为邻域搜索空间中各节点连接度的最小值和最大值。

将连接度指标及其累积概率分布值分别取对数,并分别作为横、纵坐标置于双对数坐标中。根据双对数坐标数据点是否可通过最小二乘拟合线性关系,判断系统节点耦合连接度指标是否符合幂律分布,如图4所示。

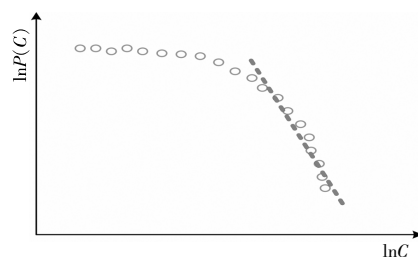


图4 双对数坐标幂律分布示意图
Fig.4 Schematic diagram of power law distribution in double logarithmic coordinates

若符合幂律分布,则意味着存在耦合连接度远大于其他节点的薄弱节点。在邻域搜索空间中若存在这样的节点,则应将其调整入电气联系相对更加紧密的发电机群,以减小解列措施对节点电气耦合连接性的破坏,使联系更加紧密的发电机群为薄弱节点发生的故障提供更好的支撑。

在对系统薄弱节点进行调整后,进一步考虑孤网的新能源消纳问题。风电、光伏等新能源不具备传统火电机组的惯量支撑和调频能力,在新能源并网系统实施解列后,新能源的消纳将由正常运行时的全网承担转变为局部电网消纳,在确定最终解列断面时应考虑解列后孤网的新能源消纳水平,以保证其具备一定的频率调节能力。通常用渗透率表征系统对新能源的消纳水平^[20,21]:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n P_{wi}}{P_{L\max}} \quad (10)$$

式中: P_{wi} 为第*i*台新能源机组的容量; n 为新能源

机组数量; P_{Lmax} 为系统最大负荷。

系统静态频率特性系数的数学表达式如式(11)所示。在相同的功率扰动下,系统静态频率特性系数越小,其对应的响应频率变化的有功增量也就越大,因此对系统的频率支撑能力也就越强。

$$R = -\frac{\Delta f}{\Delta P} \quad (11)$$

式中: Δf 为频率变化量; ΔP 为发电机调速器的功率增量。

在 n 台发电机组成的系统中,当以相同容量的风电机组替代 m 台同步发电机组时,等值静态频率特性系数可表示为

$$R' = -\sum_i^{n-m} \frac{\Delta f}{\Delta P_i} \quad (12)$$

将式(12)进行等效变换可得:

$$\frac{1}{R'} = -\sum_i^{n-m} \frac{\Delta P_i}{\Delta f} - \sum_{n-m}^n \frac{\Delta P_{wi}}{\Delta f} = -(1-\eta) \sum_i^n \frac{\Delta P_i}{\Delta f} = (1-\eta) \frac{1}{R} \quad (13)$$

式中: ΔP_i 为第 i 台发电机调速器的功率增量; ΔP_{wi} 为第 i 台风机的功率增量,取值为 0。

由式(13)可知,风电渗透率的提高会增大系统的静态频率特性系数,这意味着系统在不平衡功率下的一次调频能力会有所下降。因此为保障

解列后孤网子系统的频率稳定性,假设火电机组的有功备用容量是充足的,根据式(10)的定义,可在选取最终解列断面时使新能源并网区域消纳更多负荷并提升火电机组出力,从而降低孤网子系统的新能源渗透率,调整目标的数学形式可表示为

$$\max P_L', 0 \leq P_L' - P_{L0} \leq P_{Gmax} \quad (14)$$

式中: P_L' 为新能源并网区域负荷; P_{L0} 为按照初始解列后新能源并网区域负荷; P_{Gmax} 为火电机组的可用有功功率备用容量。

新能源实际出力的不确定性会影响孤网系统实际频率的稳定性。本文以新能源机组容量即最大出力来衡量孤网的新能源渗透率,实际上是针对解列后新能源机组位于同一孤网的情形,以此衡量吸纳更多负荷节点、增大火电出力对渗透率的改善作用。对于解列后新能源机组位于不同孤网的复杂情形,应考虑其出力随机性,通过拉丁超立方采样生成大量出力场景并进行场景削减求解典型场景及其概率分布^[17],以其中概率最大的典型场景下新能源机组的出力情况来评估渗透率,将负荷节点纳入渗透率较大的孤网子系统中。

3.3 解列断面的搜索流程

综上所述,本文所提出的考虑解列后孤网稳定性的断面搜索方法具体流程如图 5 所示,主要

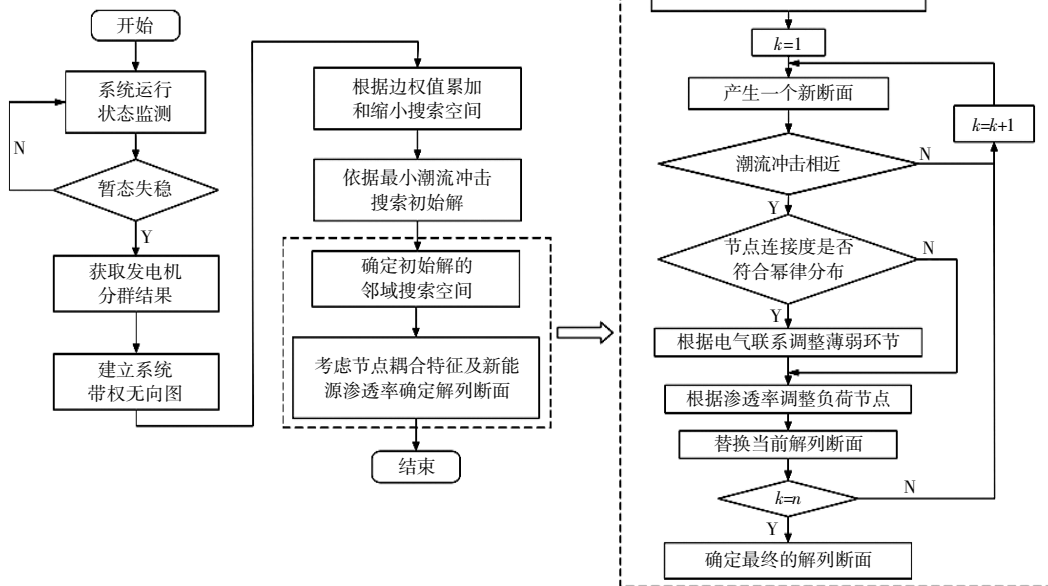


图 5 所提解列策略的流程

Fig.5 Flowchart of the proposed islanding method

步骤如下。

①当判断系统暂态失稳须要实施解列时,获取发电机分群结果,根据式(1),以阻抗和传输功率的比值作为边权值建立系统的带权无向图。

②基于 Floyd 算法求取节点到发电机群的平均最小边权值累加和,根据式(3),将节点划分为一般节点和公共节点,得到以公共节点构成的解列断面搜索空间。

③以式(5)所示的最小潮流冲击作为目标函数,基于最大流算法搜索满足式(6)所示节点联通性约束条件的初始解列断面。

④确定初始解列断面开断线路的第 1,2 度节点,将潮流冲击大小相差 20%视为具有相近潮流冲击的候选解,形成邻域可行解集。

⑤判断系统节点耦合连接度是否符合幂律分布,在邻域搜索空间中若存在连接度指标远大于其他节点的薄弱节点,则根据节点到发电机群的平均最小边权值累加和计算结果,将其调整入电气联系相对更加紧密的发电机群。

⑥在对系统薄弱节点进行调整后,使新能源并网区域消纳更多负荷并提升火电机出力,以式(9)为调整目标确定最终的解列断面。

4 算例分析

本文基于新英格兰 10 机 39 节点系统,采用 PSD-BPA 仿真软件对所提主动解列策略进行仿真分析和验证,系统结构和参数见文献[22],基准值为 100 MW。

4.1 算例 1

将发电机 33 和 34 替换为具有同等容量和出力的由若干台双馈风力发电机组成的风电场,在线路 23~24 处于 0 s 时设置三相短路故障,0.4 s 故障清除。该故障下系统发生暂态功角失稳,且在故障后的暂态过程中发电机可划分为两个机群,其中发电机 35,36 为超前群,其余发电机为滞后群。

依据图 5 所示策略流程进行解列断面的搜索,建立系统带权无向图后,根据式(3)求取负荷节点到两机群的最小边权值累加和之差,如表 2 所示。取阈值 $\varepsilon=0.035$, 此时有公共节点 2,3,10,11,12,13,14,25,超前机群 33~36 包含节点 15,16,17,18,19,20,21,22,23,24。由表 2 可见,节点 27 与滞后机群 30~32,37~39 存在明

显更紧密的联系程度,但若仅以电抗作为带权图边权值时,节点 27 被误判定为与超前机群具有更紧密的电气联系。

表 2 最小边权值累加和之差
Table 2 Difference of Minimum edge weights sum

节点	γ	节点	γ	节点	γ
1	0.039 2	11	0.033 2	21	-0.074 9
2	0.027 6	12	0.031 8	22	-0.077 2
3	0.022 1	13	0.031 8	23	-0.085 9
4	0.036 9	14	0.029 5	24	-0.079 0
5	0.037 9	15	0.069 9	25	0.030 0
6	0.037 2	16	-0.072 1	26	0.044 2
7	0.037 2	17	-0.066 3	27	0.044 2
8	0.037 9	18	-0.058 7	28	0.054 5
9	0.054 7	19	-0.076 4	29	0.055 1
10	0.032 7	20	-0.080 3		

仅以电抗作为边权值构建系统带权无向图求解得到的解列断面方案和采用本文方法得到的解列断面方案分别如图 6 中方案 1 和方案 2 所示,两种解列方案形成的潮流冲击分别为 4.913 p.u. 和 0.805 p.u.。由此可见,仅以电抗作为边权值进行节点划分不够准确,导致了可行解的丢失,而且由于忽略了潮流因素使得解列可行解的潮流冲击较大。

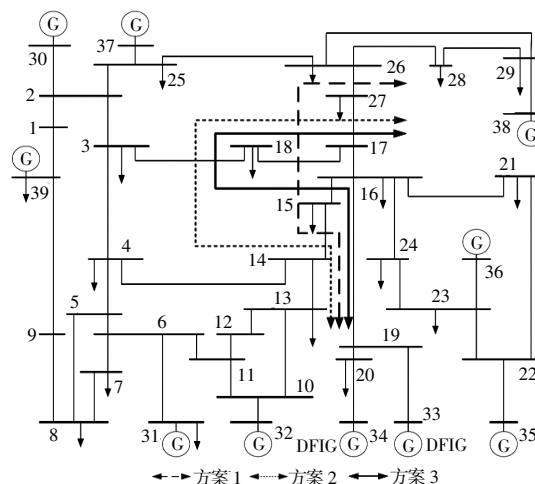


图 6 解列断面方案

Fig.6 Schemes of the islanding surface

以图 6 中方案 1 作为初始解,考虑发电机分群约束确定邻域搜索空间,根据式(6),(7)计算节点连接度指标。由于节点 15 的连接度指标较大,将其归入与其电气联系更加紧密的滞后机群区域中,最终得到的解列断面如图 6 中方案 3 所示,此时解列断面造成的潮流冲击为 0.956 p.u.。

分别采用方案 2 和方案 3 实施解列,解列后在超前机群 33~36 区域中分别设置节点 15,16 母线短路故障,各台发电机的暂态功角曲线分别如图 7,8 所示。由图 7,8 可以看出,将耦合连接度较大的节点 15 归入发电机开机容量较大的滞后机群后,解列后含新能源的孤网子系统暂态稳定性较好。

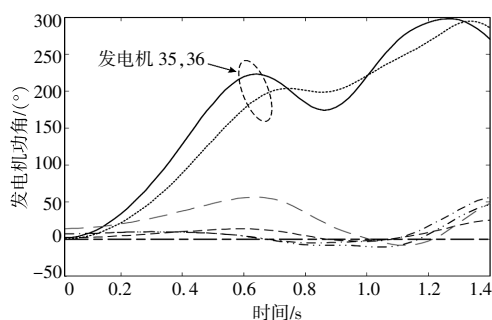


图 7 方案 2 解列后子系统暂态稳定性
Fig.7 Transient stability of the sub-systems after islanded by scheme 2

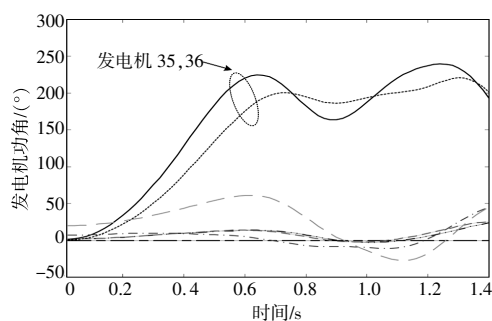


图 8 方案 3 解列后子系统暂态稳定性
Fig.8 Transient stability of the sub-systems after islanded by scheme 3

4.2 算例 2

将发电机 30 和 37 替换为具有同等容量和出力的由若干台双馈风力发电机组成的风电场。系统发生故障后对发电机进行分群,其中发电机 33~36,38 构成超前机群。同理,根据图 5 搜索得到解列断面初始解,如图 9 方案 1 所示,其构成邻域搜索空间的第 1 度节点为 2,4,13,16,17,27 和 28。在初始解的邻域搜索空间中,搜索潮流冲击相近且使新能源消纳区域纳入更多负荷节点的解列方案,得到最终的解列断面,如图 9 方案 2 所示。该解列方案下负荷节点 15 和 18 被纳入含新能源的孤网子系统中,此时孤网内新能源渗透率由方案 1 的 27%下降至 23%。为验证根据本文策略所确定的断面方案对于提升解列后孤网子系统频率稳定性的作用,在含新能源的子系统内部设

置功率扰动,将发电机 32 切机 400 MW,采用不同方案解列得到的孤网频率响应曲线分别如图 10,11 所示。由图 10,11 可以看出,当考虑新能源渗透率确定解列断面时,在该扰动下解列后孤网子系统最低频率为 49.55 Hz,与初始解列断面形成的孤网子系统相比提升了 0.13 Hz。

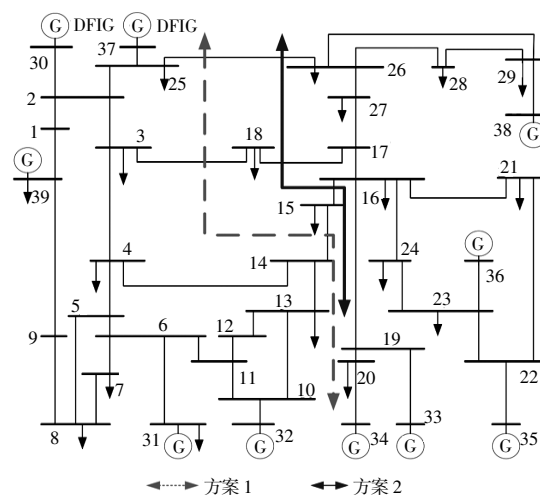


图 9 解列断面方案
Fig.9 Schemes of the islanding surface

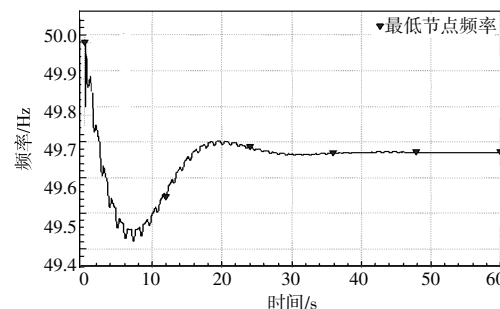


图 10 方案 1 解列后子系统频率响应
Fig.10 Frequency response of the subsystem under scheme 1

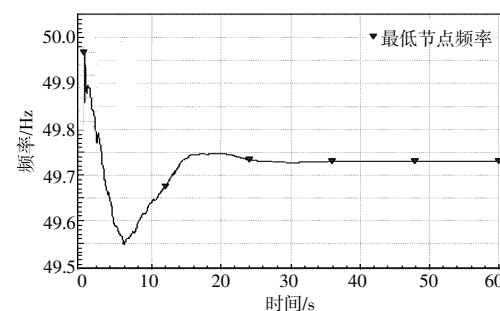


图 11 方案 2 解列后子系统频率响应
Fig.11 Frequency response of the subsystem under scheme 2

5 结论

本文针对电力系统主动解列问题展开研究,提出一种考虑含新能源孤网稳定性的主动解列断面搜索方法,基于理论和仿真分析得到以下结论。

①本文所提方法以线路阻抗和传输功率的比值作为电力系统带权无向图的边权值,进而根据节点到发电机群的平均最小边权值累加和划分一般节点和公共节点,能够在缩小解列断面搜索空间的同时,减少可行解丢失的情况。

②在以最小潮流冲击为目标得到初始解列断面后,进一步考虑节点耦合连接度较大的薄弱节点和新能源渗透率,在邻域搜索空间中对解列断面进行优化调整,能够提升解列后孤网子系统的稳定性。

如何更加详尽严谨地考虑新能源出力的随机性和波动性,建立涵盖更多场景、更加完善的解列断面搜索的数学模型是下一步研究工作的重点。

参考文献:

- [1] 易俊,卜广全,郭强,等.巴西“3·21”大停电事故分析及对中国电网的启示[J].电力系统自动化,2019,43(2):1-9.
- [2] Franco R, Sena C, Taranto G N, et al. Using synchrophasors for controlled islanding -A prospective application for the Uruguayan power system [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(2):2016-2024.
- [3] 刘奇,孙鸣,丁剑,等.风电并网对电网失步振荡及解列措施的影响[J].可再生能源,2016,34(6):837-845.
- [4] 刘福锁,方勇杰,吴雪莲,等.基于相位角的失步解列判据在复杂场景下的适应性及对策[J].电力系统自动化,2015,39(16):71-75.
- [5] 于枋彤,刘铖,张宇驰.输电线开断控制对交直流混联电力系统暂态稳定性影响研究[J].东北电力大学学报,2023,43(1):85-91.
- [6] 倪敬敏,沈沉,陈乾.基于慢同调的自适应主动解列控制(一):理论基础探究[J].中国电机工程学报,2014,34(25):4374-4384.
- [7] Ding L, Gonzalez L, Peter W, et al. Two-step spectral clustering controlled islanding algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 75-84.
- [8] 杨健,唐飞,廖清芬,等.基于半监督谱聚类的主动解列最优断面搜索[J].电网技术,2015,39(1):242-249.
- [9] Aghamohammadi M R, Shahmohammadi A. Intentional islanding using a new algorithm based on ant search mechanism [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2012, 35(1): 138-147.
- [10] Li L, Liu W, Cartes D A, et al. Slow coherency and angle modulated particle swarm optimization based islanding of large-scale power systems [J]. Advanced Engineering Informatics, 2009, 23(1): 45-56.
- [11] 贾骏,谢天喜,陈舒,等.基于凸优化理论的电力系统主动解列最优断面搜索研究[J].中国电机工程学报,2018,38(1):168-177.
- [12] 贾骏,谢天喜,唐飞,等.考虑无功功率的大电网主动解列最优断面搜索策略[J].电工技术学报,2017,32(S1):68-74.
- [13] 汤奕,郑晨一,肖晋宇,等.考虑多因素的主动解列断面搜索方法[J].全球能源互联网,2019,2(4):417-424.
- [14] 王振浩,张明译,杜虹锦,等.考虑柔性直流落点约束的最优主动解列断面搜索算法[J].电工技术学报,2017,32(17):57-66.
- [15] 王乙斐,唐飞,刘涤尘,等.基于Dijkstra算法的最优解列断面快速搜索方法[J].电力自动化设备,2015,35(4):126-131.
- [16] Ding L, Ma Z, Wall P, et al. Graph spectra based controlled islanding for low inertia power systems [J]. IEEE Trans-actions on Power Delivery, 2017, 32(1): 302-309.
- [17] 王勤赫,边竞,齐文博,等.大规模风电经VSC-HVDC接入的电网频率控制策略[J].东北电力大学学报,2023,43(4):74-81.
- [18] 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.
- [19] 程敏,杨文涛,文福栓,等.电力系统主动解列断面搜索方法与孤岛调整策略[J].电力系统自动化,2017,41(19):37-45.
- [20] 杨田,刘晓明,吴其.风力发电选址和渗透率对连锁故障影响的研究[J].可再生能源,2018,36(11):1631-1637.
- [21] 郭小龙,毕天姝,刘方蕾,等.风、光高渗透率电网中考虑频率稳定的可再生能源承载力研究[J].可再生能源,2020,38(1):84-90.
- [22] Gomez L F R. Prediction and control of transient instability using wide area phasor measurements [D]. Manitoba: University of Manitoba, 2011.

A search method for controlled islanding surface considering the stability of isolated net-work with new energy sources

Liu Mingshun¹, Chen Junquan¹, Ma Qinfeng¹, Zhang Qingqing¹, Wang Yin¹, Chang Dongxu^{2,3}, Li Chengxiang^{2,3}

(1. Guizhou Power Grid Limited Liability Company Power Dispatching Control Center, Guiyang 550000, China; 2. State Key Laboratory of HVDC Technology (China Southern Power Grid Research Institute), Guangzhou 510663, China; 3. Guangdong Province New Energy Power System Intelligent Operation and Control Enterprise Key Laboratory, Guangzhou 510663, China)

Abstract: Controlled islanding is an important measure to ensure the stability of power system and avoid large-scale power outages. However, the traditional researches method that regard the splitting surface determination as a single objective optimization problem neglect the stability of isolated subsystem. Therefore, a control islanding strategy considering the stability of subsystem with new energy is proposed in this paper. Firstly, the initial islanding surface with the minimum power-flow disruption is obtained based on the electrical connections and power flow distribution between nodes. Then considering the electrical coupling connectivity of key nodes and the penetration of new energy, the final islanding surface is searched in the neighborhood search space of the initial solution, to improve the stability of the isolated network subsystem after splitting. Finally, the proposed method is analyzed based on the New England 39-bus system, and the simulation results validate the effectiveness and advancement of the method.

Keywords: controlled islanding; islanding surface search; new energy; stability of isolated subsystem