

Published in IET Generation, Transmission & Distribution
Received on 4th October 2013
Revised on 22nd May 2014
Accepted on 20th June 2014
doi: 10.1049/iet-gtd.2014.0228



基于约束谱聚类的大规模电力系统有意控制孤岛方法

Jairo Quirós-Tortós¹, rub<s:1> Sánchez-García², Jacek Brodzki², Janusz Bialek³, Vladimir Terzija¹

¹曼彻斯特大学电气与电子工程学院, 曼彻斯特, M13 9PL, UK

²南安普顿大学数学科学学院, UK南安普顿SO17 1BJ

³达勒姆大学工程与计算科学学院, UK达勒姆DH1 1TA E-mail: jairo.quirortortos@manchester.ac.uk

摘要:有意控制的孤岛是一种有效的纠正方法, 可以最大限度地减少级联停电导致大面积停电的影响。本研究提出了一种基于“约束谱聚类”的新方法, 该方法在计算上非常高效, 并确定了具有最小潮流中断的孤岛解决方案, 同时确保每个岛屿仅包含相干发电机。所提出的方法还使操作员能够约束任何不得断开的分支, 将其排除在孤岛解决方案之外。利用IEEE 39和IEEE 118总线测试系统的动态模型对该方法进行了测试。不同突发事件的时域仿真结果用于证明所提出方法的有效性, 以最大限度地减少导致大面积停电的级联中断的影响。此外, 还使用了一个实际规模的系统(具有815辆总线的大不列颠网络的缩小模型)来评估该方法在大规模网络中的效率和准确性。这些模拟表明, 作者的方法效率更高, 约为10倍, 并且比另一种现有的方法更准确, 以实现最小的潮流中断。

1 介绍

互联电力系统容易发生级联停电, 导致大面积停电, 有意控制孤岛(ICI)已被提出作为一种有效的纠正控制行动[1,2]。ICI是一种针对紧急状态和极端状态下系统的自适应控制策略[1-5]。在发生严重突发事件后, ICI有意地将整体网络分离成几个自我维持的电孤岛。这种自适应控制策略旨在仅在检测到不稳定性之后, 但在系统变得不可控之前作为最后手段使用[1,2]。

ICI问题可以建模为约束组合优化问题, 其复杂性随系统规模呈指数增长[6-11]。因此, 实时确定孤岛解决方案, 即在有限的时间范围内足够快地确保有效的孤岛, 是一个极其复杂的分析和实际问题[12,13]。

ICI方法旨在实时(在实践中需要几秒钟[12])确定一组必须在整个网络中断开连接的分支, 以创建稳定和可持续的岛屿[5-13]。在确定这组线路时, 应考虑多种约束, 如发电机相干性、负载-发电平衡、热极限、电压和瞬态稳定性。由于在ICI问题中

包括所有这些可能会导致一个非常复杂的问题, 无法在有限的时间范围内解决, 因此只能考虑约束的子集[13]。排除一些约束和系统的固有特征意味着需要额外的纠正措施[1-5], 以确保每个岛屿在后孤岛阶段保持其稳定性和安全边际[5-13]。

在上述约束中, 发电机相干约束作为真正暂态稳定约束的实际替代, 对于受控分离的成功至关重要, 因为它增强了岛屿的暂态稳定性[8,9,14]。因此, 目前的ICI方法旨在分裂系统, 使每个岛只包含相干发电机[5-13]。

现有的ICI方法可以根据所使用的目标函数进行分类。两大类是:(a)最小功率不平衡, 例如[5-11], (b)最小功率流中断, 例如[12,13,15]。前者的方法最大限度地减少岛屿内的负荷产生不平衡, 后者的方法最大限度地减少系统孤岛后潮流模式的变化。

尽管这些方法会产生不同的孤岛解决方案, 但它们都可以被描述为图上的搜索问题, 这通常是“NP-hard”[16], 因此没有一般的“多项式时间”算法来解决

找到最优解[17]。因此, 为了快速确定孤岛解, 必须使用计算效率更高的近似最优解的算法来代替[8-10]。

特别是, 可以使用高效的图论技术, 如“谱聚类”[18]来实现具有最小潮流中断的解决方案。该技术使用与表示电力系统的图相关的矩阵的特征值和特征向量来确定“多项式时间”内的分裂解[18]。频谱聚类在[12]中用于确定具有最小潮流中断的孤岛解。尽管这种方法计算效率很高, 但它不包括ICI问题中的发电机相干性约束。未能考虑这一重要约束限制了该方法的使用[13]。

最近, 文献[13]提出了一种光谱聚类控制孤岛(spectral clustering controlled island, SCCI)算法。SCCI算法最大限度地减少了潮流中断, 同时确保每个岛只包含连贯的发电机。然而, 孤岛解只能在岛屿数为两个时直接确定, 即SCCI算法只在“对分情况”下找到解。这个问题可以通过应用“递归平分法”来解决[13]。然而, “递归平分”是一种计算要求很高的技术, 需要对与图相关的矩阵进行重复的“特征分解”。递归对分也会影响孤岛解的质量[18-22]。

本文提出了一种基于约束谱聚类的新方法, 其计算效率更高。我们的方法直接确定了任何给定数量的岛屿的最小潮流中断的孤岛解决方案, 同时确保每个岛屿仅包含相干发电机。此外, 它使运营商能够约束任何分支被排除在解决方案之外。该方法只解决一次相关的“特征问题”, 即使要创建多个岛屿(大于两个), 并且避免了迭代算法(例如k-means[18])。这些优点显著提高了计算效率和解决方案的质量, 特别是在处理大规模系统时。

我们使用IEEE 39和IEEE 118总线测试系统的动态模型来测试我们的方法。时域仿真结果用于证明该方法的有效性, 以最大限度地减少导致大面积停电的级联中断的影响。我们还使用了一个具有815个节点的精简大不列颠网络来证明我们的方法在计算上非常有效, 并在我们所有的模拟中确定了一个“良好的孤岛解决方案”, 这意味着相对于岛屿的大小, 功率流中断较小的解决方案。

本文的组织结构如下。第2节介绍了谱图聚类的背景资料, 并介绍了本文考虑的ICI问题。第3节介绍了提出的ICI方法, 在第4节中, 我们研究了其在防止级联停电导致大面积停电方面的有效性。最后, 第5节讨论了新的ICI方法的主要优势和局限性, 第6节总结了从本研究得出的结论。

2 谱图聚类与ICI

本节介绍谱图聚类的背景。谱聚类是一种计算效率很高的图论技术, 它可以使用与表示电

力系统的图相关的矩阵的特征值和特征向量来划分系统[18]。本节还解释了考虑到发电机相干性约束的最小潮流中断的ICI问题, 并引入了一个质量指标来衡量我们方法的性能。

2.1 谱图聚类

2.1.1图论基础: 一个有 n 个母线和 m 个发电机的电力系统可以表示为一个加权无向图 $G = (V, E, \omega)$ 。元素 $v_i \in V, i = 1, 2, \dots, n$, 和 $e_{ij} \in E, V \times V, i, j = 1, 2, \dots, n$, 分别表示 G 的节点和边。集合 V 和 E 分别表示系统的总线和分支。由于电力系统的性质, 可以假设 G 是简单的, 即不存在多重边, 也不存在环路。

数字 $w_{ij} = \omega(e_{ij}), i, j = 1, 2, \dots, n$, 表示与边相关的权重因子 $e_{ij} \in E$ (有功潮流)。为了适应网络损耗, w_{ij} 的值计算如下

$$w_{ij} = w_{ji} = \begin{cases} \frac{|P_{ij}| + |P_{ji}|}{2} & \text{if } e_{ij} \in E \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

式中 P_{ij} 、 P_{ji} 分别表示从母线 i 到 j 到 i 的支路有功潮流。

我们定义生成节点的子集 V_{GN} , V , 以元素 $v_i^{GN} \in V_{GN}$ 来表示系统的 m 个生成母线。因此, 负载节点的子集 $V_{LD} = V \setminus V_{GN}$ (其中 \setminus 表示集合论差分, 并将 V_{LD} 定义为 V 中未出现在 V_{GN} 中的节点集合, 其元素为 $v_i^{LD} \in V_{LD}$)被定义为表示 $n-m$ 个负载总线。例如, 图1显示了IEEE 39总线系统的图形表示。黑点和灰点分别是产生节点和负载节点。我们将在4.1节中更详细地解释图1中所示的子图。

2.1.2图拉普拉斯矩阵: 拉普拉斯矩阵在图论中用于描述和研究图[18]。有两种主要类型的拉普拉斯矩阵:

“非规范化”拉普拉斯矩阵 L 和“规范化”拉普拉斯矩阵 L_N 。这些矩阵在本文中用于表示系统分支中的有功功率流。

G 的“非归一化”拉普拉斯矩阵 L (在[13]中使用)是 $n \times n$ 矩阵, 计算如下[18]

$$[L]_{ij} = \begin{cases} d_i & \text{if } i = j \\ -w_{ij} & \text{if } i \neq j \text{ and } e_{ij} \in E \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

其中 d_i 是节点 v_i 的加权重, 定义为连接到该节点的边的总权重[18]

$$d_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} \quad (3)$$

矩阵 L 可以写成 $L = D - W$, 其中 D 为非零条目的对角矩阵 d_i , W 为 G 的加权邻接矩阵, 即 ij 条边为 w_{ij} 的矩阵。

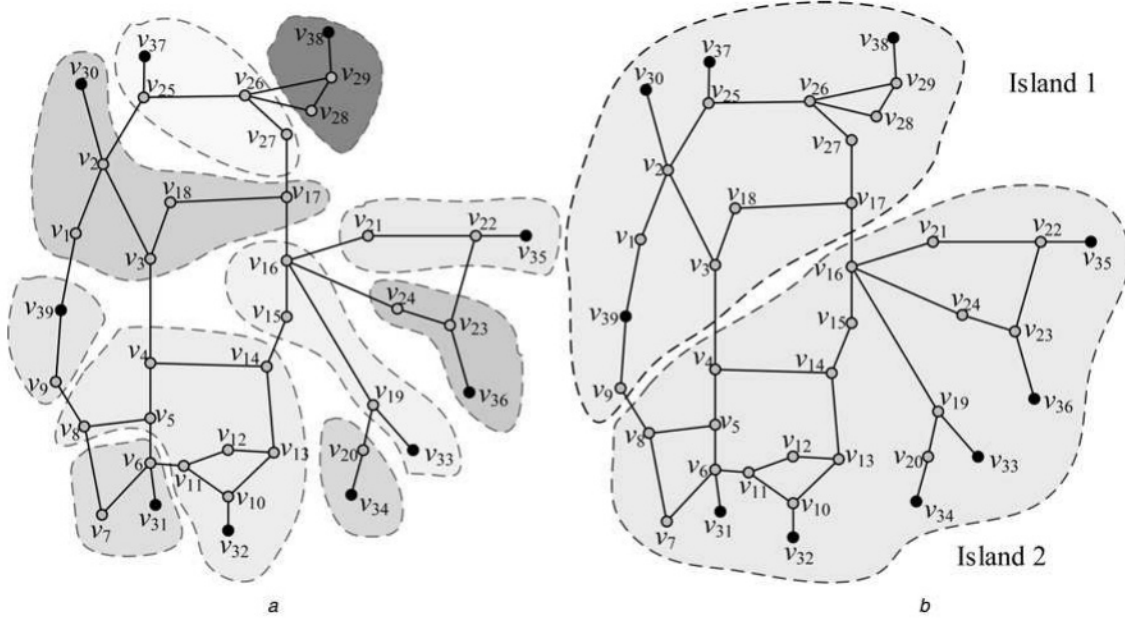


图1 IEEE 39总线系统的结果

a图中“Voronoi”图的表示b $r=2$ 情况下的孤岛解

G的“归一化”拉普拉斯矩阵为 $n \times n$ 矩阵 $L_N = D^{-1/2} L D^{-1/2}$, 即:[18]

$$[L_N]_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } i = j \\ -w_{ij}/\sqrt{d_i d_j} & \text{if } i \neq j \text{ and } e_{ij} \in E \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

矩阵 L_N 具有与尺度无关的优点, 特别是, 它允许比较具有不同权重的图[18-22]。

2.1.3 拉普拉斯矩阵的特征值:谱

聚类使用 r 个 L 或 L_N 的特征向量为节点 $v_i \in V$ 在 r 维欧氏空间 R^r 中提供几何坐标[18]。然后使用这种所谓的“谱嵌入”(见图2中的示例)对 R^r 中的点云使用聚类算法(如 k -means[18])对数据点进行聚类。我们使用归一化拉普拉斯算子 L_N , 因为许多研究表明, 与加权网络上的 L 相比, 它提供了更好的性能[18-22]。因此, 我们将使用特征向量 c_1, c_2, \dots, c_r , 与矩阵 L_N [18]的最小 r 个特征值 $0 = v_1 \leq v_2 \leq \dots \leq v_r$ 相关联。在我们的方法中, r 的值是要创建的岛屿的数量。该值对应于已识别的发电机相干群的数量[4-13], 因为目前的实践(例如[23,24])表明, 岛屿的数量应等于严重干扰后获得的相干群的数量。请注意, 尽管如此, 所提出的方法可以确定任何给定数量的岛屿的孤岛解决方案。

2.1.4 谱嵌入:谱嵌入是指

使用特征向量 c_1, c_2, \dots, c_r 表示 R^r 中的 G [18]。将这些特征向量按列排序, 生成一个矩阵 $X [R^n \times r]$, 其行为 $x_i, i = 1, 2, \dots, n$ 。然后向量 x_i 表示节点 $v_i \in V$ 在 r 维欧氏空间 R^r 中的坐标。

为了提高解的质量, 在应用任何聚类技术之前, 向量 x_i 必须被归一化为长度为1[19,22]。因此, 我们定义

$$y_i := \frac{x_i}{\|x_i\|}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

归一化(5)有效地将向量 x_i 投影到单位 $(r-1)$ 维“球体” $S^{r-1} = \{y_i | R^r \text{ 使 } \|y_i\| = 1\}$, 并创建行为 y_i 的矩阵 $Y [R^n \times r]$ 。

计算谱嵌入后, 节点 $v_i \in V$ 可视为 R^r 中的数据点 x_i , S^{r-1} 中的数据点 y_i 。例如, 我们绘制了图2a中的矢量 x_i 和图2b中的矢量 y_i , 用于 $r=2$ 时IEEE 39总线系统的频谱嵌入。

2.1.5 代表性数据点(质心):我们定义 X_{GN} , X 和等价的 Y_{GN} , Y 作为代表 m 个生成节点 $v_{GN}^i [V_{GN}]$ 的数据点的子集。观察 $|X_{GN}| = |Y_{GN}| = m$, 我们称这些数据点为“质心”, 并分别用 R^r 和 S^{r-1} 中的 x_{iGN} 和 y_{iGN} 表示它们。我们将在第3节中解释这些质心的功能。使用质心的优点是:(i)满足生成器相干性约束, (ii)加速解的识别, (iii)通过降低相似矩阵的阶数来减少内存使用。为了说明, 图2将质心显示为点, 剩余的数据点(表示负载节点)显示为星号。

2.1.6 约束谱聚类:约束

光谱聚类是谱聚类的扩展, 它允许使用两种主要类型的约束, 必须链接(ML-)和不能链接(CL-)约束[20, 21]。两个节点之间的ml约束表示这对节点必须聚在一起, 而cl约束指定这对节点不能分配到同一个集群。我们将在本文中只考虑ml约束, 以排除必须

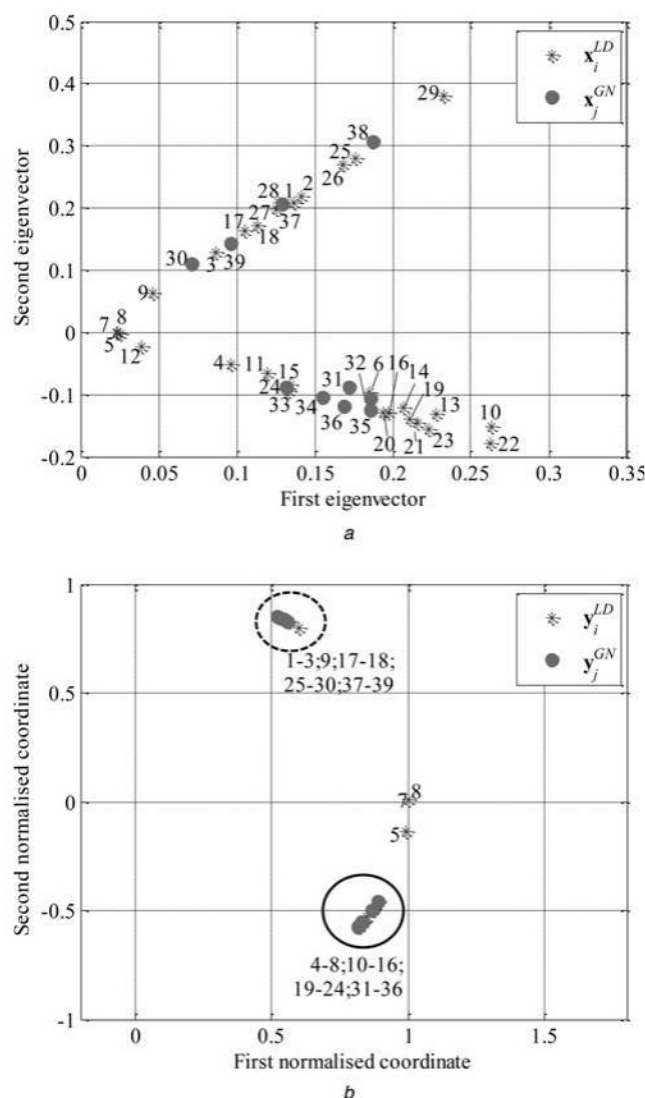


图2 IEEE 39总线系统

欧几里得空间 R^2 中的二维频谱嵌入

b单位圆S上的归一化向量¹

图上的数字对应节点号

点和星号分别代表生成节点和负载节点

不能与孤岛解决方案分离，因为人们认为cl约束与实际实现的相关性较小。

2.2 有意控制的孤岛

图3给出了ICI的一般概念[25,26]，它与停电进程有关[27]。健康系统在 $t=t_{\text{dist}}$ 发生严重扰动(称为初始事件)后，通常会发生电力系统的缓慢退化[1,2]。虽然可以实施补救措施(RA)以尽量减少中断传播，但它们可能无法将系统恢复到安全状态，因为它们不够充分，或者操作员可能只是没有及时有效地实施。这通常会导致系统进入快速级联中断，触发系统组件的不受控制的断开连接，并导致大面积停电[1,2]。

在这种情况下，ICI旨在通过将电力系统分割成几个稳定的孤岛来限制这种快速级联停电[28]。当漏洞分析表明需要在 $t=t_{\text{nec,isl}}$ (当RA无法最小化初始事件的影响时)隔离时，必须确定隔离解决方案。为了避免可控孤岛中的任何延迟，重要的是ICI方法的计算效率要高，以减少计算时间[4]。因此，在短暂的计算时间(记为 t_{comp})之后，必须确定一个孤岛解决方案，以便在实施时间(t_{imp})拆分电力系统，这必须是在系统变得不可控之前。期望采取孤岛后的纠正措施(如快速阀门、减载等)，并获得稳定的孤岛运行[25]。

2.2.1 发电机一致性:发电机组可以

严重扰动后失去同步性[8,14,29]。在确定孤岛解决方案时，这些动态相干的发电机群中的每一组都必须被分隔成不同的孤岛，以帮助系统的暂态稳定性[12]。因此，当发生器的相干群(表示为 $V_{\text{GN}1}, \dots, V_{\text{GN}r}$)在严重扰动之后被识别时，也就是说，使用如[24,29]中描述的方法，我们的方法将创建岛屿，使每个岛屿都只包含相干发生器，如下所述。

2.2.2 孤岛解决方案和目标的质量

函数:谱聚类找到一个切集，即边的子集 E_s, E ，它的移除将图 G 分割成 r 个不相交的子图 G_1, \dots, G_r [18]。每个子图对应一个节点集 V_1, \dots, V_r ，使得 $V_1 \cup \dots \cup V_r = V$ 和 $V_i \cap V_j = \emptyset$ for 所有 $i \neq j$ 。一个孤岛解包含

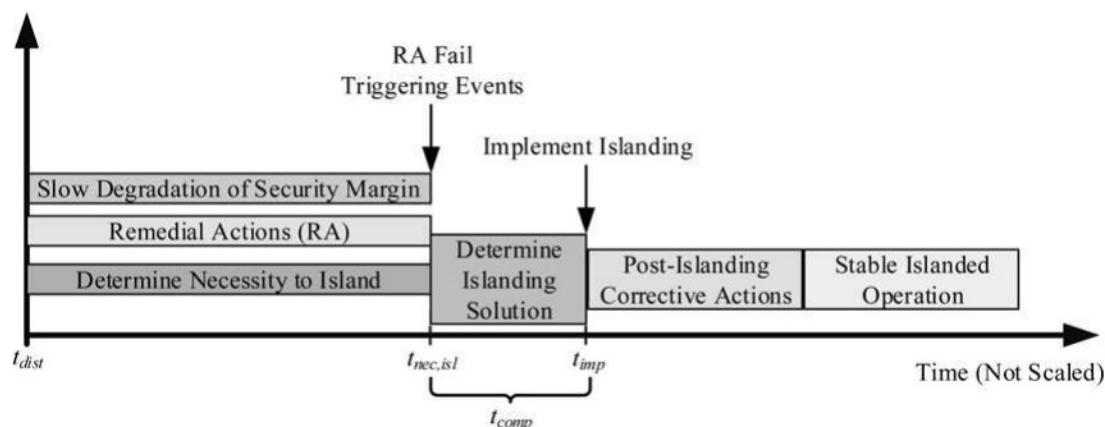


图3显示方法实施的时间线[26]

确定一个合适的切集, 将电力系统分割成由子图 G_1, \dots, G_r 表示的岛屿。

我们需要一个孤岛解决方案(切割集)质量的度量来评估该方法的性能。这可以使用每个子图(岛)的“切割”和“体积”之间的比率来完成。

由节点集 V_k 表示的岛的“切”是 V_k 中节点与不在 V_k 中的节点之间的边权之和, 即链接 V_k 与其补体 V_k^c 的边权之和[18]

$$\text{cut}(V_k, \bar{V}_k) = \sum_{v_i \in V_k, v_j \in \bar{V}_k} w_{ij} \quad (6)$$

cut衡量的是岛屿的连通性, 在我们的例子中, 它对应于如果岛屿 V_k 与系统的其余部分断开连接时的潮流中断。然后, 我们在以下意义上使这个量相对于岛屿的大小。

具有节点集 V_k 的岛屿的“体积”是其节点的加权重之和[18]

$$\text{vol}(V_k) = \sum_{v_i \in V_k} d_i \quad (7)$$

岛屿的体积表示岛屿的内部功率流加上跨界流。

然后我们可以定义岛屿的质量 V_k 为1减去相对于其大小的切割

$$\phi(V_k) = 1 - \frac{\text{cut}(V_k, \bar{V}_k)}{\text{vol}(V_k)} \quad (8)$$

数量 $f(V_k)$ 的范围从0到1, 并衡量一个岛屿相对于其体积的连通性。出于聚类目的, $f(V_k)$ 的值越大, 则认为岛屿的连通性越好[30]。例如, $f(V_k) = 0.98$ 表示连接较差的岛屿(其跨界流量占其总内部功率流的2%), 因此比连接较好的岛屿($f(V_k) = 0.65$)更适合孤岛化。因此, 较大的 $f(V_k)$ 代表了一个功率流中断较小而内部功率流较大的岛屿。

我们将孤岛解决方案的整体质量定义为它所创造的岛屿的最差(最低)质量, 即:

$\text{Min}(f(V_k))$ 。因此聚类目标函数为 $k=1, 2, \dots, r$

$$\max_{V_1, \dots, V_r} \min_{k=1, 2, \dots, r} (\phi(V_k)) \quad (9)$$

也就是说, 在它的孤岛中找到使最差(最小)质量最大化的 r 分割。

此外, 我们要求每个岛只包含相干发生器

$$V_{\text{GNi}} \subset V_i \quad (10)$$

也就是说, 第 i 个岛必须包含第 i 组相干发生器。这种整体公式(9)和(10)降低了创建的岛屿中分支过载的可能性[14], 并增加了每个岛屿中的生成器保持同步的概率[12, 13]。

最后, 我们使操作员能够从孤岛解决方案中排除分支。为此, 我们定义了一个新的子集 E_c , E 来表示不能断开的分支, 即

不可用的线路, 对孤岛的稳定性很重要的线路或没有同步检查继电器的线路(这些设备在恢复过程中至关重要[12])。排除这些分支相当于强加条件 $E_c \cap E_s = \emptyset$, 也就是说, 只考虑具有切分集 E_s 的分区, 切分集 E_s 不包含 E_c 中的任何排除边。

有了这些新的约束集, 我们试图解决的问题可以公式化为查找

$$\begin{aligned} \min_{V_1, \dots, V_r} \max_{k=1, 2, \dots, r} & \left(\frac{\text{cut}(V_k, \bar{V}_k)}{\text{vol}(V_k)} \right) \\ \text{subject to} & \\ & V_{\text{GNi}} \subset V_i, \text{ and } E_c \cap E_s = \emptyset \end{aligned} \quad (11)$$

请注意, 图上的这种类型的最小-最大优化问题(11)与拉普拉斯特征值有关, 这是关于最小潮流中断和谱聚类的孤岛之间的关键联系[18]。事实上, 寻找(11)的最优解通常是np困难的, 而谱聚类提供了一种寻找(11)松弛解的有效方法[30], 也就是说, 它在多项式时间内给出了近似解(详细信息可在[18]和大量谱聚类文献的其他地方找到)。近似解和最优解可以通过所谓的“Cheeger不等式”联系起来[22], 这是谱聚类方法的主要理论依据之一[18]。在4.1节中, 我们将我们的解的质量与由“Cheeger不等式”的理论下界定义的最优解的质量进行比较[22]。

3 提出的孤岛方法

我们的方法旨在最小化潮流中断, 同时满足发电机相干约束并从孤岛解中排除约束支路, 即我们的目标函数由(11)给出。如上所述, 我们使用谱聚类来近似解决这个np困难问题的多项式时间(在我们所有的测试用例中都是几秒钟)。图4显示了所提出方法的流程图, 该方法基于[19]的谱聚类算法。我们用一个 S (步长)和一个数字来标识每一步, 我们在每一步中使用2.1节中提供的定义。

步骤1: 使用孤岛时刻计算的功率流数据构建图 G (图3中的 trec.isl)。

步骤2: 识别要从割集中排除的边 $e_{ij} \in E_c$, 并将其相关权重因子更改为 W 中的最大值(即 $\max(W)$)

$$\text{for all } e_{ij} \in E_c, \text{ let } w'_{ij} = w'_{ji} = \max(W) \quad (12)$$

(12)中的变化创建一个新的加权邻接矩阵 W' , 然后使用(4)来计算矩阵 L_N 。步骤3: 计算 L_N 的特征向量 c_1, c_2, \dots, c_r 。步骤4: 创建矩阵 $X [R_n \times r]$, 并计算谱嵌入(示例见图2a)。

步骤5: 在 R^r 中定义质心 $x_{\text{GNi}} [X_{\text{GN}}]$ (例如如图2a中的圆点)。其余数据点 $x^{(i)} [X \setminus X_{\text{GN}}]$ (如图2a中的星号)表示 G 的负载节点。

步骤6: 使用(5)对向量 $x_i \in X$ 进行归一化, 以计算构成矩阵 $Y [R_n \times r]$ 的行向量 y_i 。的

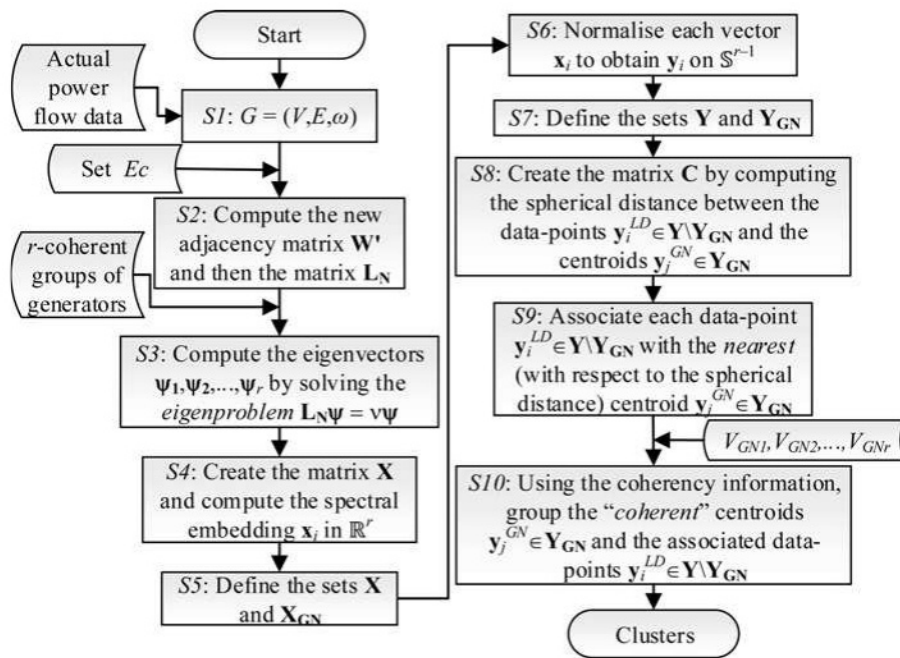


图4拟议方法流程图

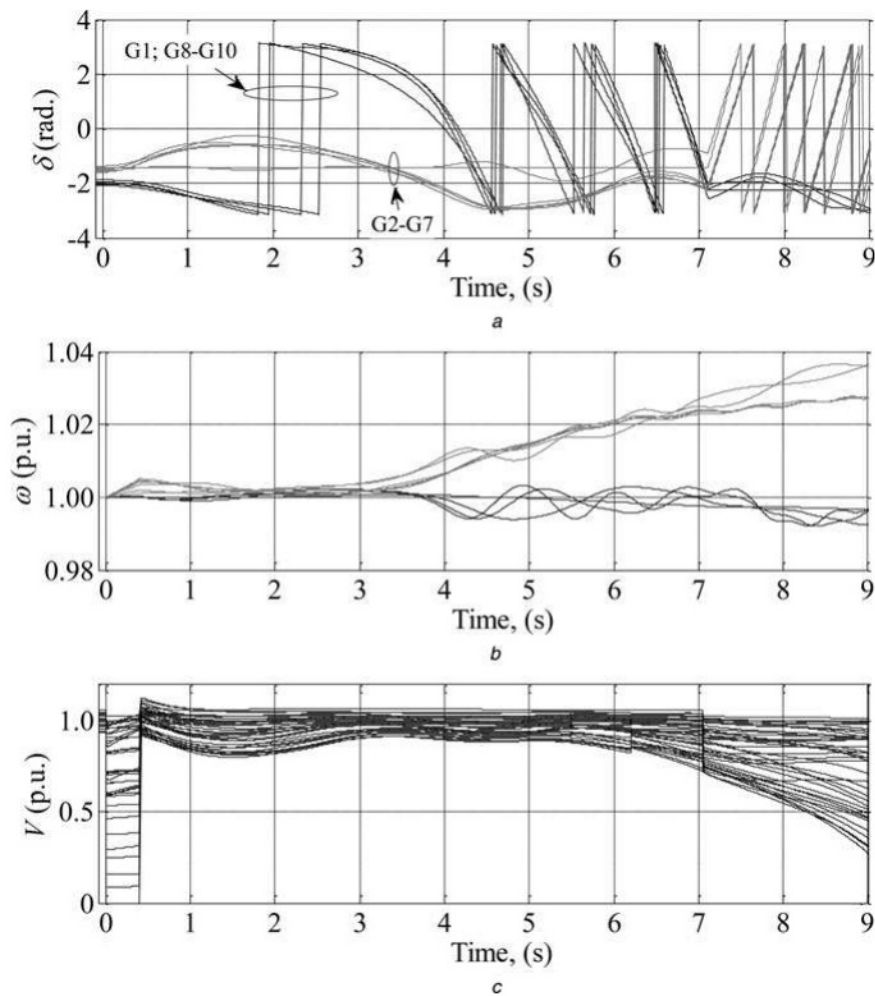


图5没有孤岛发电机转子角度的IEEE 39总线系统的结果

b 发电机转速

c 电压幅值

表1 将IEEE 39总线系统隔离成两个孤岛的结果

Cutset	Island no.	Cut, MW	Volume, MW	$\phi(V_k), \%$
$e_{8,9}, e_{3,4}, e_{16,17}$	1	12	7383	99.84
	2	12	18 605	99.94

向量 y_i 将节点 $v_i \in V$ 表示为 S^{-1} 上的数据点(示例见图2b)。

步骤7: 定义 S^{-1} 上的数据点 $y_{GNi} [Y_{GN}]$ (图2b中的点)作为 S^{-1} 上的质心。

步骤8: 计算数据点 $y_{LDi} [Y_{GN}]$ 与质心 $y_{GNj} [Y_{GN}]$ (图2b中的星号和圆点)之间的距离 c_{ij} 。这就创建了一个相似矩阵 $C = (c_{ij})$ 。请注意, C 的大小被缩减为 $(n-m) \times m$, 这种缩减的优点将在4.4节中讨论。步骤9: 将每个数据点 $y_{LDi} [Y_{GN}]$ 与最近的质心 $y_{GNj} [Y_{GN}]$ 关联起来。数学上, 我们在 c 的第 i 行中识别最小值, 因此每个负载节点 $v_{LDi} [V_{LD}]$ 被分组为一个且只有一个生成节点 $v_{GNj} [V_{GN}]$ 。例如, 我们在图2b中发现, 数据点28和29比任何其他质

心更接近标记为38的质心。因此, 节点 v_{28}, v_{29} 与 v_{38} 分组。当每个负载节点与最近的生成节点相关联时, 得到 m 个不相交的子图(见图1a)。我们将这些子图中的每一个定义为“最小潮流中断的发电机械”。这是“Voronoi”图的一个特例[31], 它简单地将每个点分配给离它最近的质心。在我们的方法中, 每个生成器都有一个不同的域, 图1a中说明了生成器域的示例, 并在第5节中进行了详细解释。

步骤10: 通过对相干生成节点的域进行分组来创建最终的集群(岛屿)。这确保了生成器的相干性约束得到满足。例如, IEEE 39中发生器的相干群为 $VGN1 = \{v_{30}, v_{37}, v_{38}, v_{39}\}$, $VGN2 = \{v_{31}, v_{32}, v_{33}, v_{34}, v_{35}, v_{36}\}$ (图5), 从而得到图1b所示的孤岛。

4 仿真结果

本节给出仿真结果。我们使用IEEE 39和IEEE 118总线测试系统的动态模型, 通过时域模拟证明该方法可以最大限度地减少级联的影响

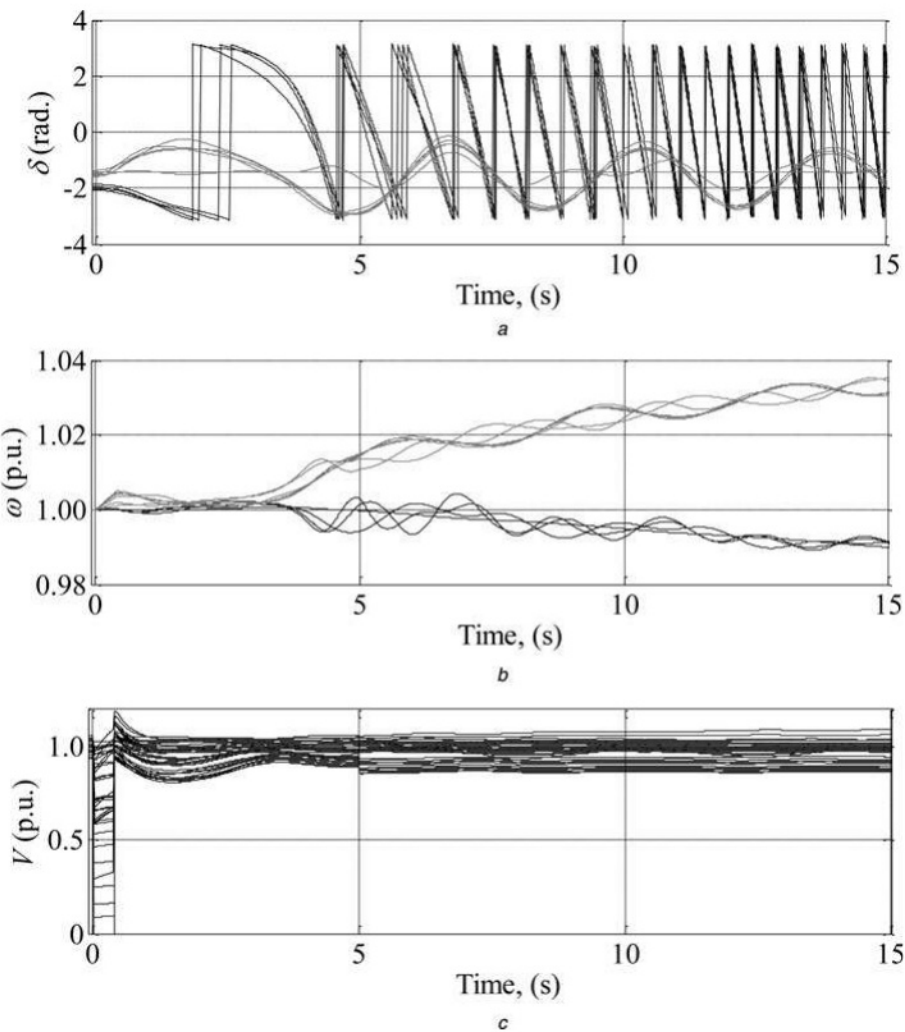


图6 IEEE 39总线系统在发电机转子角孤岛情况下的结果

a 发电机转速
c 电压幅值

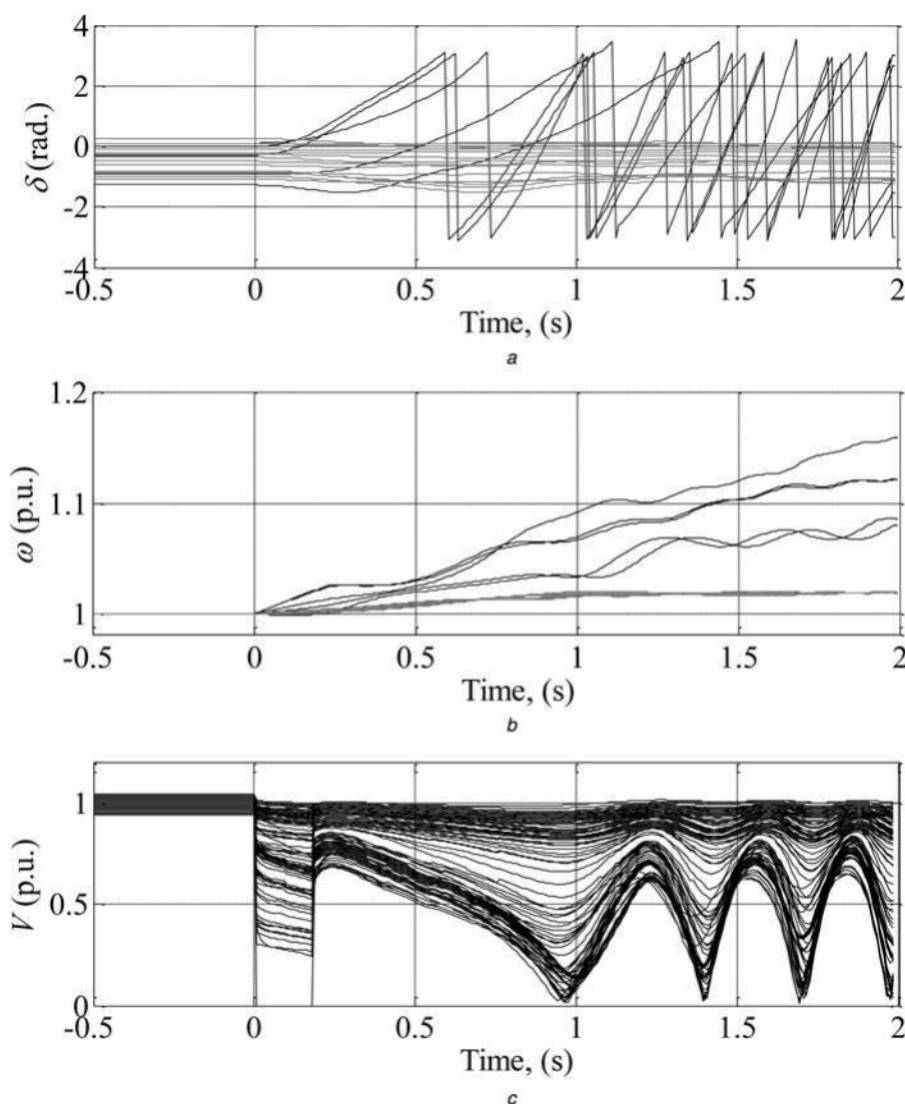


图7 IEEE 118母线系统不孤岛发电机转子角的结果

a 发电机转速

c 电压幅值

导致停电的停电。我们还使用了一个具有815个总线的缩减大不列颠网络的静态模型来展示我们方法的可扩展性，并表明它比[13]中详细介绍的SCCI算法在计算上更高效、更准确，特别是对于大规模网络。所有时域模拟都在DIgSILENT PowerFactory中进行[32]，该方法已在MATLAB中实现[33]。仿真中使用的保护继电器的时间设置经过精心选择，以显示所需的振荡模式，尽管在实践中，它们可能更短。此外，瞬时功率流用于断开过载线路。所有引用的时间都是基于在具有2.33 GHz双核CPU和2 GB RAM的PC上进行的模拟。

4.1 测试用例1:IEEE 39总线系统

我们在一个小型网络中使用IEEE 39总线系统来说明我们的方法。该系统 and 控制器(仅限自动电压调节器和电力系统稳定器)的数据可在[34]中找到。

测试案例描述:我们在保持相同功率因数的情况下，将基本负荷水平提高了25%。这样做是为了给系统施加压力，增加干扰后不稳定的可能性。这一增量在发电机G2-G7之间均匀分布。其他发电机的输出功率保持不变。然后我们考虑在时间 $t = 0$ s时，在16-17线附近的母线16附近发生三相对地固体故障，在 $t = 0.4$ s时本地继电器打开故障线后被清除。如果不采取控制措施，可以从图5a中观察到，系统在2.8 s左右失去同步。事实上，软件DIgSILENT PowerFactory[32]在 $t = 2.85$ s时显示出失步(极滑)。然后，由于16-17号线断开引起的功率振荡和线路过载，多条线路级联断开。13-14线在时间 $t = 5.5$ s断开。然后，这分别在6.2、6.7、7.1和7.3 s的时间触发了4-5、3-4、5-8和6-7行不受控制的级联中断。这些级联停电导致系统不受控制地分离成三个岛屿，最终受到停电的影响。图5b显示了发电机的频率。如前所述，系统为

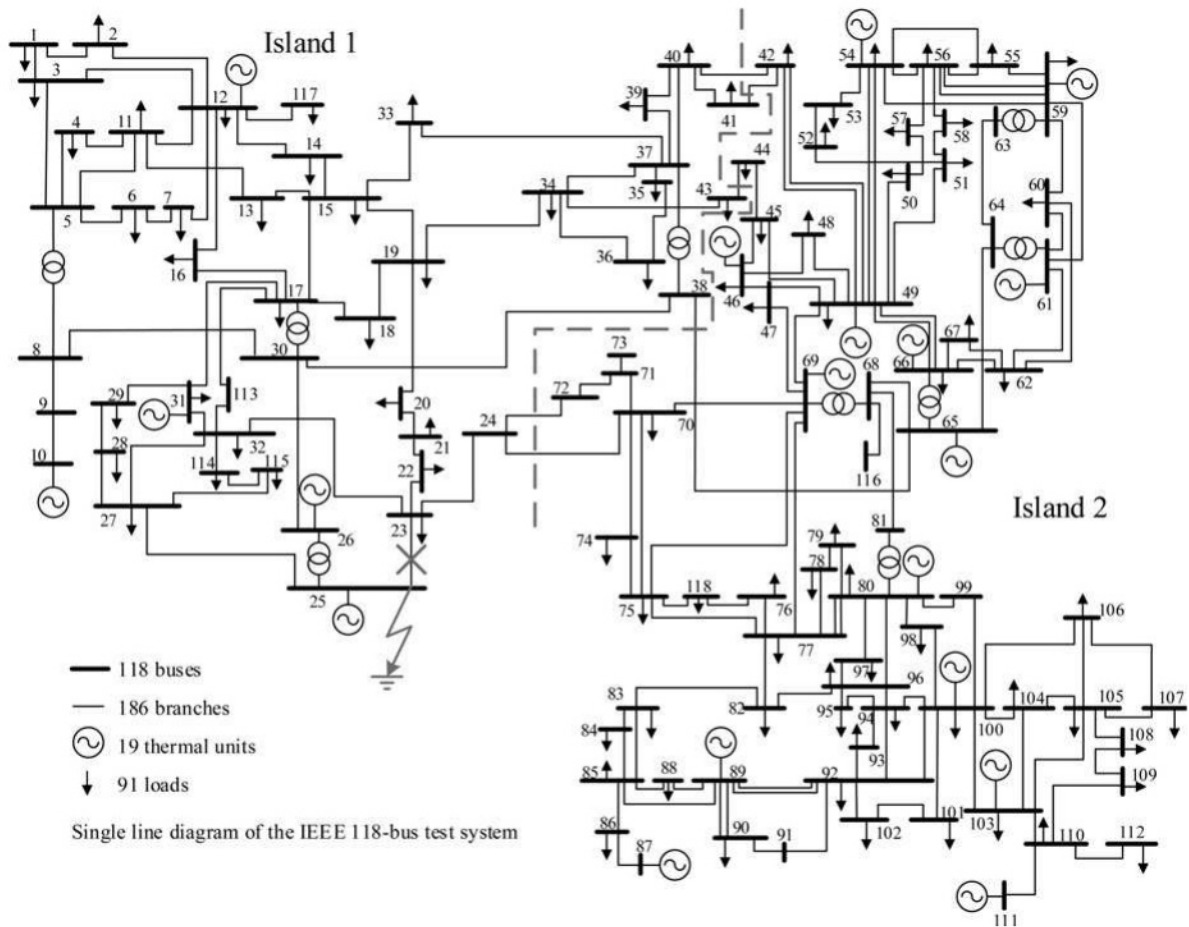


图8 IEEE 118总线测试系统单线框图及孤岛方案

分为三组，不平衡。最后，图5c说明了系统母线处的电压幅度相当小，导致系统在约7s时停电。

同步性的损失和发电机的频率是系统应该分裂的明确指标[11]。这里我们考虑在时间 $t = 3s$ 时对系统进行分区的必要性。在实际实现中，这个时间取决于在严重干扰之后执行的漏洞分析。我们使用我们的方法来确定相对于 $t = 3s$ 时支路中的实际功率流的最合适的孤岛解决方案。在为本测试用例提供的模拟中，我们假设任何传输线都可以包含在切割集中，即 $E_c = \emptyset$ 。我们从解决方案中排除了变压器。

由于在 $t = 3s$ 处识别出两个相干群，因此我们定义 $r = 2$ ，并考虑图2a所示的频谱嵌入 r^2 。然后我们对 R_2 中的向量 x_i 进行归一化， $i = 1, 2, \dots, 39$ ，因此它们位于图2b所示的单位圆 S^1 上。然后我们计算向量 $y_{LDi} [Y \setminus Y_{GN}(\text{星号})]$ 和质心 $y_{GNj} [Y_{GN}]$ 之间的距离

(点)。我们使用这些距离来构建相似矩阵 C ，然后将每个负载节点 $v^{LD} [V_{LD}]$ 与最近的生成节点 $v^{GN} [V_{GN}]$ 分组。这种初步分组创建了“每个发电机的最小功率流中断域”，或Voronoi图，如图1a中不同背景阴影所示。

然后，由于图5中所示的已识别的相干发电机组为 $VGN1 = \{v30, v37, v38, v39\}$ 和 $VGN2 = \{v31, v32, v33, v34, v35, v36\}$ ，图1a中包含相干发电节点的集群被分组在一起，以确定图1b所示的孤岛解决方案。表1给出了得到的每个岛的cut(6)值、volume(7)值和 $f(V_k)$ (8)值。我们得出的结论是，造岛溶液的质量(所有岛屿的最小值 $f(V_k)$)为99.84%。

该溶液在大约 $1.5 \text{ ms} (t_{\text{comp}} = 0.0015 \text{ s})$ 内获得，因此在 $t = 3.0015 \text{ s}$ 时采取了相应的纠正控制策略。图6给出了考虑孤岛的动态仿真结果。我们可以看到，成功避免了停电，并创建了两个稳定的岛，频率为 $t = 15 \text{ s}$ ，在 $0.989 \sim 1.035 \text{ pu}$ 之间，电压在 $0.895 \sim 1.09 \text{ pu}$ 之间。的确，在孤岛后状态下计算的功率流证明了这些结果的可行性。请注意，这些机器没有配备调速器。在实际实施中，可以采用快速阀门等控制措施来减少频率偏差。

我们现在比较了由所提出的方法确定的孤岛解的质量，它在几毫秒内被发现，与最优解，其中

表2将IEEE 118总线系统隔离成两个孤岛的结果

Island no.	Cut, MW	Volume, MW	$\phi(V_k)$, %
1	28	7961	99.65
2	28	10 193	99.73

一般不能在多项式时间内找到[18]。理论下界(由 L_N [22]的特征值 $v_2/2$ 定义)确定了最优解(由“Cheeger不等式”定义, 详见[22])的质量限定在99.87%, 而我们的近似值的质量为99.84%。

4.2 测试用例II: IEEE 118总线系统

我们现在使用IEEE 118总线系统测试所提出的方法。发电机的动态数据可以在[11]中找到, 它们是根据[35]中的典型发电机数据选择的。发电机还配备了调速器。调控器模型取自DIgSILENT PowerFactory中的标准模型库, 为gov_TGOV1。BlkDef, 一个汽轮机调速器[32]。我们认为任何线路都可以包含在cutset E_s 中, 但变压器必须排除在外。

测试用例描述:我们认为在时间 $t = 0$ s时, 在23-25线的母线25附近发生三相接地故障, 并在0.18 s本地继电器打开故障线后被清除。得到的摆振轨迹如图7a所示。可以看到, 在故障清除后的短时间内, 发电机被分为两组:{10、12

、25、26、31}和{46、49、54、59、61、65、66、69、80、87、89、100、103、111}。从图7b和图c中可以观察到, 如果系统不分裂, 第一组发电机的频率明显增加, 网络主要部分的电压幅值明显降低, 如果不及时采取控制行动, 系统很快崩溃。

在这种情况下, 拆分系统的必要性被认为是0.38秒。通过我们的方法找到的孤岛解如图8所示。表2总结了每个孤岛的结果;此岛化溶液质量为99.65%。该溶液大约在8.1 ms内被发现, 因此在0.3881 s时进行了孤岛化。图9显示了后孤岛状态下电力系统的动态响应。这些结果表明, 我们的方法可以有效地防止停电。我们还可以看到, 两个频率在0.9987和1.0111 pu之间的岛屿被成功创建。与前面的情况类似, 我们使用孤岛后状态下的功率流来检验这些结果的可行性。值得一提的是, 这个测试网络还没有配备稳压器;因此, 所示的电压幅值

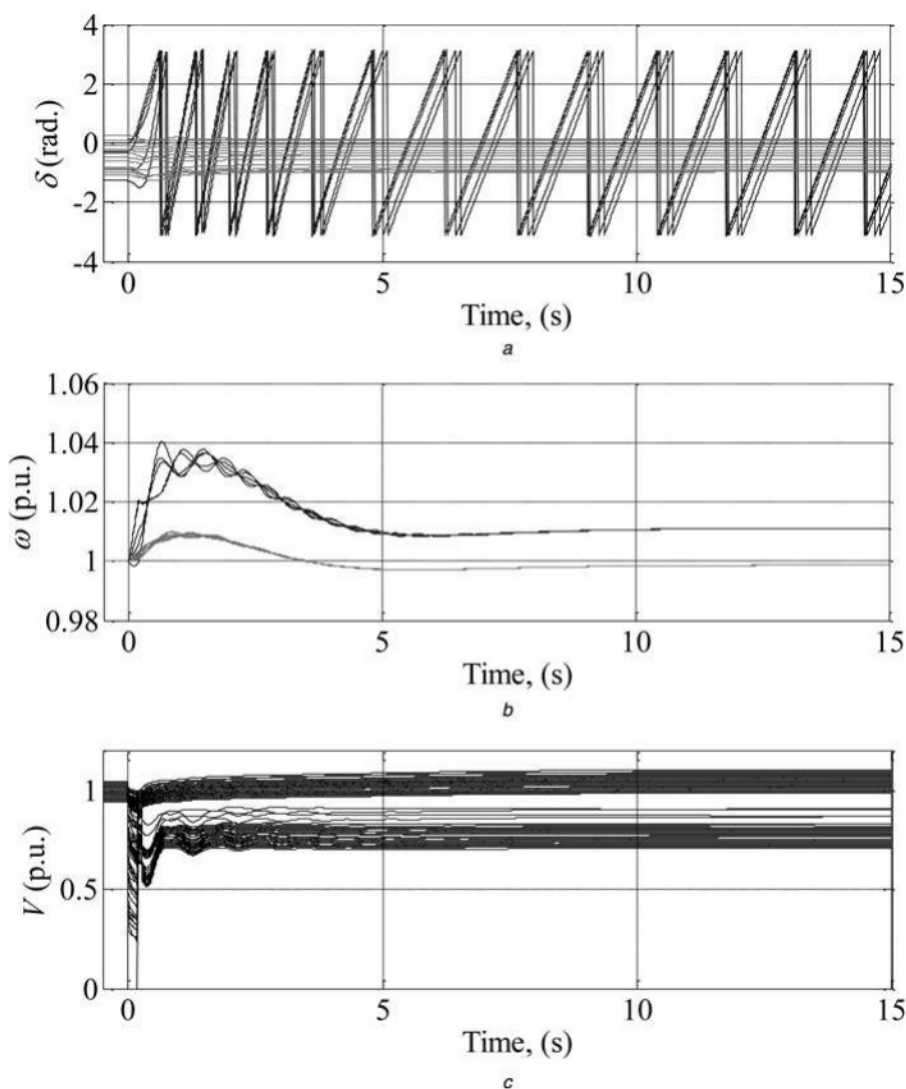


图9具有发电机转子角孤岛的IEEE 118总线系统的结果

a 发电机转速

c 电压幅值

表3使用大不列颠网络的结果和比较

No. of islands	Proposed methodology		Existing SCCI algorithm	
	Cut, MW	Quality, %	Cut, MW	Quality, %
2	1869	98.79	1869	98.79
3	1895	98.72	2167	95.06
4	3332	94.73	4204	93.69
5	5333	96.95	6318	95.06

在使用这些控制器的情况下，在图9c中预计会更高。

4.3 测试用例三:减少大不列颠网络

最后，我们使用一个实际大小的电力系统来测试所提出的方法，这是一个具有815个总线的缩小大不列颠网络的静态模型。具体来说，我们研究了 $r = 2, 3, 4, 5$ 时划分为 r 岛的情况。这些静态模拟旨在展示我们方法的可扩展性，并将其与现有的SCCI算法进行比较[35]。表3显示了使用两者的总潮流中断和每个孤岛解决方案的质量，即 $\min(f(V_k))$

$$k = 1, 2, \dots, r$$

[13]中提出的方法和SCCI算法。

使用我们的方法得到的结果同样好(当 $r = 2$ 时)或明显更好(当 $r = 3, 4, 5$ 时)。重要的是要注意，对于 $r = 3, 4$ 和5的情况，我们的方法将结果的准确性(以总潮流中断差异与使用现有技术的潮流中断之间的比率来衡量)分别提高了12.6, 20.7和15.6%。

4.4 评估所提出的方法的计算效率

我们在表4中列出了我们的方法的计算时间，并将其与[13]的SCCI算法的实现进行了比较。我们的方法的关键优势是只解决一次相关的“特征问题”，即使要创建多个岛屿，这大大加快了孤岛解决方案的确定，特别是在处理大型电力系统时，并有可能提高孤岛解决方案的质量[18-22]。

我们的方法的运行时间由实对称 $n \times n$ 矩阵的“特征分解”的运行时间支配。因此，我们的

表4使用建议的方法和现有SCCI算法的计算时间(在相同负载条件下超过1000个实例的平均运行时间)

Test system	Runtime using the proposed methodology, s	Runtime using the existing SCCI algorithm, s
IEEE 39 ²	0.0014	0.0141
IEEE 118 ²	0.0081	0.0455
Great Britain-815 ²	1.1478	7.3884
Great Britain-815 ³	1.1638	9.7664
Great Britain-815 ⁴	1.1653	9.9415
Great Britain-815 ⁵	1.1753	9.9901

上标表示创建的岛屿的数量

方法近似为 $O(n^3)$ [21]，尽管在使用 L_N 的稀疏形式时可以简化为 $O(n^{4/3})$ [15]。

关键信息是，即使对于大型电力系统，我们的方法也能够实时确定孤岛解决方案，如表4所示。事实上，与竞争的SCCI算法相比，我们的方法减少了大约10倍的计算时间。因此，我们的方法可以满足实时控制孤岛的需求。

5 讨论

所提出的ICI方法可以有效地防止导致大面积停电的级联停电，方法是在严重干扰后将功率流减少的线路上的大块网络隔离，也就是说，它可以找到功率流中断最小的孤岛解决方案。尽管与不受控制的分离相比，新方法显著提高了IEEE 39和IEEE 118总线测试系统的所有系统总线的电压(见图6和图9)，但还需要进行额外的研究，以帮助电压稳定性约束纳入公式中。这种进一步的改进可以帮助确保电力系统在采取孤岛行动后成功运行。此外，在实际实施新方法以评估其在这些新情况下的行为时，需要进行孤岛后分析和模拟。

所提出的ICI方法可以为任何给定数量的岛屿确定孤岛解决方案，同时确保每个岛屿仅包含相关发电机。尽管这种方法增强了岛屿的暂态稳定性[12]，但它不能考虑导致相关发电机群之间失去同步性的故障的位置。因此，考虑故障位置的额外研究可以进一步提高新方法的适用性。

为了增强未来岛屿的暂态稳定性，我们的方法遵循了当前的实践，并在公式中考虑了发电机相关性约束。然而，需要进一步的研究来考虑真正的暂态稳定约束。这仍然是一个开放、广泛和令人兴奋的研究领域。

最后，提出的ICI方法考虑了要创建的岛屿数量等于相关发电机群的数量。虽然这遵循了当前的实践，例如[23,24]，但进一步研究该方法对不同数量的岛屿的适用性将是有趣的。这是特别有趣的，因为由于系统运行条件和网络配置的变化，相关群的数量不一定是唯一的解决方案[19]，这将对获得的岛屿及其质量产生影响。

6 结论

本文提出了一种基于约束谱聚类的新方法，该方法确定了最小潮流中断的孤岛解决方案，同时确保每个孤岛仅包含相关发电机。它还使运营商能够约束任何分支被排除在孤岛解决方案之外。所提出的方法使用与表示电力系统功率流的图相关联的归一化拉普拉斯矩阵的前 r 个特征向量，并且该方法改进了

与使用非标准化拉普拉斯矩阵的竞争方法相比，孤岛解的质量。

新方法的关键优势在于，即使要创建多个岛屿，它也只解决一次相关的“特征问题”。由于我们避免了“递归平分”，该方法大大加快了孤岛解决方案的确定，同时提高了其质量。此外，我们的方法将表示生成节点的向量定义为欧几里德空间中单位球体上的质心，并且只计算一次表示负载节点的向量与质心之间的距离。这降低了相似性矩阵的阶数，避免了迭代方法的使用。这两个特征也有助于加速孤岛解的确定。

采用IEEE 39和IEEE 118总线测试系统的动态模型对所提出的方法进行了测试和验证。时域仿真结果用于证明我们的方法可以最大限度地减少导致停电的级联中断的影响。我们还在一个拥有815个总线的精简大不列颠网络上进行了静态模拟，以证明我们方法的可扩展性，表明它满足孤岛方法的实时要求，即使对于大型电力系统也是如此，并将其与竞争算法进行比较。这些模拟表明，我们的方法可以与实际的电力系统一起使用，在有限的时间范围内确定一个良好的孤岛解决方案，即相对于每个岛屿和任何给定数量的岛屿的功率具有较小的潮流中断的解决方案。

7 致谢

作者要感谢所有匿名审稿人在审稿过程中提出的许多宝贵建议。第一和第五作者要感谢英国工程与物理科学研究委员会(EPSC)资助EP/E009735/1，以及哥斯达黎加大学国际事务与对外合作办公室的财政支持。第二、第三和第四作者感谢EPSC拨款EP/G059101/1和EP/G060169/1的支持。

8 引用

- Andersson, G., Donalek, P., Farmer, R., *et al.*: 'Causes of the 2003 major grid blackouts in North America and Europe, and recommended means to improve system dynamic performance', *IEEE Trans. Power Syst.*, 2005, 20, (4), pp. 1922–1928
- Kundur, P., Taylor, C.: 'Blackout experiences and lessons, best practices for system dynamic performance, and the role of new technologies'. IEEE Task Force Report, 2007
- Henner, V.E.: 'A network separation scheme for emergency control', *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 1980, 2, (2), pp. 109–114
- Adibi, M.M., Kafka, R.J., Maram, S., Mili, L.M.: 'On power system controlled separation', *IEEE Trans. Power Syst.*, 2006, 21, (4), pp. 1894–1902
- You, H., Vittal, V., Yang, Z.: 'Self-healing in power systems: an approach using islanding and rate of frequency decline-based load shedding', *IEEE Trans. Power Syst.*, 2003, 18, (1), pp. 174–181
- Sun, K., Zheng, D., Lu, Q.: 'Splitting strategies for islanding operation of large-scale power systems using OBDD-based methods', *IEEE Trans. Power Syst.*, 2003, 18, (2), pp. 912–923
- Zhao, Q., Zheng, D., Ma, J., Lu, Q.: 'A study of system splitting strategies for island operation of power system: a two-phase method

- based on OBDDs', *IEEE Trans. Power Syst.*, 2003, 18, (4), pp. 1556–1565
- You, H., Vittal, V., Wang, X.: 'Slow coherency –based islanding', *IEEE Trans. Power Syst.*, 2004, 19, (1), pp. 483–491
- Xu, G., Vittal, V.: 'Slow coherency based cutset determination algorithm for large power systems', *IEEE Trans. Power Syst.*, 2010, 25, (2), pp. 877–884
- Wang, C., Zhang, B., Hao, Z., *et al.*: 'A novel real-time searching method for power system splitting boundary', *IEEE Trans. Power Syst.*, 2010, 25, (4), pp. 1902–1909
- Sun, K., Zheng, D., Lu, Q.: 'A simulation study of OBDD-based proper splitting strategies for power systems under consideration of transient stability', *IEEE Trans. Power Syst.*, 2005, 20, (1), pp. 389–399
- Hao, L., Rosenwald, G.W., Jung, J., Liu, C.C.: 'Strategic power infrastructure defense'. Proc. of the IEEE, 2005, 93, (5), pp. 918–933
- Ding, L., Gonzalez-Longatt, F., Wall, P., Terzija, V.: 'Two-step spectral clustering controlled islanding algorithm', *IEEE Trans. Power Syst.*, 2013, 28, (1), pp. 75–84
- Machowski, J., Bialek, J.W., Bumby, J.R.: 'Power system dynamics stability and control' (John Wiley & Sons, West Sussex, 2008)
- Peiravi, A., Ilidarabadi, R.: 'Comparison of computational requirements for spectral and kernel k-means bisection of power system', *Aust. J. Basic Appl. Sci.*, 2009, 3, (3), pp. 2366–2388
- Leighton, T., Rao, S.: 'Multicommodity max-flow min-cut theorems and their use in designing approximation algorithms', *J. ACM*, 1999, 46, (6), pp. 787–832
- Garey, M.R., Johnson, D.S.: 'Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness' (Freeman, San Francisco, CA, 1979)
- Von Luxburg, U.: 'A tutorial on spectral clustering', *Stat. Comput.*, 2007, 17, (4), pp. 395–416
- Ng, A.Y., Jordan, M.I., Weiss, Y.: 'On spectral clustering: analysis and an algorithm', *Adv. Neural Inf. Process. Syst.*, 2002, 2, pp. 849–856
- Wang, X., Davidson, I.: 'Flexible constrained spectral clustering'. 16th ACM SIGKDD Int. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD 2010), Washington DC, USA, 2010, pp. 563–572
- Wang, X., Qian, B., Davidson, I.: 'On constrained spectral clustering and its applications', *Data Min. Knowl. Discov.*, 2012, 28, (1), pp. 1–30
- Lee, J.R., Gharan, S.O., Trevisan, L.: 'Multi-way spectral partitioning and higher-order Cheeger inequalities'. 44th Symp. on Theory of Computing, 2012, pp. 1117–1130
- Franco, R., Sena, C., Taranto, G.N., Giusto, A.: 'Using synchrophasors for controlled islanding –a prospective application for the Uruguayan power system', *IEEE Trans. Power Syst.*, 2013, 28, (2), pp. 2016–2024
- Ariff, M.A.M., Pal, B.C.: 'Coherency identification in interconnected power system –an independent component analysis approach', *IEEE Trans. Power Syst.*, 2013, 28, (2), pp. 1747–1755
- Terzija, V., Wall, P., Quirós-Tortós, J., Norris, S., Bialek, J.: 'Preventing cascading outages by intentional controlled islanding'. IEEE PES General Meeting, Vancouver, 2013
- Quirós-Tortós, J., Panteli, M., Terzija, V., Crossley, P.: 'On evaluating the performance of intentional controlled islanding schemes'. IEEE PES General Meeting, Vancouver, 2013, pp. 1–6
- Pourbeik, P., Kundur, P., Taylor, C.W.: 'The anatomy of a power grid blackout –root causes and dynamics of recent major blackouts', *IEEE Power Energy Mag.*, 2006, 4, (5), pp. 22–29
- Quirós-Tortós, J., Terzija, V.: 'Controlled islanding strategy considering power system restoration constraints'. IEEE PES General Meeting, San Diego, 2012, pp. 1–8
- Juarez, C., Messina, A.R., Castellanos, R., Espinosa-Perez, G.: 'Characterization of multi-machine system behavior using a hierarchical trajectory cluster analysis', *IEEE Trans. Power Syst.*, 2011, 26, (3), pp. 972–981
- Sánchez-García, R., Fennelly, M., Norris, S., *et al.*: 'Hierarchical spectral clustering of power grids', *IEEE Trans. Power Syst.*, 2014, 29, (5), pp. 2229–2237
- Okabe, A., Boots, B., Sugihara, K., Chiu, S.N.: 'Spatial tessellations: concepts and applications of Voronoi diagrams' (John Wiley & Sons, England, 2000, 2nd edn.)
- DiGSILENT PowerFactory, ed. Heinrich-Hertz-Straße, Germany
- MATLAB R2010a: Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2010
- IEEE PES PSDPC SCS. (2013, October). *Power System Test Cases*. Available at: <http://www.sel.eesc.usp.br/ieee/>
- Anderson, P.M., Fouad, A.A.: 'Power system control and stability' (IEEE Press, New York, 2003, 2nd edn.)