

两步光谱聚类可控孤岛算法

丁磊, *IEEE 会员*; Francisco M. Gonzalez-Longatt, *IEEE 高级会员*; Peter Wall 和 Vladimir Terzija, *IEEE 高级会员*

摘要 可控孤岛是避免灾难性大面积停电的一种积极有效的方法。它通常被视为一个约束组合优化问题。然而,大型电力系统解空间的组合爆炸增加了求解的复杂性。本文提出了一种两步可控孤岛算法,利用**频谱聚类**找到合适的孤岛解决方案,以防止无阻尼机电振荡引发大面积停电。该受控孤岛算法使用的目标函数是最小功率流中断。应用于该解决方案的唯一约束条件与发电机一致性有关。在算法的第一步中,根据发电机的动态模型,使用**归一化频谱聚类**对发电机节点进行分组,以产生一致性发电机组。在算法的第二步中,通过使用**约束频谱聚类**对所有节点进行分组,确定既能提供最小功率流中断,又能满足一致性发电机组约束条件的孤岛解决方案。利用 IEEE 9、39 和 118 总线测试系统获得的仿真结果表明,在解决受控孤岛问题时,特别是在大型电力系统中,所提出的算法具有很高的计算效率。

索引/词条—受限光谱聚类、受控等着陆、图论、归一化光谱聚类。

电气与电子工程学院, 英国曼彻斯特 M13 9PL (电子邮箱: dinglei@sdu.edu.cn)。

F.F. M. Gonzalez-Longatt、P. Wall 和 V. Terzija 现任英国曼彻斯特大学电子与电气工程学院 (School of Electrical and Electronic Engineering, The University of Manchester, Manchester M13 9PL, U.K.) (电子邮箱: terzija@ieee.org)。

本文中一幅或多幅图的彩色版本可在 <http://ieeexplore.ieee.org> 上在线获取。

数字对象标识符 10.1109/TPWRS.2012.2197640

I. 引言

C 电力系统的 **ONTROLLED** 孤岛化是限制系统停电的有效纠正措施

在发生大的干扰之后。它通过**将电力系统分割**成一组较小的孤岛式电力系统或**岛屿**,来限制停电的发生和后果。**孤岛解决方案**的精髓在于确定一组需要断开的输电线路,以创建一组电气隔离的孤岛。受控孤岛可用于应对不同的电力系统极端情况,如无阻尼

手稿于 2011 年 3 月 23 日收到; 2011 年 7 月 19 日、11 月 10 日修订、2011 年和 2012 年 2 月 19 日; 2012 年 4 月 11 日接受。出版日期 2012 年 06 月; 当前版本日期为 2013 年 1 月 17 日。本研究部分得到了英国工程和社会科学研究理事会 (EPSRC) EP/G055211/1 号基金、国家自然科学基金委员会 (NSFC) 51107071 号基金和山东大学项目 (IIFSDU 2010TB024) 的资助。论文编号: TPWRS-00251-2011。

L. 丁立明, 山东大学电气工程学院, 中国济南 250061; 曼彻斯特大学

授权许可使用仅限于西安交通大学。于 2024 年 7 月 24 日 02:58:59 UTC 从 IEEE Xplore 下载。使用限制。

振荡、电压崩溃、级联跳闸等。本文提出了一种算法，用于确定不伴有电压不稳的无阻尼机电振荡情况下的合适孤岛解决方案。

要创建稳定的孤岛，孤岛解决方案必须满足大量约束条件，如负载-发电平衡、发电机一致性、输电线路可用性、热限制、电压稳定性、瞬态稳定性等。如果要寻找一个满足所有这些约束条件的解决方案，甚至要确认是否存在这样的解决方案，那就太复杂了。如果只考虑这些约束条件的子集，如负载-发电平衡和发电机一致性，就能产生一组可行的*孤岛解决方案*。这组候选方案可与其他纠正措施协调，以找到满足所有约束条件的最终孤岛解决方案 [1]-[6]。这种近似方法降低了受控孤岛问题的复杂性；在处理大型网络时尤其有用 [1]-[4]。

文献中用于确定孤岛解决方案的现有方法可根据所使用的目标函数进行分类。两种主要的目标函数是*最小功率不平衡*和*最小功率流中断*。

*最小功率不平衡*的方法可最大限度地减少所形成的岛

屿内的功率不平衡，从而减少系统分割后必须移除的负载量 [1]-[4]、

[7]-[11]。寻找*电力流中断最小的孤岛解决方案*的方法，可最大限度地减少系统分割后系统内电力流模式的变化 [12]-[14]。

*功率不平衡*和*功率流中断*的区别在于，功率不平衡可以用每条断开的输电线路上有功功率的代数和（考虑功率流的方向）来表示，而功率流中断可以用每条断开的输电线路上有功功率的算术和来表示。

在 [1] 中，提出了一种基于*简化图的两阶段有序二元判定图(OBDD)*方法，用于寻找包含相干发电机的低功率不平衡孤岛。文献[2]使用*广度优先搜索(BFS)*和*深度优先搜索(DFS)*算法来寻找分隔相干发电机组、功率失衡最小的孤岛解决方案。其他可用于寻找功率流失衡最小的孤岛的算法包括角度调制粒子群优化法 [4] 和克雷洛夫子空间法 [7]。

找到一个权力失衡最小的解决方案是 NP 难问题，并被证明是

0885-8950/\$31.00 © 2012 IEEE

0-1 knapsack 问题[1]。目前还没有一种已知算法能在多项式时间内高效解决这类问题 [1], [9]。

现有算法大多采用启发式搜索方法, 或仅针对简化网络模型或原始电力系统的选定子集解决问题, 从而克服了这一难题 [1]-[9]。例如, 在在线应用中使用基于 OBDD 的方法时, 网络模型应简化为包含少于约 40 个节点 [3], [11] $G(V, V_G, E, W)$ 。

简化网络模型会缩小解的空间。简化过程中丢失的一些解有可能比算法找到的最终解更好[11]。启发式搜索方法通常非常灵活, 计算效率也令人满意。但是, 由于这些方法往往会收敛到局部而非全局最小值, 因此无法保证解的质量。

文献[12]和[13]提出了频谱划分法和多级内核 k -means 法, 以找到功率流干扰最小的孤岛解决方案。这两种方法的计算效率都很高, 但都没有考虑发电机的协同效应 [15]。这种对发电机行为的忽视意味着无法保证所生成孤岛的稳定性。此外, 在没有约束条件的情况下直接应用频谱聚类往往会导致单个节点与图的其他部分分离 [16]。在尝试电力系统受控孤岛化时, 这两种解决方案的缺陷显然是不可接受的。

本文将介绍一种新颖的两步光谱聚类可控孤岛算法 (SCCI 算法)。在 SCCI 算法的第一步, 使用归一化频谱聚类对发电机节点进行分组。分组结果作为 SCCI 算法下一步的成对约束条件, 在下一步中, 每个节点都根据约束频谱聚类进行分组。这种受限频谱聚类利用电力流数据, 以最小的电力流中断产生孤岛解决方案。因此, 本文提出的两步 SCCI 算法可以实时识别出电力流干扰最小且满足发电机一致性约束的孤岛解决方案。

本文的主要内容安排如下。第二节介绍了受控孤岛问题和频谱聚类的基本概念。第三节讨论了 SCCI 算法的执行。在第四节中, 将新算法应用于 IEEE 9 总线、39 总线和 118 总线测试系统, 以展示其性能。第五节为本文的结论。

II. 受控孤岛和频谱聚类

本节将介绍图论的一些基本概念。然后, 将受控孤岛问题定义为一个约束优化问题, 并将其转换为图割问题。还介绍了解决这类问题的一种可行方法--谱聚类。

A. 图论前言

在图论、无向图模型
可用于描述 m -gen-

erator和 n -bus 电力系统。在上述图模型中, 节点集和边集 E , 元素为

是节点集 V 的子集, 只包含与发电机直接相连的母线。矩阵 W 是一组边权重。

为方便起见, 本文只介绍二等分的情况。将一个图一分为二, 分成两个子图

$$G_1(V_1, V_{G1}, E_1, W_1) \text{ 和}$$

移动连接这两个子图的边, 每个子图代表原电力系统的一个子系统。这里, 和是 V 的不相交子集, 即和。同样, V_{G1} 和 被定义为 V_G 的两个互不相交的子集, 同时它们也分别是 和 的子集。

为分离这些子图而删除的边的集合称为 *切集*。剪切集中各条边的权重之和称为 *剪切值*, 其定义如下 [17]

(1)

图切割问题的定义是找到以最小 *切割* 将图一分为二的切割集 [16]。通常情况下, 大型电力系统的孤岛化解决方案需要将系统分割成两个以上的孤岛; 这可以通过递归分割来实现 [16]。

B. 受控孤岛

使用递归分割法形成的子图集代表了为实现受控孤岛化而必须创建的孤岛。为确保形成稳定的孤岛, 所形成的孤岛应尽量减少对电力流的干扰, 并满足发电机一致性的约束条件, 如下所述。

1) *发电机一致性*: 电力系统中的大扰动会引发无阻尼机电振荡; 这些振荡会导致发电机失去一致性。要创建稳定的孤岛, 任何孤岛内的发电机都必须近似同步。

基于经典的线性化发电机摆动方程, 在忽略阻尼的情况下, m -发电机电力系统的线性化二阶动态模型可以用下面的矩阵形式表示[18]:

(2)

其中 $\mathbf{x} = [\Delta\delta_1, \dots, \Delta\delta_m]^T$ 和 $\Delta\delta$ 是发电机偏离稳态运行点

的角度 δ_0 和 A 是系统状态矩阵。根据慢相干理论, 将发电机分成两组相当于将矩阵 A 任意分为两个子矩阵 A_{11} 和 A_{22} , j 分别代表子系统 G_1 和 G_2 (见图 1) [19]。

对角线外子网格 A_{12} 和 A_{21} 的 Frobenius 准则之和可用来说定义子系统 G_1 和 G_2 之间的动态耦合 S [19]:

$$S = \|A_{12}\| + \|A_{21}\| \quad (3)$$

$$\begin{matrix} V_1 & V_2 \\ V_1 \cap V_2 = \emptyset & V_1 \cup V_2 = V \\ V_{G2} & \\ V_1 & V_2 \end{matrix}$$

$$cut(V_1, V_2) = \sum_{i \in V_1, j \in V_2} w_{ij}.$$

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax}$$

$$\text{Subsystem } G_1 \rightarrow \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix} \leftarrow \text{Subsystem } G_2$$

图 1. 将系统矩阵 \mathbf{A} 分成两个子矩阵 \mathbf{A}_{11} 和 \mathbf{A}_{22} 。

在本文中，重点仅放在不伴随电压不稳定的无阻尼机电振荡情况上。在这种情况下，如果假定无功功率平衡可以通过就地补偿来控制，则无功功率和母线电压幅值的影响可以忽略不计，因为它们对动态耦合的影响微乎其微。因此，(3) 可以改写如下：

$$S = \sum_{j \in V_{G2}} \sum_{i \in V_{G1}} \left(\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_{ij}} \cdot \left(\frac{1}{H_i} + \frac{1}{H_j} \right) \right) \quad (4)$$

其中 $\partial P_{ij} / \partial \delta_{ij}$ 为同步系数， H_i 为 i 第 1 台发电机的惯性常数。

当受到机电振荡影响时，具有强动态耦合的发电机将一起摆动，而具有弱动态耦合的发电机将相互摆动[18]。因此，寻找一致性发电机组的问题等同于寻找不同发电机组之间最弱动态耦合的优化问题，如 (5) 所示：

$$\begin{aligned} \min S \\ = \min_{V_{G1}, V_{G2} \subset V_G} \left(\sum_{j \in V_{G2}} \sum_{i \in V_{G1}} \left(\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_{ij}} \cdot \left(\frac{1}{H_i} + \frac{1}{H_j} \right) \right) \right) \end{aligned} \quad (5)$$

2) **目标函数**：根据 (6) 和 (7) 定义的最小功率不平衡和最小功率流中断都可用作受控孤岛的目标函数。每个目标都会产生不同的解决方案，各有利弊 [3], [20]：

$$\min_{V_1, V_2 \subset V} \left(\left| \sum_{i \in V_1, j \in V_2} P_{ij} \right| \right) \quad (6)$$

$$\min_{V_1, V_2 \subset V} \left(\sum_{i \in V_1, j \in V_2} |P_{ij}| \right) \quad (7)$$

其中 P_{ij} 表示节点 i 和 j 之间跨任务线路上的有功功率值。

使用最小功率不平衡作为目标函数，可以创建负荷和发电量水平相近的岛屿，即良好的负荷-发电平衡。目标函数的这一特性最大限度地减少了系统分裂后必须转移的负荷量。

使用最小功率流干扰作为目标函数，可创建与干扰前功率流模式相比变化最小的岛屿。目标函数的这一特性提高

了岛屿的瞬态稳定性，降低了岛屿内输电线路过载的可能性，并使岛屿最终与系统其他部分重新整合变得容易[20]。

当试图确保系统分裂后的稳定性时,首要考虑的应该是瞬态稳定性,而不是负载发电平衡,因为一个具有负稳定裕度和良好负载发电平衡的孤岛会崩溃。然而,稳定裕度为正且负载-发电平衡较差的孤岛可以通过负载平衡来实现稳定。

基于这些目标函数的特性,本文采用了最小功率流干扰,它还具有降低所面临问题复杂性的额外好处,降低复杂性的细节将在第 IV-B 节中介绍。

考虑到大型互联电力系统的复杂性,仅考虑有功功率流可能无法获得最佳分流方案。如果在每个系统中加入一些固有的启发式知识,或对无功功率流和电压稳定性相关挑战进行额外评估,可能会得出更有效的最终分路方案。不过,这种方法的复杂性可能过高,甚至不够实用。这一点应在今后的研究项目中加以解决。

3) *受控孤岛问题*: 本文要解决的受控孤岛问题由最小功率流中断目标函数 (7) 和发电机一致性约束 (5) 组成。文献[21]给出了解决此类优化问题的一些基本结果。

这两个优化问题结合起来就形成了 SCCI 算法 (8)。具体做法是,首先求解 (5),找到一组连贯的发电机组,然后根据这些发电机组求解 (7):

可简述如下。

(8)

$$[\mathbf{V}_{G1}^*, \mathbf{V}_{G2}^*] = \underset{\mathbf{V}_{G1}, \mathbf{V}_{G2} \subset \mathbf{V}_G}{\operatorname{argmin}} \left(\sum_{j \in \mathbf{V}_{G2}} \sum_{i \in \mathbf{V}_{G1}} \left(\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_{ij}} \cdot \left(\frac{1}{H_i} + \frac{1}{H_j} \right) \right) \right) \\ \underset{\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2 \subset \mathbf{V}}{\min} \left(\sum_{i \in \mathbf{V}_1, j \in \mathbf{V}_2} |P_{ij}| \right) \\ \text{subject to } \mathbf{V}_{G1}^* \subset \mathbf{V}_1, \mathbf{V}_{G2}^* \subset \mathbf{V}_2.$$

这里, argmin 代表最小值的参数,即 $[\mathbf{V}_{G1}^*, \mathbf{V}_{G2}^*]$ 是使 (5) 的目标函数最小的节点分组[22]。

C. 光谱聚类

使用同步系数或传输线上的绝对有功功率来定义图的边重,可分别将寻找最弱动态耦合和最小功率流中断的问题转化为图切问题。

光谱聚类是本文用来解决这些图形切割问题的工具。本小节将介绍两种光谱聚类方法,即非规范化光谱聚类和非规范化光谱聚类。

1) 非归一化光谱聚类: 非归一化光谱聚类背后的理论

非归一化频谱聚类根据拉普拉卡矩阵 L 将节点聚类为两个子集, 拉普拉卡矩阵对图 G 的定义为 [16]

$$L = D - W \quad (9)$$

其中 D 是一个对角度矩阵, 包含对角元素 D_{ii} , 等于连接到节点 i 的边的总权重。按照这种方式定义, 对于任何未整型图, 边权重矩阵 W 和拉普拉斯矩阵 L 都是对称的。

在分段的情况下, 非归一化频谱聚类算法可以通过以下步骤执行 [16]:

- 1) 计算拉普拉斯矩阵 L 的前两个特征向量 ϑ_1, ϑ_2 。
- 2) 让 $J \in \mathbf{R}^{n \times 2}$ 成为包含向量 ϑ_1, ϑ_2 作为列的矩阵。让 $y_i \in \mathbf{R}^2$ 成为 J 第 i 行对应的向量。
- 3) 使用聚类算法 (如 k -medoids 算法 [23]) 将节点 $y_i \in \mathbf{R}^2$ 聚类为 c_1, c_2 。

遗憾的是, 使用非归一化频谱聚类对图形进行分叉的解决方案往往只是将一个节点与图形的其他部分分开。对于孤岛解决方案来说, 这种形式的解决方案显然是不可接受的。

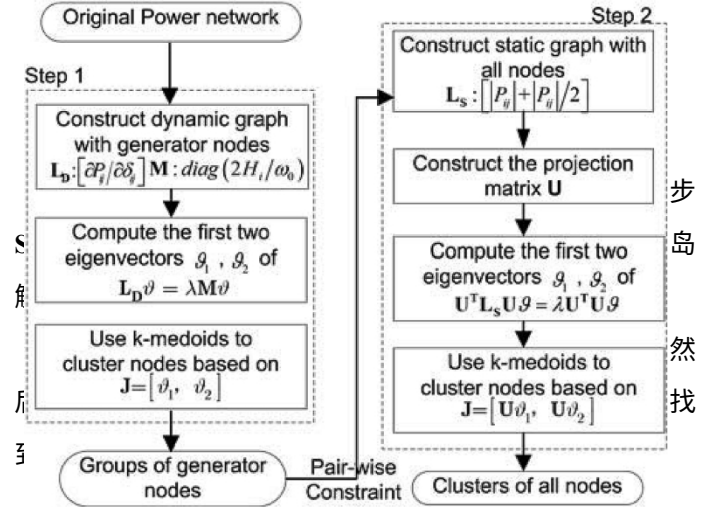
2) 归一化光谱聚类: 归一化频谱聚类使用每个子图中的节点权重之和作为平衡条件, 以防止应用频谱聚类时简单地分离单个节点。这就产生了归一化切分 ($Ncut$) 的概念[17], 其定义为

$$Ncut(\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2) = \frac{cut(\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2)}{weig(\mathbf{V}_1)} + \frac{cut(\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2)}{weig(\mathbf{V}_2)} \quad (10)$$

$weig(\mathbf{V}_1) = \sum_{i \in \mathbf{V}_1} \frac{D_i}{G_1}$ 其中和是 \mathbf{V}_1 中各节点权重的总和。 $weig(\mathbf{V}_2)$ 的定义与 \mathbf{V}_1 加入节点权重作为平衡条件, 可以阻止创建权重极低的子图。归一化光谱聚类方法可用于以最小 $Ncut$ 分割图。

对于二分法, 可以通过以下步骤实现 [16], [17]:

- 1) 计算一般化特征问题 $L\vartheta = \lambda D\vartheta$ 的前两个特征向量 ϑ_1, ϑ_2 。
- 2) 让 $J \in \mathbf{R}^{n \times 2}$ 成为包含向量 ϑ_1, ϑ_2 作为列的矩阵。设 $y_i \in \mathbf{R}^2$ 是与 i 第 i 行相对应的向量。
- 3) 使用聚类算法 (如 k -medoids 算法) 将节点 $y_i \in \mathbf{R}^2$ 聚类为 c_1, c_2 。



$$= j \quad (11)$$

其中 B'_{ij} 是网络导纳 matrix 的虚项，还原为内部发电机节点 [18]。动态图 G_D 描述了发电机之间的动态耦合。

图 2.SCCI 算法流程图。

SCCI 算法的第一步是构建动态图 G_D 。动态图只包含发电机节点，图中的边权重是同步系数，用于描述两个发电机之间的动态耦合。

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_{ij}}$$

节点和 j 。为满足发电机一致性约束 (5)，将使用第 II-C2 节介绍的归一化频谱聚类算法对发电机节点进行分组。这些发电机节点组将作为 SCCI 算法第二步的约束条件。

在算法的第二步，利用电力流数据构建静态图 G_S 。它包含每个节点，边权重定义为 i 和 j 节点之间有功功率交换的绝对值。然后，利用本节将介绍的约束频谱聚类技术对节点进行分组，以解决 (8) 所描述的优化问题。

图 2 是 SCCI 算法的执行流程图。下文将详细介绍这两种算法的步骤。

A. 步骤 1：确定相干发电机组

通过构建表示发电机节点之间动态耦合的图形（称为动态图），可以找到所考虑的电力系统中的相干发电机组。然后将归一化频谱聚类应用于该图，根据动态耦合对发电机节点进行聚类。

通过定义 m 生成器节点的拉普拉卡矩阵 L_D ，可为其构建动态图 $G_D(V_G, E_D, W_D)$ 如下[21]

$$[L_D]_{ij} = \begin{cases} \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_{ij}} = -|V_i| |V_j| B'_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) & \text{如果 } i = j \\ - \sum_{l=1, l \neq i}^m [L_D]_{il} & \text{如果 } i \neq j \end{cases}$$

节点；其边权重定义为同步系数 $\partial P_{ij}/\partial \delta_{ij}$ 。

利用拉普拉斯矩阵， L_{Dm} -发电机电力系统的线性化二阶动态模型可重写为 [18]

$$M\ddot{x} = L_D x \quad (12)$$

其中 $M = \text{diag}(2H_1/\omega_0, 2H_2/\omega_0, \dots, 2H_m/\omega_0)$ 和是惯性矩阵。

从 (4) 和 (10) 可以看出, (4) 是动态图 G_D 的一种 N_{cut} , 其中图是按节点惯性而不是节点权重归一化的。通过对动态图 G_D 进行归一化谱聚类, 可以找到 G_D 的最小 N_{cut} , 即优化问题 (5) 的解[17]。

因此, SCCI 算法的第一步可以如下执行:

- 1) 只使用生成器节点 构建动态图 G_D , 且边的权重等于 $\frac{\partial P_{ij}/\partial \delta_{ij}}{\vartheta_1 \vartheta_2}$ 。
- 2) 计算广义特征问题 $L_D \vartheta = \lambda M \vartheta$ 的前两个特征向量,。
- 3) 让 $J \in \mathbb{R}^{n \times 2}$ 成为包含向量 ϑ_1, ϑ_2 作为列的矩阵。让 $y_i \in \mathbb{R}^2$ 成为与矩阵 J 的第 i 行相对应的向量。
- 4) 然后, $V_{G2} \in \mathbb{R}^{n \times 2}$, 利用 k -medoids 算法将节点聚类为 V_{G1} 子集。
- 5) 选择器 V_{G2} 作为新动态图的节点集, 并返回到 1) 以允许递归分割。

SCCI 算法的第一步相当于应用基于慢相干性理论的方法。基于慢相干性的方法使用特征矩阵 A 对生成器进行分组。如果特征矩阵 M 是可逆的, 那么

(2) 和 (12) 实际上是相同的, 假设 $A = M^{-1}L_D$ 。慢相干性方法适用于离线分析, 但在在线应用中实施时有一些缺点。很难确定发电机是否会保持相干性, 也很难确定哪种振荡模式是由已发生振荡的扰动激发的。

curred.

然而, 本文要解决的关键挑战是如何在孤岛期间组合并满足强制执行一致性发电机组所需的约束条件, 而不是如何识别一致性发电机。慢相干性的缺点可以通过使用修订的慢相干性算法 [2] 或在线相干性识别算法 [23], [24] 来克服。

B. 步骤 2: 在保持发电机组一致性的同时, 尽量减少

功率流中断

通过对电力系统的静态图进行约束频谱分析, 可以找到能将步骤 1 中找到的相干发电机组分开的孤岛解决方案, 同时将功率流干扰降至最低。

这种静态图 $G_S(V, E_S, W_S)$ 可为 n 节点电力系统构建, 使用功率流数据来描述每个 n 节点之间的有功功率交换。

必须考虑到系统内的损耗问题, 以生成应用频谱聚类所需的对称无向图。为确保矩阵的对称性, W_S 的元素定义为

静态图 G_S 的拉普拉卡矩阵 L_S 可表示为 [21]

$$|V_i|V_j| B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad \text{如果} \\ i \neq j \\ \text{如果} \\ i = j \quad (13)$$

其中 B_{ij} 是网络导纳 matrix 的虚项。

图 G_S 的最小功率流干扰就是 (7) 的解。然而, 要求解 (8), 必须包含发电机一致性约束。具体做法是在算法的第二步中, 将第一步得到的发电机组作为成对约束条件 [26]。

成对生成器一致性约束包括 1) 必须链接约束和 2) 不能链接约束; 这些约束的定义如下:

- 1) 必须链接约束: 在一个节点内的所有发生器节点都必须链接。

第一步小组必须在第二步建立联系。

- 2) 不能链接约束: 在第一步不同分组中的任何两个生成器节点都不能在第二步中链接。约束谱聚类是一种高效的方法, 用于解决具有成对约束的聚类问题。使用投影矩阵 (子空间方法) 修改求解子空间, 即可包含成对约束条件

[26].

在不失一般性的前提下, 可以假设第一个 m_1 节点属于 c_1 聚类, 接下来的 m_2 节点属于 c_2 聚类。投影矩阵 U 的定义如下 [26]:

(14)

$$U = \begin{pmatrix} \mathbf{1}_{m_1} & \mathbf{1}_{m_1} & \mathbf{0}_{m_1 \times (n-m)} \\ \mathbf{1}_{m_2} & -\mathbf{1}_{m_2} & \mathbf{0}_{m_2 \times (n-m)} \\ \mathbf{1}_{n-m} & \mathbf{0}_{n-m} & \mathbf{I}_{(n-m) \times (n-m)} \end{pmatrix}$$

其中 \mathbf{I} 是同一矩阵, $\mathbf{1}$ 是全一列向量, $\mathbf{0}$ 是零矩阵或零列向量。

这样, 解子空间就从 n -维空间投影到 $(n-m+2)$ -维空间, 其中 $m_1 + m_2$ 。维空间中同一集群的所有节点都由 n -维空间中的一个等效节点表示。

2)-维空间, 以满足成对约束条件。

引入投影矩阵 U 后, 就可以对静态图 G_S 进行约束谱聚类, 以找到功率流干扰最小的切割集, 满足 SCCI 算法

第一步产生的发电机分组约束。因此, SCCI 算法的第二步可描述如下:

- 1) 构建一个由所有节点组成的静态图, 其边权重定义为
$$[L_S]_{ij} = \begin{cases} \frac{|P_{ij}| + |P_{ji}|}{2} & \text{如果 } i \neq j \\ -\sum_{l=1, l \neq i}^n [L_S]_{il} & \text{如果 } i = j \end{cases}$$
- 2) 根据生成器分组结果构建投影矩阵 U 。
- 3) 计算 $U^T L_S U \vartheta = \lambda U^T U \vartheta$ 特征问题的前两个特征向量 ϑ_1, ϑ_2 。
- 4) 设 $U_{\vartheta_1} \in \mathbf{R}^{n \times 2}$ 为包含列向量的矩阵。让 $y_i \in \mathbf{R}^2$ 成为对应于 U_{ϑ_1} 的第 3 行。
- 5) 使用 k -medoids 算法将节点 $y_i \in \mathbf{R}^2$ 聚类为 V_1, V_2 。

6) 选择 V_1 或 V_2 作为新静态图的节点集, 然后返回 1)。

通过上述两步 SCCI 算法, 可以找到优化问题 (8) 的解决方案, 即孤岛解决方案。

SCCI 算法的第二步可与任何在线一致性识别方法一起使用, 前提是有一致性发电机组作为约束条件。

(15)

IV. SCCI 算法测试

本节使用三个测试系统来验证所提出的 SCCI 算法 [27]

:

I) IEEE 9 总线测试系统

II) IEEE 39 总线测试系统

III) IEEE 118 总线测试系统 [28]。

每个测试系统都采用了 SCCI 算法, 并找到了孤岛解决方案。这些解决方案与使用光谱 k -way 分区算法 (SkP) 和 OBDD 方法获得的解决方案进行了比较, 以评估 SCCI 算法解决方案的质量。

1) 频谱 k 路分割法 (SkP) : [12] 中提出的 SkP 方法不考虑发电机一致性约束; 在测试用例 I 中与该方法的比较表明, 发电机一致性约束是形成稳定岛的必要条件。

SkP 是第 II-C1 节所述非归一化光谱聚类算法的一个特例。该算法的第三步不是使用 k -medoids 对节点进行聚类, 而是选择 k 参考节点, 然后根据节点与参考节点之间的距离将其余节点聚类到这些参考节点。

2) 有序二元判定图 (OBDD) : OBDD 能够搜索整个搜索空间并找到所有可能的解[1]。因此, 通过在测试用例 II 和测试用例 III 中与该方法的比较, 可以证明 SCCI 算法能够找到 (8) 的最优解。[1]、[3]和[4]中描述的 OBDD 方法

[11]进行了修订, 以找到对电力流干扰最小的孤岛解决方案:

$$\Phi = SSC \cdot MCC \cdot MPD$$

$$SSC = \left(\prod_{\forall i \in V_{G1}, \forall j \in V_{G2}} \bar{\Lambda}_{ij}^* \right) \cdot \left(\prod_{k=1}^2 \left(\prod_{\forall i, j \in V_{Gk}} \Lambda_{ij}^* \right) \right)$$

$$\cdot \left(\prod_{\forall i \in V_{G1}} \left(\sum_{k=1}^2 \sum_{j \in V_{Gk}} \Lambda_{ij}^* \right) \right)$$

授权许可使用仅限于西安交通大学。于 2024 年 7 月 24 日 02:58:59 UTC 从 IEEE Xplore 下载。使用限制。

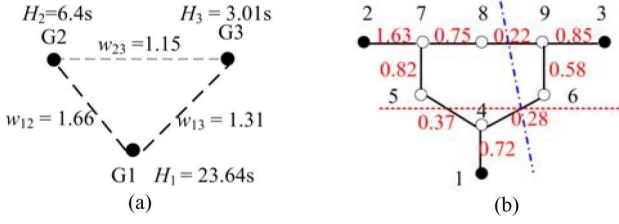


图 3. IEEE 9 总线测试系统的动态图和静态图（基本功率 $S_N = 100$ MW）。右图：虚线为 SCCI 解决方案，虚线为 SkP 解决方案。(a) 动态图。(b) 静态图。

其中， Φ 是 OBDD 方法的布尔函数， Λ 和 Λ^* 分别代表图的邻接矩阵和可达性矩阵， V_L 代表图的负载节点集[1]。

SSC 表示对发电机一致性的要求，其中第一项表示不同同组的发电机不能连接，第二项表示同一一致性组中的发电机必须连接，第三项表示每个负载必须且只能连接到一个一致性发电机组 [1]、[3]、[11]。

MCC 用于减少孤岛解决方案的数量，只允许断开那些有助于形成孤岛的边 [11]。MPD 表示功率流断开不能超过阈值 ϵ ，在 [3] 和 [11] 中用来替代功率平衡约束 (PBC)。

A. 评估解决方案质量

1) 测试案例 I: IEEE 9 总线测试系统：将 SCCI 算法应用于 IEEE 9 总线测试系统的第一步是使用 (11) 构建动态图，如图 3(a) 所示。然后应用第 III-A 节所述的归一化频谱聚类算法，找到两个相干发电机组 {1} 和 {2, 3}。

SCCI 算法的第二步要求使用 (13) 构建静态图，如图 3(b) 所示。然后，共同的发电机组被用来构建一个投影矩阵 (14)，表示发电机 2 和 3 之间的必须链接约束，以及发电机 1 与发电机 2 和 3 之间的不能链接约束。该投影矩阵允许使用第 III-B 节所述的约束频谱聚类算法对系统节点进行聚类。

将 SCCI 算法应用于 IEEE 9 总线测试系统的结果是找到了一个单一的分集，该分集创建了一个由两个岛屿 {1, 4} 和 {2, 3, 5, 6, 7, 8, 9} 组成的孤岛解决方案。图 3(b) 中用虚线标出了该切割集，其切割点为 0.65 p.u.

在 IEEE 9 总线测试系统中应用 SkP 方法得出的孤岛解

决方案包括两个不同的孤岛 {3, 6, 9} 和 {1, 2, 4, 5, 7, 8}。图 3(b) 中用虚线标出了该切割集，其切割点为 0.50 p.u.

很明显，岛屿 {1, 2, 4, 5, 7, 8} 并不稳定，因为它包含了不同步的发电机 1 和 2。SCCI 算法的解具有更高的切点；与 SkP 方法解的差异代表了满足发电机一致性约束的成本。

G_S
 G_S

表 I
39 总线测试系统第一步中的发电机组

Group 1	Group 2	Group 3
G2,G3,G4,G5,G6,G7	G8,G9,G10	G1

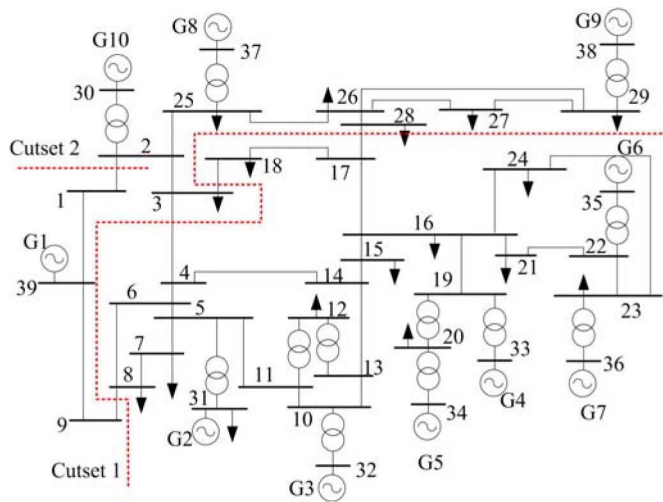


图 4.IEEE 39 总线测试系统的单线图。虚线表示产生最终孤岛解决方案所需的两个切割集。

表 II
39 总线测试系统结果与 OBDD 的比较

Cutset 1	$\Sigma P_{ij} (MW)$	Method
(1) 8-9, 3-4, 3-18, 17-27	175.3	SCCI
(1) 8-9, 3-4, 3-18, 17-27	175.3	OBDD
(2) 9-39, 3-4, 3-18, 17-27	179.0	
(3) 8-9, 3-4, 17-18, 17-27	331.2	
(4) 8-9, 3-4, 16-17	334.3	
(5) 9-39, 3-4, 17-18, 17-27	335.0	

2) 测试用例 II：IEEE 39 总线测试系统：与测试案例 I 一样，SCCI 算法的第一步是找到 IEEE 39 总线测试系统的动态图。应用归一化频谱聚类确定了表 I 所示的一组发电机组。从这些组中可以确定一组成对的发电机约束条件，从而形成投影矩阵。

SCCI 算法第二步的执行受到三个生成器组的影响。这种影响是，算法的第二步现在需要使用递归分割来确定两个切集并创建三个岛。

要找到的第一个切割集，即切割集 1，将第一组与第二组和第三组分开；要找到的第二个切割集，即切割集 2，将第三组与第二组分开。这两个切割集组合起来，就形成了最终的孤岛解决方案，如图 4 所示。

在 ϵ 值为 335 MW 的情况下执行了 OBDD 方法，表 II

中列出了 Cutset 1 中切割最小的五个解决方案，以及 Cutset 1 的 SCCI 算法解决方案。很明显，SCCI 算法找到了将第 1 组与第 2 组和第 3 组分开的最小切分。
3.由于只需分离一个生成器就可以很容易地进行比较，因此不对 Cutset 2 进行比较。

表 III
118 总线测试系统的发电机组

Group 1	Group 2	Group 3
10,12,25,26,31	46,49,54,59,61,65, 66,69,80	87,89,100,103,111

图 5. IEEE 118 总线电网单线图。两条虚线表示产生最终孤岛解决方案所需的切割集。

3) 测试案例三: IEEE 118 总线电力系统: SCCI 算法
第一步返回表 III 所示的三个相干发电机组。

SCCI 算法第二步产生的两个切割集, 即切割集 1 和切割集 2, 分别将第一组从第二组和第三组中分离出来, 然后将第二组从第三组中分离出来。这两个切割集组合起来, 就形成了最终的孤岛解决方案, 如图 5 所示。

与测试案例 II 一样, OBDD 方法返回的结果将用于验证 SCCI 解决方案。遗憾的是, 将 OBDD 方法直接应用于 118 节点网络并不现实。在搜索 Cutset 1 时, 原始网络被简化为 34 节点和 43 条边的图形; 在搜索 Cutset 2 时, 原始网络被简化为 24 节点和 38 条边的图形。然后将在这些简化图中找到的切割集解决方案映射到原始图中, 这样就能在原始图中找到所有可能的解决方案。简化图的精确性质和映射关系见附录。

表 IV 预先列出了 OBDD 方法找到的切分最小的五个切分集, 以及 SCCI 算法返回的结果。

表 IV 中的比较显示, 与测试案例 II 一样, SCCI 算法返回的切分集能以最小的切分将相干发电机组分开。

B. 计算效率

生成的孤岛解决方案的准确性并不是衡量受控孤岛算法性能的唯一标准。算法的计算效率也是一个关键因素

。

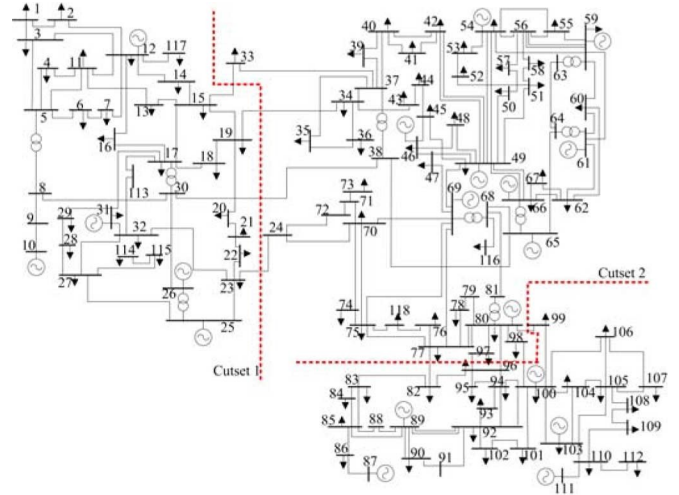


表 IV
118 总线系统结果与 OBDD 的比较

<i>Cutset 1</i>	$\Sigma P_{ij} $ (MW)	<i>Method</i>
(1) 15-33, 19-34, 30-38, 23-24	71.6	SCCI
(1) 15-33, 19-34, 30-38, 23-24	71.6	
(2) 15-33, 19-34,30-38, 24-70, 24-72	73.5	OBDD
(3) 33-37, 19-34, 30-38, 23-24	76.3	
(4) 33-37, 19-34, 30-38, 24-70, 24-72	78.1	
(5) 15-33, 19-34,30-38, 24-70, 71-72	83.2	
<i>Cutset 2</i>	$\Sigma P_{ij} $ (MW)	<i>Method</i>
(1) 77-82, 96-97, 80-96, 98-100, 80-99	52.7	SCCI
(1) 77-82, 96-97, 80-96, 98-100, 80-99	52.7	
(2) 77-82, 96-97, 80-96, 98-100,99-100	57.3	OBDD
(3) 77-82, 82-96, 94-96,95-96, 98-100, 80-99	65.1	
(4) 77-82, 80-97, 80-96, 98-100, 80-99	65.9	
(5) 77-82, 82-96, 94-96,95-96, 98-100, 99-100	69.6	

表 V 测试用例的计算
时间

<i>Case</i>	<i>Method</i>	<i>Time^a(s)</i>
39-bus	SCCI	≈ 0.004
118-bus	SCCI	≈ 0.11

^a: Pentium 2.4GHz; 4G RAM PC; Matlab 7.0 code.

在评估受控着陆算法的性能时，它是一个重要的指标。

将最小功率流干扰作为目标函数，意味着 SCCI 算法要解决的问题是一个 P 问题，因为它可以转换为最大流量/最小切割问题，并得到高效解决 [9], [16]。

然而，在问题中引入生成器一致性约束所需的成对约束，尤其是 "不能链接" 约束，增加了问题的复杂性。复杂度的增加使得受限频谱聚类的可行性问题在几种情况下都是 NP-完备的，这意味着在多项式时间内无法确定是否存在满足所有约束条件的解决方案[29]。

这种复杂性的增加可以通过使用递归分割来识别岛屿来克服。因为当聚类数为两个时，这类问题总能得到有效解决 [29]。

SCCI 算法所解决的受控孤岛问题的搜索空间为 2^d ，图中有 m 发电机、 n 节点和 d 边。光谱聚类的主要计算任务是计算 Lapla- cian 矩阵的特征向量。因此，SCCI 算法第一步的时间复杂度仅为 $O(m^3)$ ，SCCI 算法第二步的时间复杂度为 $O((n-m+2)^3)$ ，如果认为必要的，这一步可以简化为 $O((n-m+2)^2)$ ，因为 L_S 矩阵是一个稀疏矩阵 [15]。

这种时间复杂度意味着 SCCI 算法的计算效率很高。测试用例 II 和 III 的计算时间如表 V 所示。

如第一节所述，求解目标函数为最小功率不平衡的受控孤岛问题是一个 NP 难问题，是一种无法在以下时间内求解的问题

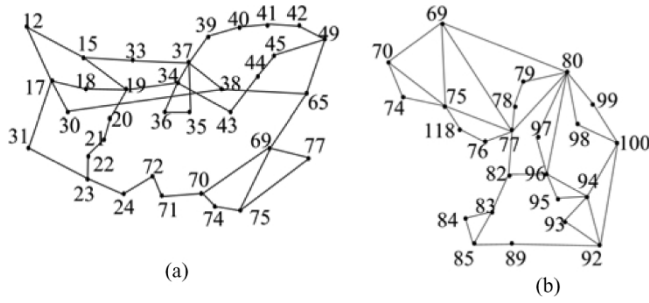


图 6.118 总线系统的 OBDD 简化图。(a) Cutset 1 的 34 节点 43 边简化图。
。(b) Cutset 2 的 24 节点 38 边简化图。

现有算法的计算时间是指数级的 [9], [11]。因此, 使用最小功率流中断的好处是将问题的时间复杂性从 NP-难降低到 P, 并使提出的 SCCI 算法具有计算效率。

V. 结论

本文提出了一种新颖的两步 SCCI 算法, 用于确定电力系统的孤岛解决方案。该算法的核心是一个单一的优化问题, 以最小功率流中断为目标函数, 以确保发电机一致性为约束条件。

使用最小功率流中断作为目标函数, 而不是最小功率不平衡, 可提高所生成孤岛的瞬态稳定性, 降低问题的时间复杂性, 并允许开发计算效率高的算法。发电机一致性约束的加入可防止形成包含非一致性发电机或孤立负载的孤岛。我们考虑了三个测试案例来评估该算法。结果表明, 新型 SCCI 算法的计算效率很高, 适合实时应用, 特别是在大型电力系统中。

附录

本附录包含测试用例 III (第 IV-A3 节) 中使用的简化图形 (图 6), 以及这些简化图形与原始图形之间的映射关系 (表 VI 和 VII)。

绘制简化图的目的是尽可能保留两个相干发电机组之间的网络结构, 同时尽可能减少剩余的网络。

如果表 VI 和表 VII 中的新边在原始图中有多个映射切集, 则只选择权重最小的一条作为新边, 其他的新边将在将找到的解决方案映射回原始图时予以考虑, 这样仍

然可以找到所有可能的解决方案。

例如, 表 VI 中的新边 12-17 有两个映射切分集 (15-17, 12-16) 和 (15-17, 16-17), 权重分别为 94.8 和 105.0。新边 12-17 的权重将定为 94.8。如果新边 12-17

表 VI
简化图 1 的节点和边的映射

<i>New node</i>	<i>Original nodes</i>	<i>New node</i>	<i>Original nodes</i>
12	1-14,16,117	49	46-58
31	25-29,31-32,113-115	71	71,73
65	59-68,78-112,116	77	76-77,118
<i>New edge</i>	<i>Original cutsets</i>	<i>New edge</i>	<i>Original cutsets</i>
23-31	(23-32,23-25)	24-72	(24-70,24-72)
71-72	(24-70,71-72)	70-71	(24-70,70-71)
37-39	(37-39,37-40)	39-40	(39-40,37-40)
40-41	(40-41,40-42)	41-42	(41-42,40-42)
45-49	(45-46,45-49)	49-65	(49-66,47-69,49-69)
70-74	(70-74,70-75)	74-75	(70-75,74-75)
<i>New edge</i>	<i>Original cutsets</i>		
12-15	(15-17,14-15,13-15);(15-17,12-14,13-15) (15-17,14-15,11-13);(15-17,12-14,11-13)		
12-17	(15-17,12-16);(15-17,16-17)		
17-31	(17-31,17-113,26-30);(17-31,113-32,26-30)		
65-69	(69-68, 47-69,49-69);(65-68,68-81,47-69,49-69)		
69-77	(69-77,68-81);(69-77,80-81)		
75-77	(75-77,75-118); (75-77,76-77); (75-77,76-118)		

表 VII
简化图 2 的节点和边的映射

<i>New node</i>	<i>Original nodes</i>	<i>New node</i>	<i>Original nodes</i>
69	1-20,33-69,81,116,117	89	88-89
70	21-32,70-73,113-115	92	90-92
85	85-87	100	100-112
<i>New edge</i>	<i>Original cutsets</i>		
69-80	(68-69,68-65);(68-81);(80-81)		
85-89	(85-88,85-89);(88-89,85-89)		
89-92	(80-90,89-92);(90-91,89-92);(91-92,89-92)		
92-100	(92-100,92-102);(92-100,101-102);(92-100,100-101)		

在生成的解中，映射切集（15-17,12-16）或（15-17,16-17）是原始图形最终解的可能元素。

参考资料

[1] Q.Zhao, K. Sun, D. Zheng, J. Ma, and Q. Lu, "A study of system splitting strategies for island operation of power system: A two-phase method based on OBDDs," *IEEE Trans.* 18, no.4, pp.1556-1565, Nov. 2003.

[2] X.Wang, "Slow coherency grouping based islanding using minimal cutsets and generator coherency index tracing using continuation method," Ph.D. dissertation, Iowa State Univ.

[3] K.Sun, D. Zheng, and Q. Lu, "Splitting strategies for islanding operation of large-scale power systems using OBDD-based methods," *IEEE Trans.* 18, no. 2, pp.

[4] L.Liu, W. Liu, D. A. Cartes, and I.-Y. Chung, "Slow coherency and Angle Modulated Particle Swarm Optimization based islanding of large-scale power systems," *Adv Eng.Chung*, "Slow coherency and Angle Modulated Particle Swarm Optimization based islanding of large-scale power systems," *Adv.Informat.*, 第 23 卷, 第 45-56 页, 2009 年。

[5] Q.Zhao, X. Li, and D. Zheng, "OBDD-based load shedding algorithm for power systems," in *Handbook Power Systems I, Energy Systems*. 德国柏林: Springer, 2010, pp.

[6] V.Terzija, "Adaptive underfrequency load shedding based on the magnitude of the disturbance estimation," *IEEE Trans.* 21, no.3, pp.

[7] S.Najafi, "Evaluation of interconnected power systems controlled is-landing," in *Proc.*

[8] C.Wang, B. Zhang, Z. Hao, J. Shu, P. Li, and Z. Bo, "A novel real-time searching method for power system splitting boundary," *IEEE Trans. 电力系统*, 第 25 卷, 第 4 期, 第 1902-190 页. 4, pp.

授权许可使用仅限于西安交通大学。于 2024 年 7 月 24 日 02:58:59 UTC 从 IEEE Xplore 下载。使用限制。

- [9] A.Sen, P. Ghosh, V. Vittal, and B. Yang, "A new min-cut problem with application to electric power network partitioning," *Eur.Trans.Elect.*19, no. 6, pp.
- [10] C.H. Papadimitriou, *Computational Complexity*.Reading, MA: Addison-Wesley, 1994.
- [11] Y.Qiao, "Study on the Active split control scheme of large-scale power systems," Ph.D. dissertation, Tsinghua University, Beijing, China, 2007.
- [12] L.Hao, G. W. Rosenwald, J. Jung, and C. C. Liu, "Strategic power infrastructure defense," *Proc. IEEE*, vol. 93, no.5, pp.
- [13] A.Peiravi and R. Ildarabadi, "A fast algorithm for intentional islanding of power systems using the multilevel kernel k-means approach," *J. Appl.*
- [14] B.Yang, V. Vittal, G. T. Heydt, and A. Sen, "A novel slow coherency based graph theoretic islanding strategy," in *Proc. IEEE PES General Meeting*, Tampa, FL, 2007.
- [15] A.Peiravi and R. Ildarabadi, "Comparison of computational requirements for spectral and k-means bisection of power system," *Australian J. Basic Appl.*3, pp.
- [16] U.V. Luxburg, "A tutorial on spectral clustering," *Statist. 计算*》, 第 17 卷, 第 4 期, 第 395-416 页, 2007 年 12 月。4, pp.
- [17] J.Shi and J. Malik, "Normalized cuts and image segmentation," *IEEE Trans.Pattern Anal.*IEEE Trans.22, no. 8, pp.
- [18] J. H. Chow, *Time-Scale Modeling of Dynamic Networks With Applications to Power Systems*.New York: Springer-Verlag, 1982.
- [19] S.S. S. Lamba and R. Nath, "Coherency identification by the method of weak coupling," *Elect.*7, no.4, pp.
- [20] V.E. Henner, "用于紧急控制的网络分离方案", *Int.J. Elect. 电力能源系统*》, 第 2 卷, 第 2 期, 第 109-114 页, 1980 年。
- [21] L.Ding and V. Terzija, "A new controlled islanding algorithm based on spectral clustering," in *Proc.Conf.*2011 年 7 月, 中国威海。
- [22] [Online].Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Arg_max.
- [23] S.S. Theodoridis 和 K. Koutroumba, 《模式识别》, 第 4 版。New York: Academic, 2008.
- [24] M.Johnson, M. Begovic, and J. Daalder, "A new method suitable for real-time generator coherency determination," *IEEE Trans.*19, no.3, pp.
- [25] N.森罗伊: "使用希尔伯特-黄变换的发电机连贯性", 《科学》, 2011 年第 2 期。
*IEEE Trans.Power.Syst.*4, pp.
- [26] T.T. D. Bie, J. Suykens, and B. D. Moor, "Learning from general label constraints," in *Proc. 统计模式识别研讨会*, 葡萄牙里斯本, 2004 年 8 月。
- [27] [Online].Available: <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>.
- [28] K.Sun, D. Zheng, and Q. Lu, "A simulation study of OBDD-based proper splitting strategies for power systems under consideration of transient stability," *IEEE Trans.*20, no. 1, pp.
- [29] I.Davidson and S. S. Ravi, "The complexity of non-hierarchical clustering with instance and cluster level constraints," *Data Mining Knowl.*14, no. 1, pp.

学院,任副教授。目前,他还是英国曼彻斯特大学的副研究员。

他的研究兴趣包括受控孤岛和微电网保护与控制

丁磊 (男, 10 岁), 1980 年出生于中国山东。他分别于 2001 年和 2007 年获得中国 济南山东大学电子工程学士和博士学位。

2008 年至 2009 年, 他在北京清华大学从事博士后研究。2010 年加入山东大学电气工程





Francisco M. González-Longatt (M'03-SM'09) 于 2008 年获得委内瑞拉中央大学电气工程博士学位。他曾任委内瑞拉国家武装部队理工大学电子工程系副教授 (1995-2009 年)。现任曼彻斯特大学电气与电子工程学院副研究员。英国切斯特



Vladimir Terzija (M'95-SM'00) 是英国曼彻斯特大学电气与电子工程学院电力系统工程 EPSRC 讲座教授。

1997 年至 1999 年，他在塞尔维亚贝尔格莱德的贝尔格莱德大学担任助理教授。2000 年至 2006 年，他在德国 ABB AG 公司担任开关设备和配 电 自动化专家。他的主要研究兴趣是将智能方法应用于电力系统监控、控制和保护，开关设备和配电自动化。

快速瞬态过程，以及 DSP 在电力系统中的应用。



Peter Wall 分别于 2008 年和 2009 年获得英国曼彻斯特大学电气工程学士和硕 士 学 位。目前，他正在曼彻斯特大学电气与电子工程学院攻读博士学位。

他的主要研究领域是电力系统动力学和频率稳定性。