

两步光谱聚类控制孤岛算法

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

摘要:可控孤岛是避免灾难性广域停电的一种积极有效的方法。它通常被认为是一个约束组合优化问题。然而,针对大型电力系统出现的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受控孤岛算法,该算法使用频谱聚类来寻找合适的孤岛解,以防止由非阻尼机电振荡引发的广域停电。这种可控孤岛算法中使用的目标函数是使潮流中断最小。应用于该解决方案的唯一约束与发电机相干性有关。在算法的第一步中,基于它们的动态模型,使用归一化光谱聚类对发电机节点进行分组,以产生相干发电机组。在算法的第二步中,通过使用约束谱聚类对所有节点进行分组来确定在满足相干发电机组约束的同时提供最小功率流中断的孤岛解。利用IEEE 9总线、39总线和118总线测试系统进行的仿真结果表明,该算法在解决受控孤岛问题时具有较高的计算效率,特别是在大型电力系统中。

索引项——约束谱聚类、受控is-landing、图论、归一化谱聚类。

I. 介绍

电力系统可控孤岛是发生大扰动后限制系统停电的一种有效的纠偏措施。它通过将电力系统分割成一组较小的、孤立的电力系统或岛屿来限制停电的发生和后果。孤岛化解决方案的本质是确定一组合适的需要断开的输电线路,以创建一组电隔离的岛屿。可控孤岛可以用来应对不同的电力系统极端情况,比如无阻尼

稿子收于2011年3月23日;2011年7月19日、2011年11月10日、2012年2月19日修改;2012年4月11日接受。发表日期2012年6月06日;当前版本日期2013年1月17日。本研究得到了EPSRC项目(EP/G055211/1)、国家自然科学基金项目(51107071)和山东大学项目(IIFSDU 2010TB024)的资助。纸没有。tpwrs - 00251 - 2011。

丁磊, 山东大学电气与电子工程学院, 山东济南250061;曼彻斯特大学电气与电子工程学院, 曼彻斯特M13 9PL, 英国(e-mail: dinglei@sdu.edu.cn)。

F. M. Gonzalez-Longatt, P. Wall和V. Terzija就职于英国曼彻斯特M13 9PL曼彻斯特大学电气与电子工程学院(e-mail: terzija@ieee.org)。

本文中一个或多个图形的彩色版本可在<http://ieeexplore.ieee.org>上在线获取。

数字对象标识符10.1109/tpwrs.2

012.2197640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定的无阻尼机电振荡场景下合适的孤岛解。

要创建稳定的孤岛,孤岛解决方案必须满足大量约束,如负载-发电平衡、发电机一致性、传输线可用性、热极限、电压稳定性、暂态稳定性等。寻找满足所有这些约束的解决方案,甚至确认这样的解决方案是否存在,都将是过于复杂的。只考虑这些约束的一个子集,例如负载生成平衡和发电机一致性,允许产生一组可行的候选孤岛解决方案。这组候选方案可以与其他纠正措施协调,以找到满足所有约束的最终孤岛解决方案[1]-[6]。这种近似降低了受控孤岛问题的复杂性;这在处理大型网络时特别有用[1]-[4]。

文献中用于确定孤岛解的现有方法可以根据所使用的目标函数进行分类。目标函数的两种主要类型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将为减少系统分裂后必须脱落的负荷量而形成的孤岛内的功率不平衡最小化[1]-[4], [7]-[11]。寻找具有最小潮流中断的孤岛解决方案的方法使系统分裂后系统内潮流模式的变化最小化[12]-[14]。

功率不平衡与潮流中断的区别在于,功率不平衡可以用每条断线上有功功率(考虑潮流方向)的代数和来表示,而潮流中断可以用每条断线上有功功率的算术和来表示。

文献[1]提出了一种基于简化图的两相有序二值决策图(OBDD)方法,用于寻找包含相干发电机的低功率不平衡岛屿。在[2]中,使用广度优先搜索(BFS)和深度优先搜索(DFS)算法来寻找分离相干发电机组的孤岛解,且功率不平衡最小。其他可用于寻找功率流不平衡最小的岛屿的算法包括角度调制粒子群优化[4]和Krylov子空间方法[7]。

寻找具有最小功率不平衡的解是一个NP-hard问题,并且已被证明是

0-1背包问题[1]。目前还没有已知的算法可以在多项式时间内有效地解决这类问题[1], [9]。

大多数现有算法通过使用启发式搜索方法来克服这一挑战, 或者仅针对简化的网络模型或原始电力系统的选定子集来解决问题[1]-[9]。例如, 在在线应用中使用基于OBDD的方法时, 应将网络模型简化为包含约40个节点以内[3], [11]。

简化网络模型减少了求解空间。有可能在简化过程中丢失的一些解会比算法找到的最终解更好[11]。启发式搜索方法通常是相当灵活的, 并且具有令人满意的计算效率。然而, 由于这些方法倾向于收敛到局部最小值, 而不是全局最小值, 因此无法保证解的质量。

在[12]和[13]中提出了谱划分和多级核 k -means方法, 以寻找具有最小潮流中断的孤岛解。这两种方法都具有出色的计算效率, 但没有考虑发电机的共相干性[15]。这种对发电机行为的忽视意味着无法保证产生的岛屿的稳定性。此外, 在没有约束的情况下直接应用谱聚类往往会导致单个节点与图的其余部分分离[16]。在尝试电力系统的受控孤岛时, 这两种解决方案类型的缺陷显然是不可接受的。

本文提出了一种新的两步谱聚类控制孤岛算法(SCCI算法)。在SCCI算法的第一步, 使用归一化谱聚类对生成器节点进行分组。这种分组的结果作为SCCI算法下一步的成对约束, 其中每个节点基于约束谱聚类进行分组。这种约束谱聚类使用潮流数据来产生具有最小潮流中断的孤岛解决方案。因此, 本文提出的两步SCCI算法可以实时识别出一种满足发电机相干性约束且潮流中断最小的孤岛解。

本文的主体组织如下。第二节介绍了受控孤岛问题和光谱聚类的基本概念。在第三节中, 讨论了所提出的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, 以演示其性能。第五节对本文进行总结。

II. 可控孤岛与谱聚类

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约束优化问题, 并将其转化为图割问题。介绍了解决这类问题的一种可能的方法——谱聚类。

A. 图论初级

在图论中, 一种无向图模型

可以用来描述一个-gen-

发电机和母线供电系统。在上面的图模型中, 节点集和边集, 带有元素 $e_{ij}(i, j = 1, \dots, n)$, 表示母线和传输线;

分别。是节点集的一个子集, 它只包含那些与生成器直接连接的总线 W 。矩阵是边权的集合。

为方便起见, 本文只给出等分情况。图的对分将其分成两个子图 (V_1, E_1, W_1) 和 (V_2, E_2, W_2)

通过re-

移动连接这两个子图的边, 每个子图代表原始系统的一个子系统 V_1, V_2 。这里, 和是不相交的子集, 即, $V_1 \cap V_2 = \emptyset$ 和 $V_1 \cup V_2 = V$

和 V_1 以同样的方式, 和 V_2 被定义为两个不相交的子集, 而它们也分别是和的子集。

为了分离这些子图而去除的边的集合称为切集。这个切集内所有边的权值之和称为切集, 定义为[17]

$$cut(V_1, V_2) = \sum_{i \in V_1, j \in V_2} w_{ij}. \quad (1)$$

然后将图切问题定义为找到最小切量将图平分的切集[16]。通常, 对于大型电力系统, 孤岛解决方案将需要将系统分割成两个以上的岛屿; 这是使用递归二分法来实现的[16]。

B. 控制孤岛效应

使用递归二分法形成的一组子图代表了为实现可控孤岛而必须创建的岛屿。为了确保产生稳定的岛屿, 形成的岛屿应具有最小的潮流中断并满足发电机相干性的约束, 如下所述。

1) 发电机相干性: 电力系统中的大扰动可以引发无阻尼的机电振荡, 这些振荡会导致发电机失去相干性。为了创造稳定的孤岛, 任何形成的孤岛内的发电机都必须近似同步。

基于经典线性化发电机摆振方程, 忽略阻尼, 线性化二阶动态

无发电机电力系统的模型可表示为

矩阵形式如下[18]:

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (2)$$

式中, 为发电机与稳态工作点的角度偏差, 为系统状态矩阵。根据慢相理论, 将发电机分成两组等价于将矩阵任意划分为两个子矩阵和 δ_0 \mathbf{A}

表示子系统和(见图1)[19]。

其子矩阵的Frobenius范数的和可以用来定义动态耦合

和之间的子系统[19]:

$$S = \|\mathbf{A}_{12}\| + \|\mathbf{A}_{21}\|. \quad (3)$$

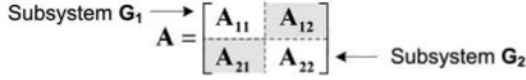


图1所示。将系统矩阵划分为两个子矩阵和A

A₁₁ A₂₂

在本文中，重点仅放在不伴有电压不稳定的无阻尼机电振荡的场景上。在这种情况下，如果假设可以通过局部补偿控制无功功率平衡，则可以忽略无功功率和母线电压幅值的影响，因为它们对动态耦合的影响可以忽略不计。因此，可以将(3)改写为：

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

式中为同步系数，为第*t*发电机的惯性常数。

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

当受到机电振荡时，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对抗摆动[18]。因此，寻找相干发电机组的问题等效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：

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

2)目标函数：分别根据(6)和式(7)定义的最小功率不平衡和最小潮流中断，都可以作为受控孤岛的目标函数。每个目标都会产生具有不同优缺点的不同解[3]，[20]：

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

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

其中表示trans- ?上有有功功率的节点和之间的任务线。

$$P_{ij}$$

使用最小功率不平衡作为目标函数，创建了具有相似负载和发电水平的岛屿，即良好的负载-发电平衡。目标函数的这一特性使系统分裂后必须摆脱的负载量最小化。

使用最小的潮流中断作为目标函数，从干扰前的潮流模式中产生最小变化的岛屿。目标函数的这一特性提高了岛屿的暂态稳定性，降低了岛屿内输电线路过载的可能性，并简化了岛屿最终与系统其余部分的重新融合[20]。

当试图确保系统分裂后的稳定性时，暂态稳定性，而不是负载-生成平衡，应该是首要考虑的问题，因为一个具有负稳定裕度和良好负载-生成平衡的岛屿将会崩溃。然而，稳定裕度为正、负载-发电平衡较差的孤岛可以通过减载实现稳定。

基于这些目标函数的性质，本文使用了最小潮流中断，它还具有降低所面临问题复杂性的额外好处，这种降低复杂性的细节在第IV-B节中进行了描述。

考虑到大型互联电力系统的复杂性，仅考虑有功潮流可能无法得到最优解。包含每个单个系统固有的一些启发式知识，或对无功潮流和电压稳定性相关挑战的额外评估，可能会导致更有效的最终分裂解决方案。然而，这种方法的复杂性可能太高，甚至不够实用。这应该在未来的研究项目中加以解决。

3)受控孤岛问题：本文解决的受控孤岛问题由最小潮流中断目标函数(7)和发电机相干约束(5)组成。在[21]中给出了解决此类优化问题的一些基本结果。

将这两个优化问题结合起来，形成SCCI算法(8)，这是通过先求解(5)，找到一组相干的发电机组，然后求解(7)服从于这些发电机组来实现的：

$$\begin{aligned} [V_{G1}^*, V_{G2}^*] = & \underset{V_{G1}, V_{G2} \subset V_G}{\operatorname{argmin}} \left(\sum_{j \in V_{G2}} \sum_{i \in V_{G1}} \left(\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_{ij}} \cdot \left(\frac{1}{H_i} + \frac{1}{H_j} \right) \right) \right) \\ & \min_{V_1, V_2 \subset V} \left(\sum_{i \in V_1, j \in V_2} |P_{ij}| \right) \\ & \text{subject to } V_{G1}^* \subset V_1, V_{G2}^* \subset V_2. \end{aligned} \quad (8)$$

这里, *argmin*代表最小值的辐角,即：

是使(5)[22]的目标函数最小化的节点分组。

C. 光谱聚类

$$[V_{G1}^*, V_{G2}^*]$$

通过使用同步系数或传输线上的绝对有功功率来定义图的边权，可以将分别寻找最弱动态耦合和最小潮流中断的问题转化为图切问题。

谱聚类是本文用来解决这些图割问题的工具。在本小节中，将介绍两种类型的光谱聚类，即非归一化和归一化光谱聚类。

1)非归一化光谱聚类：非归一化光谱聚类背后的理论可以简单描述如下。

非归一化光谱聚类将节点聚为
定义了基于拉普拉斯矩阵的两个子集 L
对于图[16] G

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

包含与 D_{con} 的总权重相等的对角元素的对角度矩阵在哪里
连接到节点。这样定义，就是边权矩阵 W
和拉普拉斯矩阵对任何无向图都是对称的。

对于平分的情况,非归一化谱聚类算法可以使用以下步骤执行[16]:

- 1)计算拉普拉斯函数的前两个特征向量 ϑ_1, ϑ_2
矩阵。 L
- 2)设为包含 $R^{n \times 2}$ 的矩阵, 作为列。设为对应于的向量 ϑ_1, ϑ_2
 $y_i \in R^2$
的第 i 行。 J
- 3)将节点聚类成簇, 使用 R^2 c_1, c_2
聚类算法, 例如 k -medoids 算法[23]。

不幸的是, 使用非归一化谱聚类平分图的解决方案通常
包括简单地将一个节点与图的其余部分分离。对于孤岛解来
说, 这种形式的解显然是不可接受的。

2)归一化谱聚类: 归一化谱聚类使用每个子图内节点权值之
和作为平衡条件, 防止谱聚类的应用简单地分离单个节点。
这就产生了归一化切割(Ncut)的概念[17], 定义为

$$Ncut(V_1, V_2) = \frac{cut(V_1, V_2)}{weig(V_1)} + \frac{cut(V_1, V_2)}{weig(V_2)} \quad (10)$$

其中和因此是

的节点权值。的定义类似

$$weig(V_1) = \sum_{i \in V_1} D_i \quad G_1 \quad weig(V_2)$$

对。包含节点权重作为平衡条件的作用是阻止创建权重非常
低的子图。采用归一化谱聚类方法, 可以使图的 $Ncut$ 最小。

对于平分的情况, 这可以通过以下步骤来实现[16],
[17]:

- 1)计算一般-的前两个特征向量 ϑ_1, ϑ_2
化的特征问题。 $L\vartheta = \lambda D\vartheta$
- 2)设为包含 $R^{n \times 2}$ 的矩阵, 作为列。设为向量对应于
的第一行。 J $y_i \in R^2$ c_1, c_2
- 3)将节点聚类成簇, 使用 a
聚类算法, 如 k -medoids 算法。

III. 两步光谱聚类控制孤岛算法

在本节中, 提出了两步SCCI算法, 用于解决式(8)中所
表达的优化问题。解决这个优化问题相当于确定一个合适的
孤岛解。

基于(8)中的目标函数和约束, 构造两个图, 并应用
SCCI算法找到这两个图的最小割点, 即可得到该解。

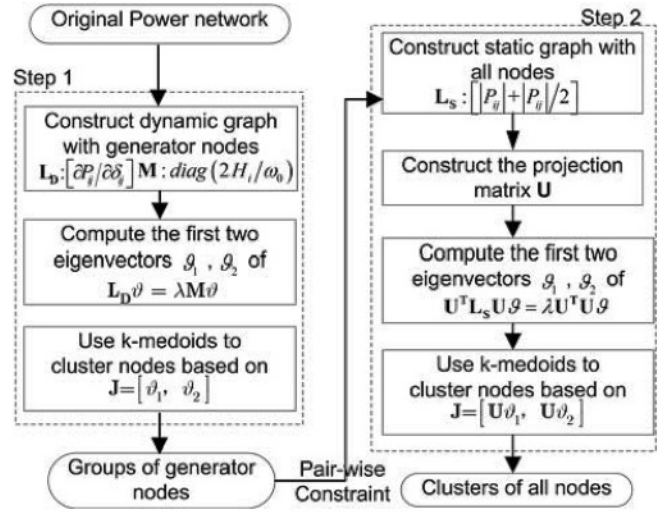


图2所示。SCCI算法流程图。

在SCCI算法的第一步, 动态图

构造。它只包含生成器节点, 它的这个图的边权是同步
系数 G_D

∂P_{ij} 它描述了节点和之间的动态耦合。为了满足发电机相干
性约束(5), j

使用第II-C2节中介绍的归一化谱聚类算法对生成器节点进
行分组。然后, 这些生成器节点组作为SCCI算法第二步的
约束。

在算法的第二步中, 使用潮流数据构建静态图。它包含
每个节点, 边缘权重被定义为活动的绝对值 G_S

节点和之间的功率交换, 。然后使用约束谱聚类对节点进
行分组, 这将

在本节中进行描述, 以解决(8)中描述的优化问题。

在图2中, 给出了描述SCCI算法执行的流程图。在下面的
文本中, 给出了两个算法步骤的详细描述。

A. 步骤1: 确定相干发生器组

通过构造一个表示发电机组节点之间动态耦合的图, 可
以找到所考虑的电力系统中的相干发电机组, 称为动态图。
然后将归一化谱聚类应用于该图, 根据发电机节点的动态耦
合对其进行聚类。

动态图可以构造为

$$G_D(V_G, E_D, W_D)$$

通过将其拉普拉斯矩阵定义为[21]

$$L_D$$

$$[L_D]_{ij} = \begin{cases} \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_{ij}} = -|V_i||V_j|B'_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) & \text{if } i \neq j \\ -\sum_{l=1, l \neq i}^m [L_D]_{il} & \text{if } i = j \end{cases} \quad (11)$$

其中为网络导纳矩阵的虚入口, 简化为内部生成器节点[18]。
动态

图描述了发电机之间的动态耦合

节点;其边权定义为同步系数-
字母系数 $\partial_i/\partial\delta_{ij}$

利用拉普拉斯矩阵,线性化 \mathbf{L}_D 阶
可得到无发电机电力系统的动态模型
改写为[18]

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{L}_D\dot{\mathbf{x}} \quad (12)$$

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

由(4)和(10)可以看出,(4)是动态图的一种 N_{cut} , 图是通
过节点惯性而不是节点权值进行归一化的。通过对动态图应用
归一化谱聚类,可以求出的最小 N_{cut} ,即优化问题(5)的解
[17]。 \mathbf{G}_D

因此,SCCI算法的第一步可以执行如下:

1)仅使用生成器构造动态图

节点,且边权值等于。2)计算一般化的前两个特征向量
 $\vartheta_1 \vartheta_2$

化的特征问题。 $\mathbf{L}_D\vartheta = \lambda\mathbf{M}\vartheta$

3)设为包含向量的矩阵,作为列。设为矩阵第th行对应的
向量 $y_i \in \mathbf{R}^2$

4)然后将节点聚类成子集,并使用k-medoids算法。 \mathbf{V}_{G1}

5)选择 \mathbf{V}_{G1} 作为新动态图的节点集,返回到1)允许递归对分。
 \mathbf{V}_{G2}

SCCI算法的第一步相当于基于慢相干理论的方法的应
用。基于慢相干的方法使用特征向量(eigenvec-)对生成器进
行分组

扭转状态矩阵。如果惯性矩阵是可逆的,则

$$(2) \text{和} (12) \text{实际上是相同的, 假设。} \quad \mathbf{A} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{L}_D$$

慢相干方法对离线分析很有用,但如果在在线应用中实
现,则存在一些缺点。很难确定发生器是否会保持相干性,
或者哪种振荡模式被已经发生的扰动激发。

然而,如何组合和满足在孤岛期间强制相干发生器群所
需的约束,而不是如何识别相干发生器,是本文解决的关键
挑战。通过使用修正后的慢相干算法[2]或在线相干识别算
法[23], [24],可以克服慢相干的缺点。

B. 步骤2:在保持相干发电机组的同时最大限度地减少潮流中断

通过将约束谱聚类应用于电力系统的静态图,可以找到
将步骤1中发现的相干发电机组分开的孤岛解决方案,并具
有最小的功率流中断。

该静态图可以使用潮流数据来描述,为一个节点电力系
统构建

$$\mathbf{G}_S(\mathbf{V}, \mathbf{E}_S, \mathbf{W}_S)$$

每个节点之间的有功功率交换。 n

必须考虑到系统内损耗的问题,才能产生ap-所需的对
称无向图

谱聚类的应用。保证矩阵为 \mathbf{W}_S
的元素被定义为对称的。 $(|P_{ij}| + |P_{ji}|)/2$

则静态图的拉普拉斯矩阵可以表示为[21] \mathbf{G}_S

$$[\mathbf{L}_S]_{ij} = \begin{cases} \frac{|P_{ij}| + |P_{ji}|}{2} = -|V_i||V_j|B_{ij}\sin(\delta_i - \delta_j) & \text{if } i \neq j \\ -\sum_{t=1, t \neq i}^n [\mathbf{L}_S]_{it} & \text{if } i = j \end{cases} \quad (13)$$

其中为网络导纳 B_{ij} 的虚入口。

图的最小潮流中断是(7)的解。然而,要解决(8),必须
包括发电机相干约束。这是通过在算法的第二步中将第一步
获得的发电机组作为成对约束来实现的[26]。

对相干约束包括1)必须链接约束和2)不可链接约束;它们
的定义如下:

- 1)必须链接约束:第一步组中的所有生成器节点必须在第二
步链接。
- 2)不可链接约束:在不同的第一步组中的任何两个生成器节
点在第二步不能链接。

约束谱聚类是解决具有成对约束的聚类问题的一种有
效方法。可以通过使用投影矩阵(子空间方法)修改解子空间
来包含成对约束[26]。

在不损失通用性的情况下,可以假设第一个节点属于集
群,下一个节点属于集群。然后将投影矩阵定义如下
[26]:

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \mathbf{1}_{m_1} & \mathbf{1}_{m_1} & \mathbf{0}_{m_1 \times (n-m)} \\ \mathbf{1}_{m_2} & -\mathbf{1}_{m_2} & \mathbf{0}_{m_2 \times (n-m)} \\ \mathbf{1}_{n-m} & \mathbf{0}_{n-m} & \mathbf{I}_{(n-m) \times (n-m)} \end{pmatrix} \quad (14)$$

其中为单位矩阵,为全一列向量,为零矩阵或零列向量。

这样,解子空间就从一个-di-投影出来

维空间投影到维空间,其中 $\mathbf{1}$
 $\mathbf{0}$ 。-维中同一簇的所有节点

空间用一个在-维空间中的等价节点来表示,以满足 n
成对约束。 $(n-m+2)$ $(m =$
 $m_1 + m_2)$ n
 $(n-m+2)$

2)

随着投影矩阵的引入,约束 \mathbf{U}
频谱聚类可以应用于静态图,以找到满足SCCI算法第一步
生成的发电机组约束的具有最小潮流中断的割集。因此,
SCCI算法的第二步可以描述如下:

- 1)构造一个包含所有节点的静态图

权重定义为。2)基于生成器构造
投影矩阵 \mathbf{U}
分组结果。

3)计算一般化特征问题的前两个特征向量 $\vartheta_1 \vartheta_2$
 $\mathbf{U}^T \mathbf{L}_S \mathbf{U} \vartheta = \lambda \mathbf{U}^T \mathbf{U} \vartheta$

4)设为包含向量的矩阵,作为列。设为的第th行对应的向
量 $y_i \in \mathbf{R}^2$

5)使用k-medoids算法将节点聚类到聚类中。 $\mathbf{V}_1 \mathbf{V}_2$

6)选择 V 为新静态图的节点集, 返回到1)。

利用上文所述的两步SCCI算法, 可以求出优化问题(8)的so-解, 即孤岛解。

第二步SCCI算法可用于任何在线相干性识别方法, 只要有相干发电机组作为约束。

IV. SCCI算法测试

在本节中, 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]。

对于每个测试系统, 都应用了SCCI算法, 并找到了一个孤岛解。对这些解进行了比较与使用谱路划分算法得到的解进行了比较算法(SkP)和OBDD方法来评价SCCI算法解的质量。

1) 频谱 k -Way划分(Spectral k -Way Partitioning, SkP): 文献[12]中引入的SkP方法没有考虑发电机相干性约束; 在测试用例I中与该方法的比较证明了发电机相干约束是形成稳定岛屿所必需的。

SkP是第II-C1节中描述的非归一化谱聚类算法的一种特例。在第三步中算法中, 不使用-medoids, 对节点进行聚类 k 选择参考节点, 然后根据节点与参考节点之间的距离将剩余节点聚类到这些参考节点。

2) 有序二进制决策图(Ordered Binary Decision Diagram, OBDD): OBDD能够搜索整个搜索空间并找到所有可能的解[1]。因此, 通过测试用例II和测试用例III与该方法的比较, 可以证明SCCI算法能够找到(8)的最优解。对[1]、[3]和[11]中描述的OBDD方法进行修正, 找到功率流中断最小的孤岛解:

$$\begin{aligned} \Phi &= SSC \cdot MCC \cdot MPD \\ SSC &= \left(\prod_{\forall i \in V_{G1}, \forall j \in V_{G2}} \bar{\Lambda}_{ij}^* \right) \cdot \left(\prod_{k=1}^2 \left(\prod_{\forall i, j \in V_{Gk}} \Lambda_{ij}^* \right) \right) \cdot \left(\prod_{\forall i \in V_L} \left(\sum_{k=1}^2 \sum_{j \in V_{Gk}} (\Lambda_{ij}^*) \right) \right) \\ MCC &= \prod_{i, j \in V} (\Lambda_{ij} \cdot \Lambda_{ij}^* + \bar{\Lambda}_{ij} \cdot \bar{\Lambda}_{ij}^*) \\ MPD &= \left\langle \left(\sum_{\substack{i, j \in V \\ i, j \in V}} \bar{\Lambda}_{ij} \cdot |w_{ij}| \right) < \varepsilon \right\rangle \end{aligned} \quad (15)$$

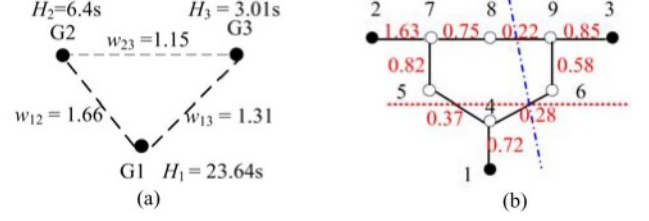


图3所示。IEEE 9总线测试系统(基准功率MW)的动态图和静态图。右:虚线为SCCI方案, 虚线为SkP方案。(a)动态图。(b)静态图。

其中是OBDD方法的布尔函数, 表示的邻接矩阵和可达矩阵 Λ^* , 分别表示图[1]的负载节点集。

SSC表示发电机相干性的要求, 其中第一项表示不同相干组的发电机不能连接, 第二项表示同一相干组中的发电机必须连接, 第三项表示每个负荷必须连接且只能连接一个相干发电机组[1], [3], [11]。

MCC用于减少孤岛解的数量, 方法是只允许那些有助于形成岛屿的边缘被断开[11]。MPD表示功率流dis-破坏不能超过阈值, 用于替代[3]和[11]中的功率平衡约束(PBC)。

A. 评估解决方案质量

1) 测试用例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节中描述的归一化谱聚类算法, 并找到了两个相干发电机组。

SCCI算法的第二步需要使用(13)构建静态图, 如图3(b)所示。然后使用相干生成器组来构建一个投影矩阵(14), 该矩阵表示生成器2和3之间的必须链接约束, 以及生成器1与生成器2和3之间的不可链接约束。该投影矩阵允许使用第III-B节中描述的约束谱聚类算法对系统的节点进行聚类。

将SCCI算法应用于IEEE 9总线测试系统, 结果发现单个切割集产生孤岛解Tion由两个孤岛和组成。这个切割集在图3(b)中用虚线标记, 即切割也就是0.65 p.u. $\{1, 4\}$ $\{2, 3, 5, 6, 7, 8, 9\}$

将SkP方法应用于IEEE 9总线测试系统, 得到由两个不同的总线组成的孤岛解决方案孤岛和。该切割集在图3(b)中用虚线标记, 其切割为0.50 p.u. $\{1, 2, 4, 5, 7, 8\}$ $\{3, 6, 9\}$

很明显, 岛是不稳定的, 因为它包含了不同步的发电机1和2。SCCI算法的解具有较高的分割率; 这种与SkP方法解的差异表示满足发电机相干约束的代价。

表我
39母线测试系统第一步中的发电机组

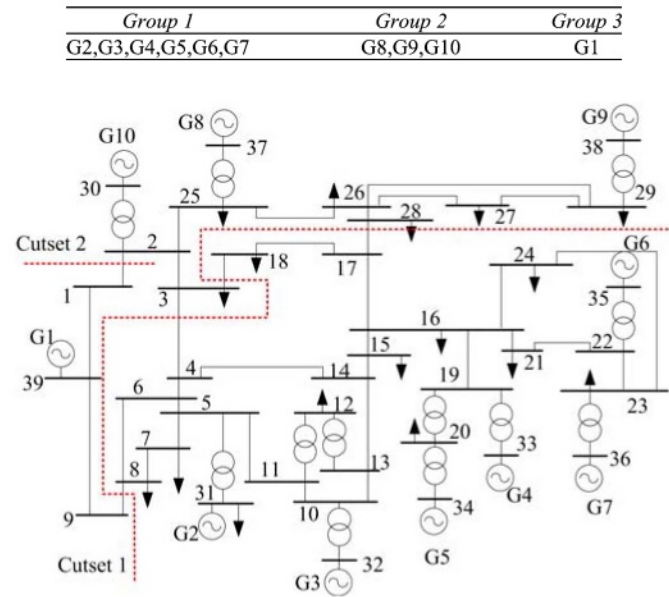


图4所示。IEEE 39总线测试系统单线图。虚线表示产生最终孤岛解决方案所需的两个切割集。

表ii 39总线测试系统与OBDD的结果比较

| Cutset 1 | $\sum P_{ij} (MW)$ | 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:与测试用例I一样,使用SCCI算法的第一步来查找IEEE 39总线测试系统的动态图。归一化谱聚类的应用确定表1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,以形成投影矩阵。

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平分来确定两个切割集并创建三个岛屿。

第一个被发现的切割集,切割集1,将组1与组2和组3分开。第二个被发现的切割集,切割集2,将第3组与第2组分开。结合起来,这两个cutset形成了最终的孤岛解,如图4所示。

OBDD方法的执行值为335 MW,表2显示了切割集1的五种最小切割方案,以及切割集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组分开的最小切割。切割集2的比较不包括在内,因为它将是相当琐碎的,只分离一个生成器。

表iii 118母线测试系统的发电机组

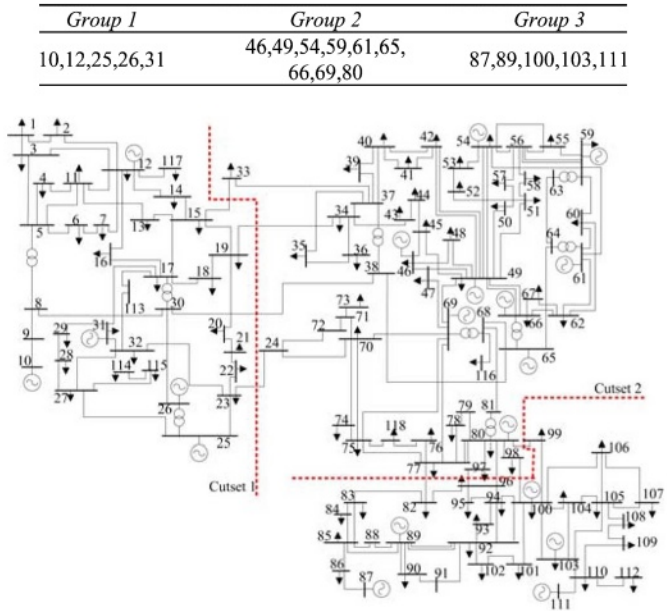


图5所示。IEEE 118总线电网单线图。两条虚线表示产生最终孤岛解决方案所需的切割集。

3)测试用例III: IEEE 118总线电源系统:SCCI算法的第一步返回表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切割集1和切割集2将组1从组2和组3中分离出来,然后将组2从组3中分离出来。结合起来,这两个切割集形成了最终的孤岛解,如图5所示。

与测试用例II中一样,OBDD方法返回的结果将用于验证SCCI解决方案。不幸的是,将OBDD方法直接应用于118节点的网络是不实际的。搜索割集1时,将原网络简化为34节点43边图;搜索割集2时,将原网络简化为24节点38边图。然后将为这些简化图找到的cutset解映射到原始图上,这样仍然可以找到原始图中所有可能的解。简化图的精确性质和映射关系在附录中给出。

对于切割集1和切割集2,表4给出了OBDD方法发现的具有最小切割的五个切割集,旁边是SCCI算法返回的结果。

表IV中的比较显示,与测试用例II中一样,SCCI算法返回的切割集将具有最小切割的相干发电机组分开。

B. 计算效率

生成的孤岛解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

表4
118总线系统与OBDD的结果比较

| <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.

评价受控is-landing算法性能时的指标。

以潮流中断最小为目标函数意味着SCCI算法所解决的问题是一个p问题，因为它可以转化为最大流/最小切割问题，并且可以有效地求解[9]，[16]。

然而，引入成对约束，特别是不能链接约束，这是将发电机相干性约束纳入问题所必需的，增加了问题的复杂性。这种复杂性的增加使得约束谱聚类的可行性问题在几种情况下np完全，这意味着在多项式时间内不可能识别出满足所有约束的解是否存在[29]。

这种复杂性的增加可以通过使用递归对分来识别岛屿来克服。这是因为当簇数为两个时，这类问题总是可以有效地解决[29]。

SCCI算法解决的受控孤岛问题的搜索空间将是具有生成器、节点和边的图。谱聚类的主要计算任务是计算拉普拉斯矩阵的特征向量。因此，SCCI算法第一步的时间复杂度为 $O(n^3)$ ，第二步的时间复杂度为 $O(m^3)$ ，SCCI算法的步骤为。如果认为有必要，这可以简化为，因为矩阵是一个稀疏矩阵[15]。

$$\begin{aligned} O((n-m+2)^3) \\ O((n-m+2)^{4/3}) \quad \mathbf{Ls} \end{aligned}$$

这种程度的时间复杂度意味着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，解决最小功率不平衡目标函数的受控孤岛问题是一个NP-hard问题，这是一种无法在

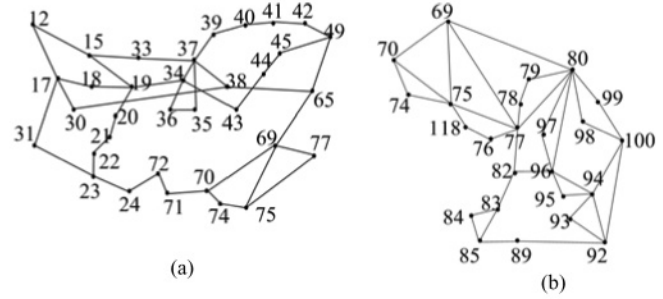


图6所示。OBDD的118总线系统简化图。(a)割集1的简化34节点43边图。(b)割集2的简化24节点38边图。

多项式时间，使用现有算法，因为计算时间是指数顺序的[9]，[11]。因此，使用最小的潮流中断有利于将问题的时间复杂度从NP-hard降低到P，并使所提出的SCCI算法的计算效率提高。

V. 结论

本文提出了一种新的两步SCCI算法来确定电力系统的孤岛解。该算法的核心是一个单一的优化问题，以最小的潮流中断作为目标函数，并考虑确保发电机的一致性作为约束。

使用最小的潮流中断作为目标函数，而不是最小的功率不平衡，提高了产生的岛屿的暂态稳定性，降低了问题的时间复杂度，并允许开发计算效率高的算法。发电机相干约束的包含防止了包含非相干发电机或孤立负载的岛屿的形成。已经考虑了三个测试用例来评估该算法。结果表明，该SCCI算法计算效率高，适用于大型电力系统的实时控制。

附录

本附录包含测试用例III (Section IV-A3)中使用的简化图图6，以及这些简化图与原始图表六和表七之间的映射关系。

创建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。

如果表六和表七中的新边在原图中有多个映射割集，则只选择权值最小的一个作为新边，在将找到的解映射回原图时将考虑其他边，以便仍然找到所有可能的解。

例如，表VI中的新边12-17有两个映射割集(15 - 17, 12 - 16)和(15 - 17,16 - 17)，权值分别为94.8和105.0。新边12-17的权值将被指定为94.8。如果新边12-17

表六世
简化图1的节点和边的映射
表七世

| New node | Original nodes | New node | Original nodes |
|----------|--|----------|---------------------|
| 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 |
| New edge | Original cutsets | New edge | Original cutsets |
| 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) |
| New edge | Original cutsets | | |
| 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) | | |

映射简化图的节点和边2

| New node | Original nodes | New node | Original nodes |
|----------|---|----------|----------------|
| 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 |
| New edge | Original cutsets | | |
| 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) | | |

是在生成的解中，映射割集(15 - 17,12 - 16)或(15 - 17,16 - 17)是原始图最终解的可能元素。

参考文献

[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. Power Syst.*, vol. 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 the continuation method," Ph.D. dissertation, Iowa State Univ., Ames, 2005.

[3] K. Sun, D. Zheng, and Q. Lu, "Splitting strategies for islanding operation of large-scale power systems using OBDD-based methods," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 2, pp. 912–922, May 2003.

[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. Informat.*, vol. 23, pp. 45–56, 2009.

[5] Q. Zhao, X. Li, and D. Zheng, "OBDD-based load shedding algorithm for power systems," in *Handbook Power Systems I, Energy Systems*. Berlin, Germany: Springer, 2010, pp. 235–253.

[6] V. Terzija, "Adaptive underfrequency load shedding based on the magnitude of the disturbance estimation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 3, pp. 1260–1266, Aug. 2006.

[7] S. Najafi, "Evaluation of interconnected power systems controlled islanding," in *Proc. IEEE Bucharest Power Tech Conf.*, Bucharest, Romania, 2009.

[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. Power Syst.*, vol. 25, no. 4, pp. 1902–1909, Nov. 2010. Authorized licensed use limited to: Xian Jiaotong University. Downloaded

[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. Power*, vol. 19, no. 6, pp. 778–797, 2009.

[10] C. H. Papadimitriou, *Computational Complexity*. Reading, MA: Ad-dison-Wesley, 1994.

[11] Y. Qiao, "Study on the active splitting control scheme of large-scale power systems," Ph.D. dissertation, Tsinghua Univ., 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. 918–933, May 2005.

[13] A. Peiravi and R. Ildarabadi, "A fast algorithm for intentional islanding of power systems using the multilevel kernel k-means approach," *J. Appl. Sci.*, vol. 9, no. 12, pp. 2247–2255, 2009.

[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 kernel k-means bisection of power system," *Australian J. Basic Appl. Sci.*, vol. 3, no. 3, pp. 2366–2388, 2009.

[16] U. V. Luxburg, "A tutorial on spectral clustering," *Statist. Comput.*, vol. 17, no. 4, pp. 395–416, Dec. 2007.

[17] J. Shi and J. Malik, "Normalized cuts and image segmentation," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 22, no. 8, pp. 888–905, Aug. 2000.

[18] J. H. Chow, *Time-Scale Modeling of Dynamic Networks With Applications to Power Systems*. New York: Springer- Verlag, 1982.

[19] S. S. Lamba and R. Nath, "Coherency identification by the method of weak coupling," *Elect. Power Energy Syst.*, vol. 7, no. 4, pp. 233–242, Oct. 1985.

[20] V. E. Henner, "A network separation scheme for emergency control," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 2, no. 2, pp. 109–114, 1980.

[21] L. Ding and V. Terzija, "A new controlled islanding algorithm based on spectral clustering," in *Proc. 4th IEEE Int. Conf. Electric Utility Deregulation, Restructuring, and Power Technology (DRPT2011)*, Weihai, China, Jul. 2011.

[22] [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Arg_max.

[23] S. Theodoridis and K. Koutroumba, *Pattern Recognition*, 4th ed. New York: Academic, 2008.

[24] M. Johnson, M. Begovic, and J. Daalder, "A new method suitable for real-time generator coherency determination," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 1473–1482, Aug. 2004.

[25] N. Senroy, "Generator coherency using the hilbert-huang transform," *IEEE Trans. Power. Syst.*, vol. 23, no. 4, pp. 1701–1708, Nov. 2008.

[26] T. D. Bie, J. Suykens, and B. D. Moor, "Learning from general label constraints," in *Proc. IAPR Int. Workshop Statistical Pattern Recognition*, Lisbon, Portugal, Aug. 2004.

[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. Power Syst.*, vol. 20, no. 1, pp. 389–399, Feb. 2005.

[29] I. Davidson and S. S. Ravi, "The complexity of non-hierarchical clustering with instance and cluster level constraints," *Data Mining Knowl. Discov.*, vol. 14, no. 1, pp. 25–61, 2007.

雷丁(10岁), 1980年生于中国山东。他分别于2001年和2007年获得山东大学电气工程学士学位和博士学位。

2008年至2009年, 在中国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学院, 任副教授。目前, 他也是英国曼彻斯特曼彻斯特大学的研究助理。他的研究兴趣包括控制岛





Francisco M. González-Longatt (M '03-SM '09), 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政治大学电气工程系副教授(1995-2009)。他目前是英国曼彻斯特曼彻斯特大学电气与电子工程学院的研究助理



Peter Wall于2008年和2009年分别获得英国曼彻斯特大学(University of Manchester)的电气工程学士和硕士学位。他目前在曼彻斯特大学电气与电子工程攻读博士学位。

他的主要研究领域是电力系统动力学和频率稳定性。



Vladimir Terzija(1995 - 2000年硕士)是英国曼彻斯特曼彻斯特大学电气与电子工程学院EPSRC电力系统工程讲座教授

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公司工作, 担任开关柜和配电自动化专家。他的主要研究兴趣是智能方法在电力系统监测、控制和保护、开关柜和配电中的应用

快速瞬态过程, 以及DSP在电力系统中的应用。