

DOI: 10.7500/AEPS20130321001

## 电力孤岛划分研究综述

王旭东<sup>1</sup>, 林济铿<sup>2</sup>, 李胜文<sup>3</sup>, 郑卫红<sup>4</sup>

(1. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津市 300384; 2. 同济大学电子与信息工程学院, 上海市 201804;  
3. 山西电力科学研究院, 山西省太原市 030001; 4. 国网天津市电力公司调度控制中心, 天津市 300010)

**摘要:** 电力孤岛运行是智能电网中的一种特殊运行方式。对于输电网而言,在系统危急情况下按最优孤岛方式及时地将互联电网划分成多个能够稳定运行的孤岛系统,既可以避免局部事故扩散引发大面积停电甚至系统崩溃所带来的巨大损失,又使得切机切负荷量最小;对于含分布式发电的配电网而言,优化的孤岛运行方式可以充分发挥分布式能源的潜力,提高配电系统的供电可靠性。文中在总结智能电网最优孤岛划分影响因素的基础上,对该领域国内外相关研究成果进行了全面分析和分类,指出了各类方法的优缺点及关键问题;进而阐述了电力孤岛的最优形成问题的发展趋势及亟待解决的问题。

**关键词:** 最优孤岛划分; 智能电网; 配电系统; 分布式电源

### 0 引言

智能电网(智能输电网/智能配电网)中的自愈功能建设将是智能电网体系构建的关键一环。其中,最优电力孤岛划分即为电网自愈中的最关键技术之一<sup>[1]</sup>。对于输电网而言,在系统崩溃之前,把系统提前分解成数个独立稳定运行的子系统,可以在实现故障隔离的同时,将负荷损失降到最低。对于配电网而言,由于分布式电源(distributed generator, DG)的渗透性越来越强,如国内 6 MW 以下的光伏电站无条件并网的政策已经在部分地区试执行;随着该政策的全面执行,在国内的各地配电网中即将包含有大量以小光伏发电为主的 DG 系统,配电网正逐步拥有某些与输电网类似的运行特性;在因输电系统或配电系统发生故障导致配电系统全面停电的情况下,因 DG 具有主动发电的能力,可以通过形成以 DG 为电源的配电网电力孤岛运行而恢复一部分重要负荷的供电,在提高配电网的供电可靠性的同时,也一并提高 DG 的利用效率。

孤岛运行是相对于联网运行而言的,而孤岛指的是暂时脱离主网运行的局部独立系统。输电网孤岛运行和配电网孤岛运行作为电网故障处理的一种应急运行方式,均可明显提升系统供电的可靠性和安全性。但由于两者所包括的电源性质、规模及网络结构的差异性,两者又有很大的不同。首先,二者

的目标不同:输电网孤岛运行的目标是在保证故障隔离(即孤岛划分过程要计及故障信息)的前提下分离失步机群,实现各个孤岛安全稳定运行,且同时考虑尽量降低负荷切除量;配电网直接与用户相连,其孤岛运行的目标是在配电网故障安全隔离之后,使失电区域中重要负荷得到优先恢复的同时,尽可能多地恢复其他负荷,即实现恢复供电收益最大。基于此目标的不同,两者划分所要考虑的条件不同:①输电网孤岛要求每个孤岛内机组归属于同一同调机群,以保证孤岛系统运行的动态稳定性,而 DG 多为逆变型电源,调节及控制方便,故配电网孤岛无同调要求,可以灵活配置;②基于负荷损失最小的目标,输电网孤岛要求任一负荷在没被切除之前,至少有一个电源与之相连,即连通性要求,而 DG 容量一般比较小,难以实现失电区域整体供电恢复,所以配电网孤岛没有这一要求,但为了充分发挥在电网失电之后 DG 出力的最大效用,配电网孤岛需计及负荷的重要性及可控性。其次,输电网孤岛一般要求电网是环网结构,而配电网孤岛要求电网是放射性结构。

含有大量可再生能源并网的现代互联输电网/配电网一般均规模庞大,接线形式非常复杂,跨越地域辽阔,在实现最优能源传输及分配的同时,也蕴含着重大事故发生的隐患。在重大事故发生时,如何快速有效地确定最佳电力孤岛,实现故障隔离,尽可能减少停电范围,尽可能发挥具有独立发电能力的可再生能源的作用以提高供电可靠性,对于智能输电网及智能配电网来说均是亟待解决的一个难题。

收稿日期: 2013-03-21; 修回日期: 2013-07-04。  
国家自然科学基金资助项目(51177107)。

本文在深入探讨含 DG 智能配电网和智能输电网的最优孤岛划分问题所要考虑的相关影响因素之后,对该领域国内外相关研究成果进行了全面分析和分类,指出了各类方法的优缺点及关键问题;阐述了电力孤岛的最优形成问题的发展趋势及亟待解决的问题,为该问题的进一步研究及发展奠定一定的基础。

## 1 智能配电网最优孤岛划分

随着节能减排压力的增大,以及 DG 技术的逐渐成熟,配电网中以各种可再生能源为一次能源的 DG 越来越多,对配电网的运行方式及管理提出了更高的要求。

根据现行规程规定,主网故障后配电网中的所有 DG 必须短时退出运行<sup>[2]</sup>。但因 DG 具有独立供电的能力,故障隔离之后,利用 DG 恢复部分重要负荷的供电,将显著提高系统的供电可靠性<sup>[3-9]</sup>。

配电网的最优电力孤岛应综合考虑电气安全约束、负荷总恢复量、网络损耗、负荷可控性等因素。众多专家学者就如何形成配电网最优孤岛进行了广泛而有益的研究。

文献[10]提出了实现配电网孤岛运行的基本框架,根据网络实时信息,判断孤岛形成的必要性,根据负荷预测及配电网发展趋势预测,选择切负荷最少、运行稳定的最优孤岛。

文献[11]给出了以 DG 为中心,在满足功率平衡约束的前提下按负荷优先等级由高到低依次向电源周围负荷供电的有效算法,得到由若干孤岛组成的孤岛划分方案。

文献[12]提出了不考虑负荷优先级,并基于树模型的孤岛划分算法,树模型的根节点为故障点。该方法按照深度优先搜索顺序自上而下依次断开支路(相应地去掉该支路所带的负荷),直到剩余的负荷及 DG 满足功率平衡和设备容量约束。显然,文献[11-12]方法均只是基于功率平衡角度来考虑孤

岛的形成,且未考虑对可控负荷的处理。

文献[13]提出了计及负荷可控性和负荷优先等级的孤岛划分策略:首先,形成连接各个 DG 和重要负荷(优先等级高)的网络,即初始孤岛;然后,根据功率平衡约束调整负荷。该方法在减负荷过程中首先削减可控负荷,增负荷过程中首先增加不可控负荷。不难看出,该策略只能形成一个孤岛,即使在网络中电气距离相距较远的 DG 依然会被划分在一个孤岛中,将造成较大网络损耗。

文献[14-15]基于图论中树背包问题(tree knapsack problem, TKP),建立了接近工程实用的最优孤岛划分数学模型,并分别基于 0-1 整数动态规划算法和分枝定界算法,提出了“搜索+调整”的最优孤岛划分策略。该方法能够在工程可接受的时间内得到优化的孤岛划分方案。该方法与上述其他文献共同的缺点是只能适用于无联络开关的配电网最优孤岛划分。

文献[16]根据配电网环网结构设计、开网运行的特点,提出了基于 Prim 算法的配电网孤岛划分方法。将考虑联络开关的孤岛划分问题转化为求取连通图的最小生成树。采用改进后的 Prim 算法对连通图进行搜索,以确定有效的孤岛范围。此文以利于故障恢复后孤岛模式与并网模式的快速转换为原则,以切除的负荷个数最少为目标,虽然考虑了功率平衡约束,但该文的策略难以保障孤岛功率差额最小,即最大限度地发挥 DG 的优势。计及联络开关的配电网孤岛划分模型的构成及求解策略需进一步探讨。

上述方法的基本思路、代表性方法、基本策略以及优缺点的比较如表 1 所示。

可以看出,含 DG 的智能配电网最优孤岛划分问题已逐渐受到研究人员的关注。因此,上述相关问题的进一步拓展和解决,将促进智能配电网的发展及完善。

表 1 典型智能配电网孤岛划分方法  
Table 1 Typical island partitioning method of smart distributed system

典型思路	代表方法	基本策略	优势	缺点
仅考虑功率平衡	基于有根树的启发式搜索方法	以 DG 为中心向外扩展形成孤岛方案	模型和算法简单,易于实现	未考虑负荷可控程度和联络开关影响
考虑功率平衡、负荷优先级和可控程度	基于 TKP 的图论方法	基于动态规划算法和分枝定界算法,通过“搜索+调整”过程得到优化孤岛方案	模型精度和算法复杂度皆符合辐射网孤岛划分要求	未考虑联络开关影响
考虑功率平衡、孤岛个数、联络开关影响	基于 Prim 算法的连通图搜索方法	将考虑联络开关的孤岛划分问题转化为求取连通图的最小生成树	考虑了联络开关影响	难以保障孤岛功率差额最小

## 2 智能输电系统最优电力孤岛划分

电力系统的运行状态越接近极限系统就会越脆弱,而影响电网脆弱性的潜在因素可以分为内部和外部两类<sup>[1]</sup>。内部因素包括电网元件故障、保护和控制系统故障、信息系统和通信网络故障以及不充分(或不可靠)的安全评估。外部因素包括自然灾害、人的操作错误和蓄意破坏等。两类因素都可能导致灾难性的后果和连锁故障。一个自愈和坚强的电力系统除了能解决地方和区域级别的功率失调和停机故障外,必须能通过各种合理的协调操作和控制措施,吸收和化解各种范围更广、更系统化的事故甚至蓄意破坏等对系统的安全稳定性所带来的影响及冲击,并将其影响限制在局部范围之内。这样,一旦因各种因素使得系统的安全性及稳定性受到潜在或无法避免的巨大破坏时,也可成功应对,避免因系统崩溃所造成的大面积长时间的停电。而在适当时机实施系统可控孤岛划分就是避免系统全面崩溃的重要措施。关于电力系统孤岛相关的研究分为以下两个方面。

1) 被动孤岛:通过事先整定的解列装置实现对系统的孤岛被动划分。

2) 最优孤岛:根据系统的实时运行状态及系统故障信息,选择最优的孤岛方案,主动把系统划分成数个独立运行的孤岛系统。

### 2.1 被动孤岛

当互联系统受到大干扰而失去同步时,由失步解列装置所形成的被动孤岛是当前防止系统全面崩溃的最后一道防线及措施<sup>[17]</sup>。电力工程技术人员通过对系统故障情况的离线仿真得到系统可能的振荡失步断面,然后将失步解列装置安装到这些断面中的线路上。当系统发生振荡时,失步解列装置根据就地的量测信息(如电压、相角)和设定的解列判据判断系统是否发生了异步振荡及失步中心是否落在装置所在的线路上,然后确定是否动作将系统解

列成若干孤岛<sup>[18]</sup>。如何准确地判定系统的振荡中心位置,如何利用局部信息、先进测量装置信息(如相量测量单元信息)及系统开关的联动信息正确地判断系统是否已失步而实施系统失步解列,是失步解列研究需要关注的重点<sup>[19]</sup>。正如文献<sup>[20-21]</sup>所指出的那样,由于失步解列装置只是基于当地信息,或系统局部信息,尚无法适应所有系统动态状态,即其是否能够在各种情况下均完全正确动作尚无法保证。再者,即使失步解列装置能够正确动作而隔离故障,并把系统分割成彼此分离的多个独立子系统,也不可避免地存在某些子系统发电机出力有很大的富余而不得不切除大量发电机,而某些子系统发电机出力缺额却比较大,不得不切除大量的负荷,还是可能造成大面积停电。

因此,基于上述原因,把被动孤岛措施作为防止系统崩溃的最后一道防线正逐渐受到研究人员的质疑和挑战<sup>[22]</sup>。

### 2.2 主动孤岛

主动孤岛与被动孤岛的最大区别在于没有延续“离线整定,在线判断”的传统继电保护动作方式,而是遵循“实时信息,全局控制”的思路。它根据系统实际运行工况,在保证同调机群在同一子系统、非同调机群彼此之间不连通的前提下,选择出使各个子系统功率差额最小且能稳定运行的网络孤岛运行方案。该策略在消除系统全面崩溃威胁的同时实现切除负荷总量最小,从而将系统瓦解所造成的经济损失降低到最少。

与被动孤岛相比较,最优主动孤岛得到的电力孤岛在系统维护和系统恢复方面具有明显的优势:各个子系统运行更加稳定,更不容易出现全面系统崩溃。此外,如果孤岛方案设计和操作合理,还可以降低系统恢复的复杂程度,减少总的恢复时间。主动孤岛划分和被动孤岛划分方法的对比如表2所示。

表2 输电系统主被动孤岛划分方法比较  
Table 2 Comparison between active and passive island partitioning method for transmission system

划分方法	基本思路	实施方法	优势	缺点
被动孤岛	离线整定,在线判断	通过离线仿真明确失步断面并安装失步解列装置,根据就地的量测信息和解列判据执行解列操作	配置方便,所需量测信息较少,技术相对成熟	基于局部电气量,无法适应所有系统动态状态,解列后的子系统功率差额较大
主动孤岛	实时信息,全局控制	根据系统实际运行工况,在保证同调机群在同一子系统、非同调机群彼此之间不连通的前提下,选择出使各个子系统功率差额最小且能稳定运行的孤岛运行方案	在消除系统全面崩溃威胁的同时实现切除负荷总量最小,从而将系统瓦解所造成的经济损失降低到最少	依赖于广域信息测量和强大的后台软件系统支持,系统结构复杂

最优孤岛思路在实际工程中的应用也体现了其优势。为应对电网供电能力的不足,对供电可靠性和供电质量要求较高的印度工业企业利用自备电厂在系统故障情况下形成有效的孤岛系统,并利用优化调节技术保证孤岛系统电压、频率的稳定,避免主网失电所带来的巨大经济损失<sup>[23]</sup>。1999年11月22日,一架喷气式教练机撞断日本东京电力公司一条重要的275 kV联络线,孤岛保护系统启动,兼顾有功和无功功率平衡的最优孤岛方案的成功实施避免了大面积停电事故的发生,也保障了孤岛上重要负荷持续供电<sup>[24]</sup>。在北美“8·14”大停电事故中,FirstEnergy公司所辖4回345 kV线路的相继开断没有引起足够重视,该公司也未及时将其系统与其他相连系统解列,最终造成8个州的大停电。而美国南部电网及西部电网由于采取了恰当的最优孤岛操作将故障区与正常运行区成功分离,维持了本区域的正常供电<sup>[25-26]</sup>。因此,可以断言,此次影响巨大的停电事故中,没能及时实施全面有效的系统主动解列,才是导致大停电发生及发展的最主要原因。2012年7月30日和31日两天,印度连续发生大停电事故,这也是世界范围内迄今为止规模最大的停电事故。在印度电网中,除南部电网与相邻电网采用直流异步联网之外,其余4个区域电网之间以交直流混联方式组成同步大电网。两次大停电事故均发生在同步电网范围内,特别是第二次电网事故首先发生在北部电网,由于同步联网未能及时分解,使得故障扩展,导致北部、东部、东北部3个区域电网相继大面积停电。在炎热的夏季,印度广大地区气温大多在40~50℃,持续两天几乎全国范围内的大停电,给印度人民生活所带来的不便及困难可想而知。若北部电网在第二次故障中实现孤岛运行,东部及东北部电网可能就不至于因此受影响而停电,并酿成如此严重的停电事故。从这两次大停电事故不难看出,成功的最优孤岛措施对于故障隔离、抑制故障的扩展、降低故障的影响具有非常明显的作用。

寻求合理的最优孤岛策略,实际上就是求解一组最佳的开断线路,从而在满足分离和连通约束(分离约束是指非同调机组要属于不同子系统;连通约束是指非发电机节点必须与至少一个发电机连通)的前提下,将原系统分成若干满足电气约束(如节点电压约束、设备容量约束等)且功率差额尽可能小的独立子网。从这个角度而言,系统中所有的线路都可能在实施最优孤岛策略的过程中被断开。随着系统规模的增大,电网孤岛断面的总量将成几何级数增长,因此,从中寻找最佳断面就变得十分困难。

由于电力系统最优主动孤岛问题从问题本质上

讲是有约束最优图分解问题,目前大多数文献上提出的方法基本上均是基于各种图论技术的图分解搜索方法在电力系统最优孤岛划分问题的应用。但从各个方法所依据的不同分解理论及方法的组成来分,目前文献上提出的方法可以粗略地进一步划分为以下3类:①以单纯的图论及图分解技术为基础的最优孤岛划分方法;②以慢同调理论为基础,结合图分解及图搜索技术的最优孤岛划分方法;③其他方法实现基本图分解,然后结合图搜索技术实现最优孤岛划分。

### 2.2.1 以单纯的图论及图分解技术为基础的最优孤岛划分方法

如果把母线看做节点,母线间的变压器、线路等连接设备看做支路,各支路的潮流和节点所连接负荷的功率或者发电机输出功率分别可以看成支路和节点的权值,一个互联电力系统即可用一个连通图形象地表示。因此,图论的相关研究成果,例如图的分解及图的搜索方法,与电力系统的特点相结合之后即可方便地用于互联电网孤岛划分问题的求解。

在将电力系统抽象成点赋权图的基础上,文献<sup>[27-30]</sup>提出了一种基于有序二元决策图(ordered binary decision diagram, OBDD)的三阶段大电网孤岛划分策略。该策略的贡献之一是采用布尔变量表达式巧妙地将失步电网孤岛划分所要满足的两个条件(分离/同调约束和功率平衡约束)以显式的形式进行描述。该文的求解策略因将图论中的相关理论及方法与系统孤岛划分模型相结合而具有比较好的理论基础。但该方法中表示所有节点之间连接性及通路的布尔矩阵 $A_0^*$ 的形成、分析过程本身就是一个非确定多项式(non-deterministic polynomial, NP)难题,没有多项式解法;因此,如何实现包括 $A_0^*$ 等关键布尔矩阵的快速求解是此策略能否适用于大系统最优孤岛的关键。与文献<sup>[27-30]</sup>采用点加权无向图不同,文献<sup>[1, 31-36]</sup>用于描述电力系统的图模型中的各条边也都被赋予了权值,其边权值为这些边的潮流绝对值。文献<sup>[1]</sup>提出了基于谱算法(spectral method)的孤岛划分方法。该方法的基本思路是把系统中各条线路的有功功率作为其相应的权值而形成无向图,并构造该图的Laplacian矩阵,然后求解该矩阵的最小 $k$ 个特征值及相应的特征向量,利用特征向量构成顶点间的距离测度,通过迭代的方法最后形成总失配功率最小的 $k$ 个子系统的分解。该方法存在以下3个方面的缺点:①由于要求解Laplacian矩阵的 $k$ 个最小特征值及对应的特征向量,当系统规模增大时,计算量可能过大<sup>[37]</sup>;②基于谱理论的图分割算法不能保证

分割后的  $k$  个子图都是连通子图<sup>[37-38]</sup>; ③无法考虑同调约束,即无法使得同调机组属于同一子系统。故基于谱算法得到的图分割结果并不能直接作为孤岛划分方案。为找到可行的孤岛方案,还需要人为附加孤岛分拆、合并、重构等操作,使得各个子系统连通,同调机组属于同一子系统。因此,基于该算法所得到的孤岛划分方案只能是近似的最优孤岛方案。文献[31-32]提出了基于多级 Kernel  $k$ -Means 算法的孤岛划分方法,其核心算法是图的  $k$ -way 分割算法<sup>[39]</sup>。 $k$ -way 分割算法是利用节点聚合、图分割及恢复过程 3 个步骤得到图的多分割方案。这一算法因避免了矩阵特征值和特征向量的计算,算法的时间复杂性相对于谱算法而言要低一些。但由于该方法在节点聚合阶段将原图的维数进行了简化而可能丢失最优模式;此外,该算法同样无法保证得到的所有  $k$  个子图都是连通图,也无法直接得到满足分离/同调约束的孤岛方案,仍需附加人为的操作,才能得到可行方案,故其孤岛方案的最优性也只是近似的。

文献[33]把慢同调理论和图的分割方法结合起来,先是利用慢同调程序辨识出同调机群分组,然后对系统进行简化,并用 METIS 图分割软件包实现电网孤岛划分。网络化简过程首先以不影响最后孤岛方案的形成为原则,简化电网结构,形成其初始图模型,然后把各同调机群相关的网络节点压缩为一个节点,得到简化网络。简化网络经 METIS 图分割软件包分割之后得到多个孤立子系统,其数量往往远多于同调机群的数目,通过孤岛合并而得到子系统数量满足要求的孤岛方案;进而再通过恢复网络结构得到相应原系统的孤岛方案。该方法的优点是把与各同调机群相关的节点均化简成一个节点而参与图的分割,因此,能够确保在图的分割过程中同调机群属于同一子系统,不会出现属于同一同调机群的机组被划分到不同子系统的情况。文献[34-35]利用多级图分割策略寻求最优孤岛策略。该策略也包括网络合并简化、图分割和恢复网络结构 3 个过程。其中,在图分割的阶段采用了与文献[33]类似的 pMETIS 图分割软件包。文献[35]在文献[34]的基础上,在孤岛方案的求解过程中采用多目标图分割方法兼顾无功功率平衡约束,从而避免由于无功功率不足造成各孤立系统电压过低的问题。其思路是:首先,在仅考虑有功功率平衡约束的情况下求解最优孤岛方案  $C_1$ ;然后,在仅考虑无功功率平衡约束的情况下求解最优孤岛方案  $C_2$ ;最后,利用这两个结果对图中各边的权值进行加权归一化,在此基础上再利用图分割算法求解得到最终

的孤岛方案。该方法由于要多次进行图的分割搜索计算,故整体计算时间偏长。文献[36]基于线路潮流确定各条边的权值和方向,从而建立了电力系统有向图模型,进而通过对原始最小割(minimal cut)问题进行拓展构造以孤岛子系统之间净交换功率最小为目标函数的最优孤岛断面搜索数学模型,并提出了基于贪婪算法的启发式方法对此模型进行求解。该文的重要贡献之一是通过巧妙的变量设计将最优孤岛最优平衡分割问题中分离/同调约束用显式的形式进行表示。然而,由于这一约束的表达式非常复杂,如何在算法中加以考虑,文中并没有涉及。

针对最优孤岛问题的特点,文献[40]通过对图约束背包问题(graph constrained knapsack problem, GKP)的扩展,提出了一类新的图分割问题——含连通图约束的背包问题(connected graph constrained knapsack problem, CGKP),并基于所定义的 4 个新的节点集合及求解方法,提出了求解该图分割问题的近似算法。该算法在满足图分割目标函数最大化的同时,保证所分割之后的子图均是连通的。该方法丰富了图分解问题的求解方法;同时,该方法为构思高效的最优孤岛策略提供了新的理论基础。文献[41]建立了最优孤岛问题的完备解析数学模型,并基于文献[40]所提出的算法,提出了“搜索+调整”的两阶段求解方法,即将最优孤岛问题分解成图的最优平衡分割问题和基于优化潮流的调节问题,并分两个阶段分别求解。其中,图的最优平衡分割问题又被分解成多个 CGKP,利用文献[40]所提出的近似算法进行求解。该方法具有较强的理论基础,且具有较快的计算速度,因此该方法有一定的实际工程应用前景。

### 2.2.2 以慢同调理论为基础并结合图分解及图搜索技术的最优孤岛划分

慢同调理论的建立基于以下思想:系统中各发电机的振荡存在快-慢速模,电气联系相对弱的发电机群之间由于相对惯性比较大,群之间以相对慢的频率摇摆振荡,各自群内发电机之间的电气联系相对紧密,以较快的振荡频率进行相对摇摆振荡;而系统失稳往往发生在一群发电机相对于另一群发电机加速而失去同步时。故可以基于慢同调分析来辨识出复杂电力系统网络之间的弱连接界面。而弱连接界面正是寻求系统间净交换功率最小的孤岛界面问题的重要候选界面之一。由于连接各个慢同调机群的网络界面是很多的,如何确定最佳孤岛界面,研究人员提出了不少很有特点的方法和策略。

文献[42]采用搜索方法在连接同调发电机群的

联络网络中搜索所有候选孤岛界面,从中选取净交换功率最小者作为最佳孤岛界面。该文以电气距离最靠近某一给定同调机群区域边界的节点作为搜索起始节点,朝向另一同调机群方向搜索到它的边界(即相应另一给定同调机群区域边界),其间所遍历过的支路和节点即为该给定同调机群及相应另一同调机群之间的联络网络。由于联络网络的确定及联络网络中的最优割集的搜索基本上还只是基于穷举法,故对于实际大系统而言,该算法的计算量比较大。针对文献[42]的不足,文献[43]提出了一种改进搜索方法。该文在利用慢同调理论完成机组分群的基础上,利用斯坦纳树方法将各同调机群分别相连形成多个供电区域;然后,找到剩余非发电机节点到各个供电区域的电气距离最短路径。如果某个非发电机节点到各个供电区域的最短路径都要通过一个供电区域,则将此非发电机节点归入这个供电区域。经过这个过程之后尚未分配到任何供电区域的剩余非发电机节点将构成最终的待搜索区域;利用广度优先结合深度优先的改进搜索算法从待搜索区域找到所有孤岛划分界面。最后,从所有孤岛界面中选择最符合孤岛准则者作为电网孤岛断面而将系统分成多个电力孤岛。可以看出,该方法相对于文献[42]的方法在搜索效率上相对有所提高,但最优割集的搜索依然基于穷举搜索思路,当网络的规模较大、结构复杂时计算量仍偏大。

文献[44]指出因为可行孤岛断面必然位于异步机群之间,在最优孤岛控制的各类约束中,对可行解空间分布起关键作用的是分离/同调约束。所以该文首先基于“慢同调”理论中的广义特征值及特征向量的计算而识别出潜在的机组振荡模式,进而计算振荡模式对于节点的灵敏度,依据灵敏度大小将网络中的所有非发电机节点进行分组,而没有明确归属的非发电机节点将构成同调区域之间的弱连接区域。对于所得到的弱连接区域,再利用 OBDD 方法进一步搜索而得到最佳的孤岛界面。与原系统网络相比,弱连接区域要小得多,因此,该方法的决策空间规模显著减小,计算速度也明显提高。利用与文献[44]类似的方法,文献[45]首先计算描述系统动态特性的微分代数方程组的广义特征值及特征向量;然后,利用 Krylov 子空间(Krylov subspace)方法根据各个节点对于特定模式的参与度(基于灵敏度计算所得)在辨识出同调机群的同时也一次性地辨识出系统中的弱连接区域网络;利用基于最小生成树思想的深度优先搜索方法在弱连接区域网络中寻找满足净交换功率最小的割集作为最优孤岛断面。文献[42-45]都通过分析节点归属判断弱连接

区域,而文献[46]则通过分析线路对慢同调模式的影响程度从另一个角度给出了弱连接区域的辨识方法。该文以电力系统非结构保留模型为基础,对电力系统慢同调模式特征值进行解析,进而得到如下结论:连接各同调区域之间的线路对于系统慢同调模式的影响较之位于同调区域内部的线路更大。然后,把此结论推广到结构保留模型,先算出慢同调模式特征值,然后计算所有线路对于慢同调模式特征值的灵敏度,然后取灵敏度最大的一组线路作为弱连接界面。

文献[47]提出基于改进的 Laplace 分区方法得到解列方案,首先,利用慢同调分区来辨识系统中振荡模式相近的发电机组,并将其聚合成若干虚拟的发电机节点,简化网络结构;然后,利用 Laplace 分区方法得到的分区割集,通过在分区割集邻域进行启发式搜索得到功率差额最小的分区方案。

文献[48-49]将聚类方法应用到孤岛划分,文献[48]提出了一种综合考虑解列面和解列时机的解列方案。在解列断面搜索方面,首先利用慢同调理论在离线情况下对系统进行预分区和网络化简;结合故障信息和预分区结果,利用基于慢同调理论的平均数充分性识别方法获取严重故障后具体的发电机分群模式;定义电网中节点间拓扑距离,应用  $K$ -Medoids 聚类方法搜索满足孤岛功率平衡约束的解列面。文献[49]提出一种基于归一化谱聚类和约束谱聚类的两阶段最优孤岛方法:第一阶段中,利用归一化谱聚类来识别同调机群,并利用这些同调机群形成成对约束;第二阶段则使用约束谱聚类来寻找满足成对约束、具有最小有功潮流冲击(即为孤岛断面上交换功率的绝对值之和最小)的孤岛断面。当系统需要被划分为多个孤岛时,使用递归二分法实现。该文提出了以孤岛断面上交换功率的绝对值之和最小为最优孤岛目标,相对于以净交换功率最小为目标的最优孤岛而言,问题复杂程度降低,即把一个 NP 完全问题转化为一个多项式界问题。然而这一策略与以孤岛断面净交换功率最小为目标的孤岛策略相比,哪一种更有利于孤岛系统的稳定,更有助于降低电网故障造成的负荷损失,还有待进一步研究比较。

以上孤岛划分方法所依赖的慢同调机组分群理论,是通过将发电机动态方程线性化之后的线性系统特征值及特征向量的分析而得到相应的机组分群。它具有以下特点:对于既定系统结构,相关机群的分组与故障地点及类型无关,也与电机模型的详细程度无关。该特点既可以说是该类机组分群方法的优点,即可以根据既定网络,在正常运行点处对系

统线性化之后进行相应的特征值及特征向量计算,根据所要分群的个数按机组的参与度而离线确定分群,然后在线使用,具有使用方便和快速的优点;但同时,也是该类机组分群方法的缺点,因为系统本身是非线性的,且结构复杂,系统的运行点变化频繁,如果各机群之间所被激发的振荡模式与离线分析不一致,则利用慢同调理论得到的系统分群往往不准确。文献[42-46]所采用的慢同调模式都仅根据对故障前某个特定运行点的线性化而得到相应机组的分群及相应的孤岛断面,然后推广应用于任何系统结构及故障模式。显然,当故障地点及方式与该特定运行点差异比较大时,相应的同调机群分组及弱连接界面也会有很大的差异。为了克服同调分群只是基于某一运行点所得,当实际系统运行点及系统条件与该运行点情况差别比较大时,相应同调辨识结果不准的缺点,文献[50]采用延拓法追踪系统条件发生变化时慢速模机组同调指标轨迹,在新的系统条件下,无需重新计算雅可比矩阵及相关特征值和特征向量,而只需依据参数的变化对同调分群进行适当的修正即可得到对应新的运行条件下的同调分群。相应地,该技术可同样应用于文献[42-46]所提出的孤岛划分方法,而得到随着系统结构及运行条件发生变化时的孤岛方案的相应调整方法。应该说该方法为慢同调理论的工程实用化作出了重要贡献;但该方法还只能处理负荷参数的变化(即连续参数的变化),当网络结构发生变化时(即离散参数发生变化时),如何快速分析系统慢同调模式的变化及进行同调修正是该方法需要进一步解决的问题。

上述同调机群分析方法以线性化模型为基础,通过求解系数矩阵的特征值及特征向量来辨识相应的模态,根据各个发电机对于特定模态的参与度来辨识同调机群的方法,其计算量往往比较大,难以在线实现。文献[51]利用由广域测量系统(WAMS)量测得到的类噪声信号,以随机子空间方法为基础,引入参考通道技术和稳定图自动识别算法,提出一种能够保证准确度且计算效率较高的系统低频机电振荡模式及其对应模态的新颖识别方法,为在线实现同调机群辨识提供了有效的解决思路。

### 2.2.3 其他方法实现基本图分解,然后结合图搜索技术实现最优孤岛划分

除了上述两比较有代表性的方法之外,研究人员还提出了许多很有特点的最优孤岛断面搜索方法。

文献[52]根据国内电力系统分层分区管理的特点(位于不同区域的子网络往往通过长距离输电线相连,使得同一地区的发电机具有类似的动态特

性),将同一地理分区内的发电机视为同调机群,进而把系统分成多个以同调发电机群节点为核心节点,非发电机节点作为外层节点的多个子区域。然后,根据故障后的失稳模式将这些子区域分成失稳区和剩余区,通过调整这两部分区域边界上的负荷归属使所有电力孤岛尽可能满足功率平衡要求,而得到相应孤岛策略。该算法具有搜索空间小和计算速度快的特点。文献[53]提出了基于潮流追踪算法实现非发电机节点归属分配的网络最佳孤岛策略。该方法的基本思路是基于潮流追踪算法得到各发电机节点与负荷节点的有功分配关系,将各个负荷归属于向其供电最多的发电机,然后依据机组分群信息(另外确定),属于不同分群的发电机连同其各自所属负荷节点自然形成了不同分区,不同分区之间的界面就形成了初始孤岛界面;进而对初始断面附近的负荷节点归属进行适当的调整,使得各个子系统有功出力与负荷的失配量尽可能小,而得到最终孤岛断面。文献[54]把扩展等面积准则(extended equal-area criterion, EEAC)方法与基于 OBDD 的孤岛方法相结合,先用 EEAC 在线判断对于既定的故障系统是否失稳,若系统失稳,则采用基于 OBDD 的孤岛搜索方法而给出相应的孤岛划分策略。该文给出了在线进行系统最优孤岛的一体化框架结构。文献[55]提出一种结合代数方法和图论技术的电力系统多线路开断情况下的孤岛检测策略。该方法通过建立最小割集和多线路开断的功率传输分配表之间一一对应的关系,快速地确定任何线路组合的开断是否导致了孤岛出现,若没有导致孤岛,再开断哪些线路可导致孤岛运行。该方法具有较强的理论支撑,虽然目前只应用于电力系统孤岛检测,但对最优孤岛断面的搜索也具有很好的启发意义,若与系统最优孤岛策略的相应约束及要求相结合,有望得到有效的孤岛划分新策略。

## 3 智能电网最优孤岛划分研究的发展趋势及亟待解决的问题

从前文的评述可以看出,不管是输电网还是配电网,其最优孤岛划分研究均已受到不少研究人员的重视,并取得了可喜的研究成果。但应该说,其总体研究成果仍有待深化和拓展。笔者认为以下几个方面迫切需进一步深入研究和开拓,使得最优孤岛划分方法的研究提升到一个新的高度,并实现工程实用化。

对于配电网,由于实际配电系统往往结构复杂,分布式电源分布不均且数量庞大,含 DG 的配电系统孤岛划分问题其实是一个 NP 难题<sup>[15]</sup>。从方法

学而言,文献[13-16]等所提出的方法均属于“搜索+调整”思路,是考虑到问题的复杂性和实际工程对计算时间的要求所采取的简化求解策略。对于其中的搜索问题,可以通过改进相应图论算法而进一步改善其计算速度和计算精度。而调整过程中的优化问题,是一个多变量的优化调度问题,需进一步采取先进优化技术或理论加以解决。并且从问题的本质来看,应当把搜索和调整两个步骤更紧密地结合在一起求解,从而得到更为优化的电力孤岛划分方案。再者,基于考虑问题的侧重点,当前各种方法的模型所计及的因素并不全面,均没有考虑配电系统中联络开关的作用;如果在模型中计及联络开关,配电系统中部分负荷的供电方式将有多种选择,现有基于放射性树结构的求解策略将无法直接使用,需研究在此情况下的相应有效求解策略。

对于输电网孤岛划分,以下问题有必要进一步深化研究。

#### 1)完善和实用化最优主动解列算法

从前述的大量最优孤岛划分的研究成果中不难看到,利用图论相关理论求解大电网最优孤岛问题已经成为研究的主流和趋势。其主要原因是最优孤岛断面的搜索问题可以通过对图论中一些典型问题,如最小割问题和图分割问题的扩展进行很好的描述和求解。但是,迄今为止,以各孤岛功率差额最小为目标的输电网孤岛中所抽象出的图论问题并未见诸报道,用于搜索孤岛断面的策略多为典型图分割方法与简单启发式规则的结合,问题的复杂性往往是NP难题,如何提高其计算速度,需要进一步研究和探索。再者,当前的图分解方法往往无法保证连通性,均需要进行人工干预才能使连通约束和同调约束得到满足,导致结果最优性无法保证,最多是次优或次次优,如何减少人工干预而保证解的最优性也是需要深入研究和探索的问题。

#### 2)完善和实用化最优主动解列模型

当前绝大多数电力孤岛的划分均是基于同调约束、连通约束以及功率平衡约束,此3种约束应该说还只是最优孤岛所需满足的基本约束,它们保证了所形成的孤岛子系统的暂态稳定性和系统的静态安全性。当前的方法并没更多地计及动态稳定性、电压稳定性、无功功率平衡等方面的约束。而这些约束也是保证孤岛子系统能否安全稳定运行的重要约束,因此也很有必要进一步研究如何计及这些约束,使得最后所得到的所有电力孤岛子系统能够真正地安全稳定运行。

#### 3)解列时机判定策略研究

为了防止系统大面积停电,主动解列的实施时

机同样关键。若时机把握不好,主动解列的实施可能适得其反或效果不好。在线的主动解列时机选择建立在准确而迅速的暂态稳定性判别的基础上,因此基于决策树等方法的解列时机判定方法的研究有待深入<sup>[56]</sup>。

#### 4)广域信息的利用

作为未来广域系统保护的重要组成部分,主动解列成功发挥效用的关键在于相量测量单元(PMU)/WAMS信息的有效利用<sup>[57]</sup>。如何基于广域信息而正确且快速地获得相关的系统解列决策,是一个前景广阔的研究方向。

## 4 结语

实施主动电力孤岛措施,对于智能输电网及智能配电网的建设而言,均是提高其安全稳定运行水平及供电可靠性的重要措施。该问题是智能调度领域中待解决的关键问题之一,已逐渐受到工程及科研人员的重视。本文在论述智能电网最优孤岛划分问题所要考虑的相关影响因素之后,对该领域国内外相关研究成果进行了全面分析和分类,指出了各种及各类方法的基本内容、优缺点及关键问题;进而阐述了该问题的发展趋势及亟待解决的问题,为该领域问题的进一步研究奠定了一定的基础。

随着智能电网最优孤岛划分研究的深入及方法的成熟,必将推动智能调度及管理技术的发展和提升。因各种故障所导致的大面积停电或供电中断,尽管不可避免,但在最优孤岛技术的帮助下其风险必将明显降低。从而使得电网的安全性、稳定性及供电可靠性提升到一个新的高度。

## 参考文献

- [1] LI H, ROSENWALD G W, JUNG J, et al. Strategic power infrastructure defense [J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 918-933.
- [2] IEEE 1547 Standard for interconnecting distributed resources with electric power systems[S]. 2003.
- [3] 何禹清,彭建春,孙芊.考虑风电能量随机性的配电网可靠性快速评估[J].中国电机工程学报,2010,30(13):16-22.  
HE Yuqing, PENG Jianchun, SUN Qian. Fast algorithm for distribution system reliability evaluation considering the random energy output of wind power generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 16-22.
- [4] NIGIM K A, HEGEZY Y G. Intention islanding of distributed generation for reliability enhancement [C]// IEEE Power Engineering Society General Meeting, July 13-17, 2003, Toronto, Canada: 208-213.
- [5] WANG Guoquan, LIU Zongqi, LIU Nian, et al. Reliability evaluation of distribution system with distribution generation

- based on islanding algorithm [C]// Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, April 6-9, 2008, Nanjing, China; 2697-2700.
- [6] WANG P, BILLINTON R. Time-sequential simulation technique for rural distribution system reliability cost/worth evaluation including wind generation as alternative supply[J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2001, 148(4): 355-360.
- [7] GUINDO M, WANG Chengshan. Reliability analysis on the integration of wind/PV hybrid distributed generation in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems (in Chinese), 2005, 29(23): 33-38.
- [8] DUTTAGUPTA S S, SINGH C. A reliability assessment methodology for distribution system with distributed generation [C]// IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 8-22, 2006, Montreal, Canada; 7p.
- [9] 王旭东,林济铿.基于网络化简的含分布式电源的配电网可靠性分析[J].电力系统自动化,2010,34(4):38-43.  
WANG Xudong, LIN Jikeng. Reliability evaluation based on network simplification for the distribution system with distributed generation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(4): 38-43.
- [10] CALDON R, STOCCO A, TURRI R. Feasible of adaptive intentional islanding operation of electric utility systems with distributed generation[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(12): 2017-2023.
- [11] 易新,陆于平.分布式发电条件下的配电网孤岛划分算法[J].电网技术,2006,30(7):49-54.  
YI Xin, LU Yuping. Islanding algorithm of distribution networks with distributed generators [J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 49-54.
- [12] 丁磊,潘贞存,丛伟.基于有根树的分布式发电孤岛搜索[J].中国电机工程学报,2008,28(25):62-67.  
DING Lei, PAN Zhencun, CONG Wei. Searching for intentional islanding strategies of distributed generation based on rooted tree[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 62-67.
- [13] MAO Yiming, MIU K N. Switch placement to improve system reliability for radial distribution system with distributed generation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(4): 1346-1352.
- [14] WANG Xudong, LIN Jikeng. Island partition of the distribution system with distributed generation [J]. Science China: Technological Sciences, 2010, 53(11): 3061-3071.
- [15] 王旭东,林济铿.基于分支定界的含分布式发电配网孤岛划分[J].中国电机工程学报,2011,31(7):16-20.  
WANG Xudong, LIN Jikeng. Island partition of the distribution system with distributed generation based on branch and bound algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 16-20.
- [16] 董晓峰,陆于平.基于改进 Prim 算法的分布式发电孤岛划分方法[J].电网技术,2010,34(9):195-201.  
DONG Xiaofeng, LU Yuping. Islanding algorithm for distribution generators based on improved Prim algorithm[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 195-201.
- [17] 袁季修.防御大停电的广域保护和紧急控制[M].北京:中国电力出版社,2006.
- [18] 张保会,张毅刚,刘海涛.基于本地量的大振荡解列装置原理研究[J].中国电机工程学报,2001,21(12):67-72.  
ZHANG Baohui, ZHANG Yigang, LIU Haitao. Study on principle of power system separation device based on local electrical parameter [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 67-72.
- [19] 张保会.加强继电保护与紧急控制系统的研究提高互联电网安全防御能力[J].中国电机工程学报,2004,24(7):1-6.  
ZHANG Baohui. Strengthen the protection relay and urgency control systems to improve the capability of security in the interconnected power network [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 1-6.
- [20] 王达,薛禹胜,刘玉田,等.故障解列与失步解列的协调优化[J].电力系统自动化,2009,33(14):1-7.  
WANG Da, XUE Yusheng, LIU Yutian, et al. Coordinated optimization of outage separation and out-of-step separation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 1-7.
- [21] 高鹏,王健全,甘德强,等.电力系统失步解列综述[J].电力系统自动化,2005,29(19):90-96.  
GAO Peng, WANG Jianquan, GAN Deqiang, et al. Review on power system out-of-step separation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 90-96.
- [22] ARCHER B A, DAVIES J B. System islanding considerations for improving power system restoration at Manitoba Hydro [C]// IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, May 12-15, 2002, Winnipeg, Manitoba, Canada: 60-65.
- [23] RAJAMANI K, HAMBARDE U K. Islanding and load shedding schemes for captive power plants[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(3): 805-809.
- [24] AGEMATSU S, IMAI S, TSUKUI R, et al. Islanding protection system with active and reactive power balancing control for Tokyo metropolitan power system and actual operational experiences[C]// Seventh International Conference on Developments in Power System Protection, April 9-12, 2001, Amsterdam, the Netherlands; 351-354.
- [25] 薛禹胜.综合防御由偶然事故演化为电力灾害——北美“8·14”大停电的警示[J].电力系统自动化,2003,27(18):1-5.  
XUE Yusheng. The way from a simple contingency to system-wide disaster—lessons from the eastern interconnection blackout in 2003 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 1-5.
- [26] 胡学浩.美加联合电网大面积停电事故的反思和启示[J].电网

- 技术, 2003, 27(9): 2-6.
- HU Xuehao. Rethinking and enlightenment of large scope blackout in interconnected North America power grid [J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 2-6.
- [27] SUN Kai, ZHENG Dazhong, LU Qiang. Splitting strategies for islanding operation of large-scale power systems using OBDD-based methods [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 912-923.
- [28] ZHAO Qianchuan, SUN Kai, ZHENG Dazhong, et al. A study of system splitting strategies for island operation of power system; a two-phase method based on OBDDs [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(4): 1556-1565.
- [29] SUN Kai, ZHENG Dazhong, LU Qiang. A simulation study of OBDD-based proper splitting strategies for power systems under consideration of transient stability [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(1): 1151-1159.
- [30] SUN K, ZHENG D Z, LU Q. Searching for feasible splitting strategies of controlled system islanding [J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(1): 89-98.
- [31] PEIRAVI A, ILDARABADI R. A fast algorithm for intentional islanding of power systems using the multilevel Kernel k-Means approach [J]. Journal of Applied Sciences, 2009, 9(12): 2247-2255.
- [32] PEIRAVI A, ILDARABADI R. Complexities of using graph partitioning in modern scientific problems and application to power system islanding [J]. Journal of American Science, 2009, 5(5): 1-12.
- [33] XU G, VITTAL V. Slow coherency based cutset determination algorithm for large power systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(2): 877-844.
- [34] LI J, LIU C C. Power systems reconfiguration based on multilevel graph partitioning [C]// IEEE Bucharest PowerTech Conference, June 28-July 2, 2009, Bucharest, Romania; 5p.
- [35] LI J, LIU C C, SCHNEIDER K P. Controlled partitioning of power network considering real and reactive power balance [J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2010, 1(3): 261-269.
- [36] SEN A, GHOSH P, VITTAL V, et al. A new min-cut problem with application to electric power network partitioning [J]. European Transactions on Electrical Power, 2009, 19(6): 778-797.
- [37] POTHEN A, SIMON H D, LIOU K P. Partitioning sparse matrixes with eigenvectors of graphs [J]. SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications, 1990, 11(3): 430-452.
- [38] YANG Honghua, WONG D F. Efficient network flow based on min-cut balanced partitioning [C]// IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design, November 6-10, 1994, San Jose, CA, USA; 50-55.
- [39] DHILLON I S, GUAN Y, KULIS B. Weighted graph cuts without eigenvectors; a multilevel approach [J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29(11): 1944-1957.
- [40] 林济铿, 王旭东, 李胜文, 等. 基于含连通图约束的背包问题的图分割方法 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 134-141.
- LIN Jikeng, WANG Xudong, LI Shengwen, et al. Graph partitioning method based on connected graph constrained knapsack problem [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(10): 134-141.
- [41] 林济铿, 李胜文, 王旭东, 等. 电力系统最优孤岛断面搜索模型及算法 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 86-94.
- LIN Jikeng, LI Shengwen, WANG Xudong, et al. Model and algorithm for the optimal controlled partitioning of power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 86-94.
- [42] YOU H, VITTAL V, WANG X. Slow coherency based islanding [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(1): 483-491.
- [43] WANG Xiaoming, VITTAL V. System islanding using minimal cutsets with minimum net flow [C]// IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, October 10-13, 2004, New York, NY, USA; 379-384.
- [44] 乔颖, 沈沉, 卢强. 大电网解列决策空间筛选及快速搜索方法 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 23-28.
- QIAO Ying, SHEN Chen, LU Qiang. Islanding decision space minimization and quick search in case of large-scale grids [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 23-28.
- [45] NAJAFI S, HOSSEINIAN S H, ABEDI M, et al. Proper splitting of interconnected power system [J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2010, 5(2): 211-220.
- [46] 倪敬敏, 沈沉, 李颖, 等. 最优孤岛控制中电网弱连接的一种在线识别方法 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 24-30.
- NI Jingmin, SHEN Chen, LI Ying, et al. An on-line weak-connection identification method for controlled islanding of power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 24-30.
- [47] 宋洪磊, 吴俊勇, 吴林峰. 电力系统紧急情况下的动态分区和自主解列策略 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 224-230.
- SONG Honglei, WU Junyong, WU Linfeng. Dynamic partitioning and active-split strategy in power emergency control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 224-230.
- [48] 胥威汀, 刘俊勇, 李旻, 等. 避免电网连锁解列的全局协调控制策略 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 33-39.
- XU Weiting, LIU Junyong, LI Min, et al. Globally coordinated control for preventing cascading split of power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 33-39.
- [49] DING L, GONZALEZ-LONGATT F M, WALL P, et al. Two-step spectral clustering controlled islanding algorithm [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(1): 75-84.
- [50] WANG X, VITTAL V, HEYDT G T. Tracing generator coherency indices using the continuation method; a novel approach [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(3):

- 1510-1518.
- [51] 倪敬敏,深沉,刘锋.基于改进随机子空间法和稳定图技术的电力系统低频机电振荡特征识别[J].中国科学:技术科学,2012,42(6):686-696.
- NI Jingmin, SHEN Chen, LIU Feng. Estimation of the electromechanical characteristics of power systems based on a revised stochastic subspace method and the stabilization diagram[J]. Scientia Sinica: Technologica, 2012, 42(6): 686-696.
- [52] 刘源祺,刘玉田.基于调度分区的电力系统解列割集搜索算法[J].电力系统自动化,2008,32(11):20-24.
- LIU Yuanqi, LIU Yutian. A searching algorithm for splitting cut-set based on scheduling division[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11): 20-24.
- [53] WANG C G, ZHANG B H, HAO Z G, et al. A novel real-time searching method for power system splitting boundary[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(4): 1902-1909.
- [54] JIN Ming, SIDHU T S, SUN Kai. A new system splitting scheme based on the unified stability control framework[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(1): 433-441.
- [55] GULER T, GROSS G. Detection of island formation and identification of causal factors under multiple line outages[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(2): 483-491.
- [56] SENROY N, HEYDT G T, VITTAL V. Decision tree assisted controlled islanding[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(4): 1790-1797.
- [57] 薛禹胜,雷兴,薛峰,等.关于电力系统广域保护的评述[J].高电压技术,2012,38(3):513-520.
- XUE Yusheng, LEI Xing, XUE Feng, et al. Review on wide area protection of electric power systems[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 513-520.
- 
- 王旭东(1985—),男,博士,工程师,主要研究方向:电力系统稳定性分析及控制、智能电网等。
- 林济铿(1967—),男,通信作者,博士,教授,主要研究方向:电力系统稳定性分析及控制、智能电网等。E-mail: mejklyn@126.com
- 李胜文(1986—),男,硕士,主要研究方向:电力系统仿真和控制。

(编辑 蔡静雯)

## Review of Research on Island Partitioning in Power Grid

WANG Xudong<sup>1</sup>, LIN Jikeng<sup>2</sup>, LI Shengwen<sup>3</sup>, ZHENG Weihong<sup>4</sup>

1. Electric Power Research Institute of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300384, China;
2. School of Electronics and Information, Tongji University, Shanghai 201804, China;
3. Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030001, China;
4. Dispatching and Control Center of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China)

**Abstract:** Islanding operation is a special operation mode in the smart grid. For a power transmission system, if a connected system is split into several stable islanding sub-systems in time in the optimal islanding operation mode in case of extreme emergency, not only will enormous losses due to large area blackout or even system collapse caused by the spread of the local fault be avoided, but the amount of load shedding and generator tripping might be minimized as well. For a distributed system with distributed generator (DG), optimum islanding operation can bring the potential of DG into full play, while improving the reliability of power supply. The influencing factors of the optimal island partitioning in the smart grid are summed up and all the relevant methods and strategies available at home and abroad are thoroughly analyzed and classified. And the advantages and disadvantages along with key issues of each method are also discussed. Finally, the development tendency and the problems demanding prompt solution are treated.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177107).

**Key words:** optimal island partitioning; smart grid; distributed system; distributed generator (DG)