

# 电网自适应解列方案中孤岛静态工作点校验方法

罗 钢<sup>1</sup>, 方诗卉<sup>2</sup>, 沈 沉<sup>2</sup>, 唐可翱<sup>2</sup>, 梅生伟<sup>2</sup>, 钱 峰<sup>1</sup>, 李 力<sup>1</sup>

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心大电网安全稳定分析与控制实验室, 广东 广州 510600;  
2. 清华大学电机系, 北京 100084)

**摘要:**解列控制是电力系统第三道防线的重要手段。本文遵循自适应解列中的“搜索+检验”决策思路,针对待检验孤岛灵活多变,孤岛运行工况变化大,潮流计算初值难以给定的困难,基于LM算法设计了一种解列后孤岛静态工作点验证新方法,提高了验证方法的快速性和准确性。本文从满足同步约束和功率平衡约束的已知解列断面出发,首先探究如何快速地形成孤岛潮流模型,然后引入自适应LM算法进行孤岛潮流计算,判断解列后的孤岛是否存在静态工作点;并针对不存在静态工作点的孤岛,提出了相应的孤岛潮流调整辅助信息。最后,采用实际算例介绍了本文方法的基本过程,验证了方法的可行性。

**关键词:** 自适应解列; 孤岛潮流模型; 孤岛潮流计算; 自适应LM算法

**DOI:** 10.12067/ATEEE1710037

**文章编号:** 1003-3076(2018)04-0001-08

**中图分类号:** TM74

## 1 引言

随着直流工程的相继投产,我国电网正逐步进入交直流混联时代<sup>[1,2]</sup>。随着电网中大规模风电、光伏等新能源并入电网,由于新能源出力存在着不确定性和随机性,将对系统安全稳定运行带来一定的影响<sup>[3-5]</sup>。《电力系统安全稳定导则》<sup>[6]</sup>提出保障电力系统安全稳定的三道防线,解列是电力系统在遭受巨大的外界干扰而无法保证系统完整性时采取的一种极端控制措施。解列作为电力系统安全稳定最后一道防线的重要手段,得到了广泛的关注和研究<sup>[7,8]</sup>。

传统的失步解列存在着“固定地点安装的解列装置难以随着振荡中心转移而改变,使得其无法发挥作用”、“固定不变的解列断面无法适应失步模式的变化”等问题<sup>[9]</sup>。因此,有学者提出了自适应的主动解列(简称自适应解列)方案<sup>[9-12]</sup>。电网的自适应解列是对系统全面的监控,在发生大的干扰时,通过在线决策和在线计算对系统进行集中控制的解列方式。

自适应解列需要回答“是否解”、“在哪解”和“如何解”的问题。因此,自适应解列控制系统应该包含解列控制实施前提判断、解列断面的快速搜索和实施解列策略这三方面功能<sup>[10-12]</sup>。

解列后形成的孤岛应当满足一些基本的约束条件,如:①同步约束;②功率平衡约束;③存在静态工作点;④暂态稳定约束;⑤易于恢复等。为此,许多学者提出了“搜索+检验”的解列方案求解思路<sup>[11-15]</sup>,将求解最优解列断面的问题转化为求可行断面的问题,降低了问题的复杂度,提高了解列断面的求解效率。在搜索阶段中,先根据部分易于简单描述的基本约束(一般是同步约束和功率平衡约束)将初始策略空间缩小为规模较小的策略子空间。在检验阶段中,用枚举法对策略子空间里的所有策略逐个进行校验,如果某个候选策略使解列后的孤岛能够满足电力系统稳定运行的其他基本约束,则认为其是可行策略。

校验过程主要是通过潮流计算以及时域仿真等方法找到满足复杂约束(如存在静态工作点、暂态稳定)的可行解<sup>[16,17]</sup>,其难点在于如何减少校验计

**收稿日期:** 2017-10-25

**基金项目:** 广东电网有限责任公司科技项目(K-GD2014-198)

**作者简介:** 罗 钢(1987-),男,四川籍,工程师,博士,主要从事电力系统运行、分析与控制等方面的工作;

沈 沉(1970-),男,浙江籍,教授,博导,主要研究方向为电力系统分析与控制、新能源及微电网技术等(通讯作者)。

算的单位开销。提高校验阶段找到可行解速度的方法主要有两种:①在搜索阶段通过更多的约束条件尽量地缩小可行解空间;②使用高效准确的潮流计算方法和暂态仿真算法。

本文研究的重点是如何快速校验解列后的孤岛是否存在静态工作点。从数学上看,就是检验孤岛是否存在潮流解。为此,需要解决两个问题:一是如何高效地建立孤岛潮流模型,二是如何快速计算孤岛潮流。构建孤岛潮流模型一般需要处理好以下三个细节:①根据已知的断面信息快速建立孤岛潮流模型;②为未设置平衡机的孤岛自动设置平衡机;③对含有直流落点的孤岛建立直流系统潮流模型。对于快速计算孤岛潮流,关键是要采用高效鲁棒的潮流算法,避免对初值过于敏感,最好还能在孤岛潮流不收敛的情况下提供有助于收敛的系统调整信息。

文献[18,19]在验证静态稳定约束时,直接进行断面潮流过载检验,从而加快了验证静态稳定约束的速度。校验方法是对已经满足同步约束和功率平衡约束的解列策略的孤岛进行直流潮流计算,通过判断求得的孤岛内每条线路传输潮流  $P_i$  是否超过其传输极限  $PSL_{ij}$  来判断解列策略的可行性。此外,传统的潮流计算方法,如牛拉法、PQ 分解法等,可以用于静态工作点存在性的判断。但现有的技术存在以下四方面的局限性:

(1)直流潮流计算方法无法判断潮流是否存在静态工作点。

(2)直流潮流计算方法在确定解列策略不可行后,无法精确判断哪个孤岛不存在静态工作点。

(3)牛拉法和 PQ 分解法的收敛性对初值和迭代中的雅克比矩阵都有较高的要求。此外,PQ 分解法存在假设前提,复杂的电网不一定能满足这些条件。

(4)牛拉法和 PQ 分解法在判断各个孤岛静态工作点的存在性时,需要将各个孤岛从整个电网中分离出来建立潮流模型,并分别进行潮流计算。而将各个孤岛从整个电网分离出来建立潮流模型的工作量是比较大的。

本文为了在校验阶段提高判断静态工作点的快速性和准确性,针对前面提到的问题,开展了以下几方面的工作:①直接从解列前整个系统的潮流模型出发,利用断面信息对其进行修正,快速形成孤岛潮流模型;②提出了基于自适应 Levenberg-Marquardt (LM)算法的孤岛潮流计算方法,可以在潮流收敛的

情况下给出孤岛的潮流解,在潮流不收敛的情况下进行无静态工作点的孤岛识别,并给出相应的孤岛潮流调整辅助信息。

## 2 基于解列方案的孤岛潮流模型

### 2.1 基于断面信息的导纳矩阵修正

通过搜索阶段的计算,可以得到一系列满足同步约束和功率平衡约束的候选解列断面,即一系列需要断开的线路。这些线路断开之后整个电网将被分成若干个孤岛。如果针对每一个解列断面信息,都重新对解列后的电网形成节点导纳矩阵,进而构建孤岛潮流模型将带来极大的工作量。因此我们从已生成的未解列前的导纳矩阵出发,根据解列断面信息对其进行修正之后直接形成新的节点导纳矩阵。

一般情况下,对于  $m$  个独立节点的网络,可以列写  $m$  个节点电压方程:

$$\begin{bmatrix} Y_{1,1} & Y_{1,2} & \cdots & Y_{1,m-1} & Y_{1,m} \\ Y_{2,1} & Y_{2,2} & \cdots & Y_{2,m-1} & Y_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ Y_{m-1,1} & Y_{m-1,2} & \cdots & Y_{m-1,m-1} & Y_{m-1,m} \\ Y_{m,1} & Y_{m,2} & \cdots & Y_{m,m-1} & Y_{m,m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_{m-1} \\ V_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{m-1} \\ I_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

即

$$YV = I \quad (2)$$

式中, $Y$ 为节点导纳矩阵; $Y_{ii}$ 为节点  $i$  的自导纳,其值等于接于节点  $i$  的所有支路导纳之和; $Y_{ij}$ 为节点  $i$  和  $j$  之间的互导纳,它等于直接联接于节点  $i$  和  $j$  间的支路导纳的负值; $V$ 为节点电压的列向量,是相对于参考节点而言的; $I$ 为节点电流的列向量。

对于  $Y$  矩阵而言,当节点  $i$  与节点  $j$  之间的线路断开时,节点导纳矩阵  $Y$  需要做出如下修改:

$$\begin{cases} Y_{ij(\text{now})} = 0 \\ Y_{ji(\text{now})} = 0 \\ Y_{ii(\text{now})} = Y_{ii(\text{before})} - Y_{ij(\text{before})} \\ Y_{jj(\text{now})} = Y_{jj(\text{before})} - Y_{ji(\text{before})} \end{cases} \quad (3)$$

式中,下标 before、now 分别代表修改前后的相应变量。

因此,当已知满足同步约束和功率平衡约束的解列断面信息时,只需要在节点导纳矩阵中找到和断线位置相关的元素并进行修改,即可大大提高计算的效率。

## 2.2 孤岛潮流模型的平衡机设置

### 2.2.1 孤岛信息的获取

当对系统中的设备及线路进行编号之后,可以通过网络拓扑识别来分析系统拓扑的连接情况。常用的网络拓扑识别方法主要有邻接矩阵法和树搜索法等<sup>[20]</sup>。

通过对比可知,树搜索法中的广度优先搜索法速度更快,更适合于拥有上万节点的大规模电网。为此,针对具有  $n$  个节点的电网,可构造如下判断孤岛信息的操作步骤:

(1) 访问起始节点  $i_0$ 。

(2) 由节点  $i_0$  出发,一次访问  $i_0$  的各个未曾被访问过的邻接节点  $i_1, i_2, \dots, i_t$ 。

(3) 再顺序访问节点  $i_1, i_2, \dots, i_t$  的所有未被访问过的邻接节点  $i_{t+1}, i_{t+2}, \dots, i_v$ 。

(4) 从步骤(3)中未访问过的节点  $i_{t+1}, i_{t+2}, \dots, i_v$  出发,再访问它们的还没有被访问过的邻接节点。

(5) 如此进行,直到该孤岛上的所有节点都被访问到为止。

(6) 判断所有已知的孤岛是否包含电网的全部节点。如若是,则结束访问;反之,则从未包含在孤岛中的节点出发返回步骤(2),直至判断出所有已知的孤岛包含电网的全部节点为止。

### 2.2.2 孤岛平衡机设置

电网在执行解列之后将形成若干个孤岛,有些孤岛会出现缺少平衡机的情况,因此需要在潮流计算之前为缺少平衡机的孤岛自动设置平衡机。由于已经通过树搜索法中的广度优先搜索法得到每个孤岛信息,因此可以根据孤岛信息找出缺少平衡机的孤岛,然后根据孤岛中的各个发电机节点的容量信息找出发电机容量最大的节点,并将其设置为平衡节点。

## 2.3 直流系统在潮流中的建模

电网处于稳定状态时,直流量触发角  $\alpha$ 、熄弧角  $\gamma$ 、直流电压  $U_d$  和直流电流  $I_d$  基本保持恒定值,则交直流交换功率  $S$  也基本保持不变。本文对直流系统进行最简单的处理,即将直流系统等效为恒功率注入交流系统。

## 3 基于自适应 LM 算法的孤岛潮流计算

本文引入了自适应 LM 算法计算孤岛潮流,进而对孤岛静态工作点的存在性进行判断,分析解列方案的可行性。对于不可行的解列方案,判断出不

存在静态工作点的孤岛,并给出了相应的潮流调整方向。

### 3.1 自适应 LM 算法的引入与改进

#### 3.1.1 自适应 LM 算法的引入

设系统满足的潮流方程为:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (4)$$

式中,  $\mathbf{x} = [\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}]$ , 为状态变量。

当潮流方程不满足时,  $\mathbf{F}(\mathbf{x})$  为潮流偏差向量。传统的潮流计算方法(牛顿法和 PQ 分解法)会出现由于迭代初值与实际潮流解距离过远而得不到收敛的潮流解,而非潮流本身无解的情况。本文引入的自适应 LM 算法很好地降低了算法收敛性对迭代初值  $\mathbf{x}_0$  的敏感性。

自适应 LM 算法将潮流方程的求解问题转化为如式(5)所示的最小二乘优化问题,并在目标函数中引入了带拉格朗日乘子(阻尼因子)  $\lambda$  的步长约束项:

$$\min \mathbf{G}_{\text{LM}}(\mathbf{x}) = \mathbf{F}(\mathbf{x})^T \mathbf{F}(\mathbf{x}) + \lambda (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)^T (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \quad (5)$$

当迭代初值距离实际潮流解距离远时,应选取较大的  $\lambda$ ,使得迭代解快速靠近潮流解,从而提高算法的收敛范围。随着  $\mathbf{x}_0$  接近潮流解,阻尼因子应随之越来越小,以获取较快的收敛速度,此时的自适应 LM 算法拥有牛拉法的优点<sup>[21,22]</sup>。

自适应 LM 算法可以求得良态潮流的精确解,当潮流无解时可以给出最小二乘解。在极坐标的情况下,  $\mathbf{F}(\mathbf{x})$  包含 PV 节点的有功偏差、PQ 节点的有功与无功偏差,此时自适应 LM 算法的目标函数为电网节点功率偏差平方和的最小二乘解。根据孤岛信息易于提取各个孤岛上节点的功率偏差平方和,从而避免了在判断各个孤岛静态工作点的存在性时,需将各个孤岛从整个电网中分离出来重新建立潮流模型并分别进行潮流计算的繁琐过程。

本文引入的自适应 LM 算法,相较于传统的潮流计算方法(牛拉法和 PQ 分解法),提高了潮流计算的收敛性,并给出电网节点功率偏差平方和的最小二乘解用于后续进行孤岛静态工作点存在性判断、无静态工作点的孤岛识别方法以及相应的孤岛潮流调整辅助信息。

#### 3.1.2 自适应 LM 算法的改进

自适应 LM 算法需要根据实际情况,针对电压控制节点(压控节点)的调节特性以及节点是否具有功率调节能力,做出相应的改进。



### (1) PV-PQ 节点转化逻辑<sup>[23]</sup>

压控节点是通过 PV-PQ 类型的转换来模拟无功注入设备对系统电压控制的一部分节点,如发电机和调相机等。潮流计算中需要识别压控节点的类型,并在潮流计算过程中对其进行正确的模拟。本文针对压控节点,在每一次迭代开始时比较其无功注入计算量是否处于该节点的无功上限值和无功下限值之间,如果越限,则判断该 PV 节点需要转化为 PQ 节点;反之,则节点保持不变。

### (2) 基于节点调节特性的权重矩阵赋值

LM 算法引入权重系数矩阵的最小二乘模型为:

$$\min G_{LM}(\mathbf{x}) = \mathbf{F}(\mathbf{x})^T \mathbf{W} \mathbf{F}(\mathbf{x}) + \lambda (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)^T \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \quad (6)$$

式中,  $\mathbf{W}$  为对角矩阵, 对角元代表各个潮流方程对应的权重系数。可以看出, 权重系数较大的节点, 其潮流方程通过式(6)求解偏差较小, 其物理意义是该点的有功/无功平衡优先满足。考虑到解列后孤岛的潮流分布必然会发生变化, 孤岛中的某些功率可调节节点(如发电机节点, 无功电源节点)需要做出调整, 我们将负荷节点对应的权重系数赋予较大的值(如 100), 发电机节点对应的权重系数赋予较小的值(如 1)。

## 3.2 基于自适应 LM 算法的孤岛静态工作点存在性判断

由 3.1 节的叙述可知, 在自适应 LM 算法中, 无论孤岛是否存在静态工作点, 都会求得节点功率偏差平方和的最小二乘解。当所有孤岛都存在静态工作点时, 目标函数的最小二乘解在大部分情况下会趋近于 0; 当有孤岛不存在静态工作点时, 自适应 LM 算法会给出目标函数的最小二乘解。

基于 LM 目标函数(电网节点功率偏差平方和)的最小二乘解与孤岛潮流静态工作点存在性的关联关系, 本文根据式(6)收敛值的大小判定孤岛是否存在静态工作点。由式(6)的物理意义可知, 如果孤岛存在潮流解, 则式(6)的最小值应为 0。在工程上, 可以事先设定一个很小的正数作为判定孤岛潮流是否有解的阈值(如  $10^{-5}$ ), 当目标函数的最小二乘解小于该阈值时, 说明所有孤岛均存在静态工作点; 当目标函数的最小二乘解大于该阈值时, 说明有孤岛不存在静态工作点。如果对应某个解列方案有孤岛不存在静态工作点, 则说明该方案不可行。

## 3.3 无静态工作点的孤岛识别与潮流调整辅助信息

通过 3.2 节的计算可以判断由某个解列方案生成的孤岛是否存在潮流解。当的确有孤岛不存在静态工作点时, 如果能够精确地定位究竟是哪个孤岛不存在静态工作点, 将对后续工作(如孤岛潮流调整、当前运行方式安排甚至未来网源规划)提供有用的辅助信息。因此, 本节进一步讨论如何得到无静态工作点的孤岛识别方法以及相应的孤岛潮流调整辅助信息。

### 3.3.1 无静态工作点的孤岛识别

由式(6)可知, 当算法收敛后, 存在静态工作点的孤岛其节点功率偏差应该很小, 而不存在静态工作点的孤岛其节点功率偏差应该较大。为此将同一个孤岛上的  $\Delta P_i^2$  和  $\Delta Q_i^2$  归为一类, 将式(6)进行如下变换:

$$\begin{aligned} G(\mathbf{x}) &= \sum_{i=1}^{n_1} (\Delta P_i^2 + \Delta Q_i^2) + \cdots + \sum_{i=1}^{n_k} (\Delta P_i^2 + \Delta Q_i^2) \\ &= \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (\Delta P_i^2 + \Delta Q_i^2) \end{aligned} \quad (7)$$

式中,  $k$  表示解列后的孤岛个数;  $n_j$  表示第  $j$  个孤岛上的节点数;  $\sum_{i=1}^{n_j} (\Delta P_i^2 + \Delta Q_i^2)$ ,  $j \in 1, \dots, k$  表示第  $j$  个孤岛上的节点功率偏差平方和。式(7)满足  $\sum_{j=1}^k n_j = n$  的条件, 表示目标函数仍然包含了全网的信息。

由于目标函数中各个节点的排列顺序不影响自适应 LM 算法的求解, 因此, 先通过自适应 LM 算法对电网进行整体计算, 再根据孤岛信息分离出各个孤岛发电负荷功率偏差平方和的最小二乘解, 并将之与 3.2 节中所设阈值对比, 可以快速识别出不存在静态工作点的孤岛。

### 3.3.2 无静态工作点的孤岛潮流调整辅助信息

当孤岛不存在静态工作点时, 需要采取一定的措施(如切机切负荷、对系统进行无功补偿等)使其回到可行解域。如何利用自适应 LM 算法求得的最小二乘解为不存在静态工作点的孤岛潮流调整提供辅助信息是本节要解决的问题。

因为候选的解列断面已经满足功率平衡约束, 因此, 造成孤岛不存在静态工作点的主要原因是岛内有功/无功电源与负荷的分布不均。通过自适应 LM 算法可以求取目标函数  $G(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n (\Delta P_i^2 + \Delta Q_i^2)$

的最小二乘解,并求得此时各个节点的  $\Delta P_i$  和  $\Delta Q_i$ , 这些数据都可以用于孤岛潮流调整的辅助决策信息。

(1)有功功率的调节

一般来讲,孤岛存在一定的功率调节能力。例如,当孤岛存在直流落点时,直流线路可以参与孤岛的有功调节,当然,调整的幅度应该在直流线路过载能力范围之内。由自适应 LM 算法求得的  $\sum_{i=1}^{n_j} \Delta P_i$  (孤岛发电与负荷有功功率偏差),可以用于判断能否通过直流紧急功率控制使孤岛有功达到平衡。

如果孤岛中存在燃气机组、抽水蓄能电站等具有快速调节能力的发电站,我们也可以采用类似方法让其参与孤岛的紧急功率调节。

(2)无功功率的调节

如果孤岛不存在静态工作点是因为无功分布不均匀造成的,解决方法一般是通过增加电压控制节点或无功电源(将 PQ 节点转化为 PV 节点)使孤岛得到额外的无功补偿。

通过自适应 LM 算法已经求得了各个节点的  $\Delta Q_i$ ,  $|\Delta Q_i|$  最大的节点应该是最需要进行无功补偿的节点。

4 大型交直流混联电网算例分析

4.1 解列后孤岛静态工作点验证方法

综合第 2、3 节的内容,本文提出的电网解列方案中孤岛静态工作点验证方法的流程如图 1 所示。

本文提出的电网解列方案中孤岛静态工作点验证方法如下:

- (1)根据满足同步约束和静态稳定约束的解列断面信息,修正已生成的未解列前的系统节点导纳矩阵,直接形成新的导纳矩阵。
- (2)采用树搜索法中的广度优先搜索法判断孤岛信息。
- (3)在潮流计算之前先为缺少平衡机的孤岛自动设置平衡机。
- (4)若为交直流混联电网,则将直流系统等效为恒功率注入交流系统。
- (5)用改进的自适应 LM 算法计算整个电网的潮流。
- (6)判断各孤岛静态工作点的存在性,并针对不收敛的孤岛给出相应孤岛潮流调整辅助信息。

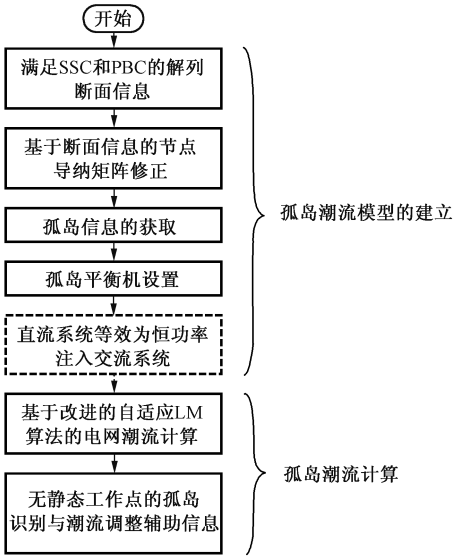


图 1 孤岛静态工作点验证方法的流程图  
Fig.1 Flow chart of static operating point verification for islands formed

4.2 南网交直流混联电网算例分析

南网系统包括广东、广西、海南、云南、贵州这五个省的电力网络,共有 10 ~ 525kV 电压等级节点 11665 个,其中平衡机 2 台(其中 1 台是三峡站 BJZ500 节点作为平衡机,并仅通过直流线路注入广东电网),7 个直流落点。本算例为 2015 年的丰大运行方式算例。

(1)形成孤岛潮流模型

已知的解列断面方案如表 1 所示。

表 1 已知的解列断面方案

Tab.1 Known splitting interface solution		
序号	断线信息	并联回数
1	BEIJIAO-ZENGCHE	1
2	HUADU-DCMUMIA	2
3	BJT-ZENGCHE	1
4	SHAJIAO-ZIJING	2
5	XUNENG2-ZENGCHE	1
6	DCMUMIA-KUWAN	2
7	YUCHENG-DONGPO	2
8	LUODONG-BEIJIAO	1

由已知的解列断面信息出发,修改解列前系统节点导纳矩阵  $Y$  上的对应元素,再将 7 个直流落点转化为 PQ 节点进行处理。

采用树搜索法中的广度优先搜索法判断孤岛信息,判断一共生成了 3 个孤岛。给缺少平衡机的孤岛 A 自动设置平衡机,搜索到孤岛中容量最大的海

门电厂 HAIM1,并将其设为平衡机。

(2)孤岛潮流模型的建立与求解

将所提自适应 LM 算法与 PSD-BPA 潮流计算程序进行对比。首先利用 PSD-BPA 程序计算孤岛潮流,潮流计算不收敛。进一步采用自适应 LM 算法计算整个电网的潮流。在自适应 LM 算法中,加入 PV-PQ 的转换逻辑,并根据节点功率调节特性对权重矩阵  $\mathbf{W}$  进行赋值,为负荷节点对应的权重系数赋值 100,发电机节点对应的权重系数赋值为 1。

将判断潮流是否存在静态工作点的阈值  $\varepsilon$  设定为  $10^{-5}$ 。用自适应 LM 算法对整个网络进行潮流计算,求得整体目标函数的最小二乘解为 36.36pu,因为其远大于  $\varepsilon$  则说明在这个解列方案下有孤岛不存在静态工作点。

(3)无静态工作点的孤岛识别

利用孤岛信息将各个孤岛发电负荷功率偏差平方和的最小二乘解分离出来,孤岛 A、B 和 C 的发电负荷功率偏差平方和如表 2 所示。

表 2 孤岛的发电负荷功率偏差平方和  
Tab.2 Sum of square of load and generator power deviance on islands

孤岛	A	B	C
发电负荷功率偏差平方和(pu)	21.37	14.93	0

因为孤岛 A 和孤岛 B 的发电负荷功率偏差平方和都远大于  $\varepsilon$ ,说明这两个孤岛都不存在静态工作点。

(4)无静态工作点的孤岛潮流调整辅助信息

1)有功功率的调节

假设广东电网中的直流线路参与孤岛紧急功率调制,我们可以通过求解得到的孤岛发电与负荷有功功率偏差  $\sum_{i=1}^{n_j} \Delta P_i$  (见表 3)大小来判断直流线路的调节能力是否满足孤岛有功平衡的要求。

表 3 孤岛发电与负荷功率偏差

孤岛	A	B	C
$\sum_{i=1}^{n_j} \Delta P_i / \text{MW}$	3872	4022	-

由于有功调节量没有超过直流线路的过载能力,因此可以作为一种调节方案。后续的工作可以在潮流计算中考虑直流参与孤岛紧急功率控制,验证 LM 算法提供的有功调节信息是否有效。

2)无功功率的调节

直流落点可以通过调整换流站自主地进行无功补偿。因此,通过  $|\Delta Q_i|$  的大小搜索到最需要调整的无功节点(不包含直流落点),结果如表 4 所示。

表 4 最需要进行无功调节的节点

Tab.4 Buses requiring reactive power adjustment					
孤岛 A			孤岛 B		
序号	节点	$ \Delta Q_i /\text{MVar}$	序号	节点	$ \Delta Q_i /\text{MVar}$
1	GUOTANG2	9.502	1	ZONGJIA	579
2	GUOTANG1	9.237	2	HUANGPUB	7.485
3	SHIJING	9.110	3	HENGYUND	3.038
4	HUANGPUC	8.934	4	WANGLONG	2.928
5	CHASHAN2	8.880	5	XIEXIN	2.927

表 4 给出了最需要进行无功调节的节点,假设这些节点安装了无功补偿装置(即将 PQ 节点转化为 PV 节点),并重新形成孤岛潮流模型。首先,利用 PSD-BPA 程序计算进行无功调节后的孤岛潮流,发现潮流计算仍然不收敛。然后,采用自适应 LM 算法再次计算整个电网的潮流,并利用孤岛信息将各个孤岛发电负荷功率偏差平方和的最小二乘解分离出来,得到部分节点进行无功补偿后孤岛 A、B 和 C 的发电负荷功率偏差平方和,如表 5 所示。

表 5 部分节点进行无功补偿后的孤岛的发电负荷功率偏差平方和

Tab.5 Sum of square of load and generator power deviance on islands after some buses adjust reactive power				
孤岛	A	B	C	
发电负荷功率偏差平方和(pu)	0.304	0.303	0	

由于电网本身具有调节能力,可以认为电网基本实现了无功平衡。将表 5 与表 2 的结果进行对比可以看出,在表 4 给出的节点加上无功补偿装置后,孤岛发电负荷功率偏差平方和减小了 2 个数量级。可以预见,如果在更多 LM 算法给出的节点上增加无功补偿,孤岛发电负荷功率偏差平方和将会越来越接近阈值  $\varepsilon$ ,最终使得孤岛潮流收敛。以上算例验证了 LM 算法所提供的无功调节信息的有效性。对比 PSD-BPA 程序在计算增加无功调节后的孤岛潮流时仍不收敛的情况,自适应 LM 算法表现出了对初值不敏感的优势。

5 结 论

本文研究自适应解列候选方案中孤岛的静态工作点存在性校验方法,目的是寻找最快最优的自适应解列方案。本文为提高检验过程的有效性和快速



性,提出了一种解列后孤岛静态工作点校验的新方法,得到的结论如下:

(1)建立了基于解列方案的孤岛潮流模型。利用已知断面信息直接对原系统节点导纳矩阵  $Y$  进行修正,避免针对每个解列方案重新生成节点导纳矩阵。利用广度优先搜索算法获取孤岛信息,并在解列后未设置平衡机的孤岛上自动设置平衡机。通过对直流系统的合理建模,孤岛潮流模型生成方法也适用于交直流混联电网。

(2)提出了基于自适应 LM 算法的孤岛潮流计算方法,针对节点是否具有功率调节能力与压控节点的调节特性,对 LM 算法提出了相应的改进。自适应 LM 算法对迭代计算的初值和雅克比矩阵不敏感,具有很好的收敛性。此外,算法最终得到的最小二乘解可以提供潮流调整的辅助信息。

后续的工作包括改进孤岛信息搜索算法,进一步改善 LM 算法的收敛性,在有功功率调节中考虑孤岛存在燃气机组或抽水蓄能电站等具有快速调节能力的发电站的情况,验证 LM 算法提供的潮流调整辅助信息的有效性等。

## 参考文献 (References):

- [1] 汤涌 (Tang Yong). 电力系统安全稳定综合防御体系框架 (Framework of comprehensive defense architecture for power system security and stability) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2012, 36 (8): 1-5.
- [2] 孙建锋, 葛睿, 郑力, 等 (Sun Jianfeng, Ge Rui, Zheng Li, et al.). 2010 年国家电网安全运行情况分析 (Analysis of State Grid security operation in 2010) [J]. 中国电力 (Electric Power), 2011, 44 (5): 1-4.
- [3] 薛尚青, 蔡金锭, 刘丽军 (Xue Shangqing, Cai Jindin, Liu Lijun). 静止同步补偿器与双馈风电场的无功电压协调控制 (Coordinated reactive power and voltage control for wind farm and STATCOM) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2013, 32 (2): 24-27.
- [4] 葛江北, 张亚鹏, 阎国增, 等 (Ge Jiangbei, Zhang Yapeng, Yan Guozeng, et al.). 基于突变理论的风电场静态电压稳定分析方法 (Wind farm static voltage stability analysis method based on catastrophe theory) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (12): 20-25.
- [5] 聂宏展, 赵莹, 马建勃 (Nie Hongzhan, Zhao Ying,

Ma Jianbo). 风电并网时考虑紧急需求侧响应及鲁棒优化的输电网规划 (Transmission network planning with grid-connected wind farms based on emergency demand-side response and robust optimization) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (3): 7-11.

- [6] DL 755-2001, 电力系统安全稳定导则 (Guidelines for safety and stability of power systems) [S].
- [7] 袁季修 (Yuan Jixiu). 电力系统安全稳定控制 (Safety and stability control of power system) [M]. 北京: 中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 1996.
- [8] 袁季修 (Yuan Jixiu). 试论防止电力系统大面积停电的紧急控制——电力系统安全稳定运行的第三道防线 (Emergency control for preventing widespread blackout of power system - The third line of defence) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 1999, 23 (4): 1-4.
- [9] 张保会, 汪成根, 郝治国 (Zhang Baohui, Wang Chenggen, Hao Zhiguo). 电力系统失步解列存在的问题及需要开展的研究 (Problems and solutions of power system out-of-step islanding) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2010, 30 (10): 1-6.
- [10] 乔颖 (Qiao Ying). 大规模电网主动解列防御体系研究 (Study on the active splitting control scheme of large-scale power systems) [D]. 北京: 清华大学 (Beijing: Tsinghua University), 2008.
- [11] 倪敬敏 (Ni Jingmin). 基于慢同调的自适应主动解列控制及相关实用技术研究 (Studies on slow-coherency based adaptive islanding control and relevant application techniques) [D]. 北京: 清华大学 (Beijing: Tsinghua University), 2008.
- [12] 沈沉, 吴佳耘, 乔颖, 等 (Shen Chen, Wu Jiayun, Qiao Ying, et al.). 电力系统主动解列控制方法的研究 (Studies on active splitting control of power systems) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2006, 26 (13): 1-6.
- [13] 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 Transactions on Power Systems, 2002, 18 (4): 1556-1565.
- [14] Sun Kai, Zheng Dazhong, Lu Qiang. Splitting strategies for islanding operation of large-scale power systems using OBDD-based methods [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18 (2): 912-923.
- [15] Sun Kai, Zheng Dazhong, Lu Qiang. A simulation study of OBDD-based proper splitting strategies for power sys-

- tems under consideration of transient stability [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20 (1): 389-399.
- [16] 沈沉, 乔颖, 吴佳耘, 等 (Shen Chen, Qiao Ying, Wu Jiayun, et al.). 电力系统主动解列仿真平台的研究 (Studies on the integrated simulation platform designed for active splitting control of power systems) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2006, 26 (18): 13-18.
- [17] 王昕蕾 (Wang Xinlei). 基于 OBDD 搜索的电力系统紧急控制研究 (Research on power system emergency control based on the OBDD searching method) [D]. 北京: 清华大学 (Beijing: Tsinghua University), 2007.
- [18] 吴佳耘 (Wu Jiayun). 主动解列控制问题研究 (Studies on active splitting control) [D]. 北京: 清华大学 (Beijing: Tsinghua University), 2006.
- [19] 孙凯 (Sun Kai). 大型电网灾变下基于 OBDD 的搜索解列策略的三阶段方法 (An OBDD-based three-phase method for searching for splitting strategies of large-scale power networks against blackouts) [D]. 北京: 清华大学 (Beijing: Tsinghua University), 2004.
- [20] 苏义荣 (Su Yirong). 配电网拓扑分析方法的研究 (Research on topology analysis method of distribution network) [D]. 杭州: 浙江大学 (Hangzhou: Zhejiang University), 2002.
- [21] 严正, 范翔, 赵文恺, 等 (Yan Zheng, Fan Xiang, Zhao Wenkai, et al.). 自适应 Levenberg-Marquardt 方法提高潮流计算收敛性 (Improving the convergence of power flow calculation by a self-adaptive Levenberg-Marquardt method) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2015, 35 (8): 1909-1918.
- [22] 范翔 (Fan Xiang). 应用 Levenberg-Marquardt 方法提高电力系统大规模潮流计算收敛性研究 (Research on improving large scale power flow calculation convergence using Levenberge-Marquardt method) [D]. 上海: 上海交通大学 (Shanghai: Shanghai Jiao Tong University), 2014.
- [23] 赵晋泉, 江晓东, 张伯明, 等 (Zhao Jinquan, Jiang Xiaodong, Zhang Boming, et al.). 潮流计算中 PV-PQ 节点转换逻辑的研究 (Study on PV-PQ bus type switching logic in power flow computation) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2005, 25 (1): 57-62.

## Static operating point verification for islands formed in adaptive islanding control

LUO Gang<sup>1</sup>, FANG Shi-hui<sup>2</sup>, SHEN Chen<sup>2</sup>, TANG Ke-xuan<sup>2</sup>, MEI Sheng-wei<sup>2</sup>, QIAN Feng<sup>1</sup>, LI Li<sup>1</sup>

(1. Security Stability Analysis and Control Laboratory for Large Power System,

Guangdong Power Grid Corporation Dispatching Center, Guangzhou 510600, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Islanding control is an important means in the third defensive line of power systems. This paper follows the “search + test” idea in the adaptive islanding control, and proposes a new method to verify the existence of the steady-state operating point of the candidate islands in the test phase based on the Levenberg-Marquardt (LM) algorithm. We discuss how to form an islanding power flow model quickly from the already-known splitting interface first, which satisfies the synchronization constraint and power balance constraint. Then, we introduce the adaptive LM algorithm to calculate power flow of the candidate islands, and determine whether there is a steady-state operating point. For the island lacking of steady-state operating point, the corresponding power flow adjustment information has been put forward. Finally, actual power networks are used to present verification process and to verify its feasibility.

**Key words:** adaptive solution; island power flow model; island power flow calculation; adaptive LM algorithm