

# 计及同调分区和全局优化的 电力系统低频减载方案

解大<sup>1</sup>, 何恒靖<sup>1</sup>, 常喜强<sup>2</sup>, 姚秀萍<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学 电气工程学院, 上海市 闵行区 200240;

2. 新疆电力公司, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐市 830002)

## An Approach to Design Power System Under Frequency Load Shedding Scheme Taking Coherent Area and Global Optimization Into Account

XIE Da<sup>1</sup>, HE Heng-jing<sup>1</sup>, CHANG Xi-qiang<sup>2</sup>, YAO Xiu-ping<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Minhang District, Shanghai 200240, China;

2. Xinjiang Electric Power Company, Urumqi 830002, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

**ABSTRACT:** The design of power system's under frequency load-shedding (UFLS) scheme is very important to UFLS protection, and the performance of partitioned UFLS scheme directly depends on the effect of UFLS. To remedy the defects in existing design methods of UFLS, a set of new setting method is proposed. Firstly, based on the analysis on the characteristics of UFLS schemes, a base-set setting approach based on the set of chosen parameter values, which can give a relatively complete set of alternative schemes, is put forward; then the partition recombination of an independent administrative division under the splitting of power system is researched and the definitions of coherent partitions of UFLS and related concepts are given, besides, the algorithm for constructing coherent partition set of power system is put forward; finally, a global optimal UFLS scheme algorithm in which the coherent partitions are taken into account is given. Using the proposed setting approach, a global optimal UFLS scheme, which makes UFLS scheme possessing satisfied load-shedding performance under different accidents, can be attained.

**KEY WORDS:** power system; fundamental scheme set; coherent partitions; under frequency load shedding (UFLS); cut-set; global optimization

**摘要:** 电力系统低频减载方案是低频减载保护的重要方面, 分区低频减载方案的性能直接决定了低频切负荷的效果。针对以往低频减载方案设计方法的不足, 提出了一套新的整定方法。首先通过分析方案特性, 提出了一种基于参数取值集合的基础集整定方法, 该方法能够整定出相对完整的候选方案集合; 然后讨论了电力系统发生解列时, 独立行政分区中的分区组合情形, 给出了低频减载同调分区及相关概念的定

义, 并提出了建立系统同调分区集合的算法; 最后给出了计及同调分区的方案全局优化算法。上述整定方法可以获得全局最优方案, 使低频减载方案在不同事故情况下都能有优良的切负荷性能。

**关键词:** 电力系统; 方案基础集; 同调分区; 低频减载; 割集; 全局优化

## 0 引言

电力系统第3道防线是指在主系统发生稳定破坏时, 通过低频切负荷或解列装置的动作对系统电压和频率进行紧急控制, 以维持整个系统的稳定运行<sup>[1]</sup>。电力系统低频减载对于重大事故时维持系统第3道防线、防止事故扩散、避免系统发生连锁反应造成大范围的停电起着极其重要的作用<sup>[2]</sup>。

国内外对基于单分区或某确定小系统的低频减载策略有所研究, 尤其在低频减载方案设计方面。在传统法、自适应法和半适应法3种方法<sup>[3-4]</sup>基础上, 结合一些新的算法和理论, 文献[5-8]提出了许多更有效的设计方法; 文献[9]对低频减载中防止过切的措施进行了研究; 文献[10]介绍了一种用于辅助频率分析和低频减载方案设计的软件。

但当系统发生紧急事故使电力网解列时, 低频减载影响的区域很可能不再是单分区, 而是由多个分区组合成的子系统。此时低频减载的效果将由多个分区的低频减载策略共同决定, 各个分区低频减载特性也会因对象系统的变化而发生改变, 因此低频减载方案的设计应考虑由多个单分区组合构成

子系统的情况。另外,实际进行低频减载方案设计时,一般先根据运行经验整定几组候选方案,然后在目标分区内对各方案进行切负荷仿真,通过仿真分析得出的频率特性参数来确定最优方案<sup>[11]</sup>。这种方法比较简单、计算量相对较小,并且设计的方案对一些典型事故具有较好的减载性能,但使用这种方法的整定方案具有很大的局限性。由于未考虑系统解列导致电网拓扑结构发生变化对低频减载的影响,设计的方案并不一定是全局最优方案。

针对上述问题,本文首先通过分析低频减载方案的特点,提出一种建立分区方案基础集的方法。这种方法生成的方案集合覆盖范围较广,有利于寻找全局最优方案。然后针对电网解列生成的子系统,结合电网运行的实际情况,提出同调分区的概念;通过对电网分区图的分析,给出基于割集的电力系统同调分区生成方法。最后给出计及同调分区的全局方案优化算法,采用该算法生成的方案具有更好的适应性<sup>[12]</sup>。

## 1 低频减载方案基础集

### 1.1 特性分析

传统方案是目前低频减载方案中最简单也是应用最广泛的一种方案。传统低频减载方案在频率下降到整定的频率时,通过继电器按预先设定好的负荷量进行减负荷,同时为避开某些暂态过程如系统振荡或电压急剧下降时误动作,一般有一定的延时。因此传统方案的设计需要确定4项参数:方案轮次数、动作频率、切负荷量及延时。传统方案切负荷总量主要是根据可能出现的事故点来设定,然后按一定的方式安排到各个轮次中去。

根据切负荷量的不同分配方式,传统方案又可分为平均轮次方案、递增方案和递减方案。平均轮次方案每轮切负荷量为 $\Delta P_{\Sigma}/N_F$ ,其中 $\Delta P_{\Sigma}$ 为切负荷总量, $N_F$ 为切负荷基本级轮次数。递增方案中后一轮次切负荷量大于前一轮次,递减方案正好相反。递减方案的频率恢复速度相对递增方案更快且切负荷量一般较少,但比较容易发生过切导致稳态频率过高。

为防止切负荷后系统频率发生悬浮,还需整定2~4轮的后备轮。后备轮动作频率可与基本轮重复,但延时一般在10~20 s之间,并且后备轮各轮切负荷量可直接根据频率偏差和负荷频率调节系数算出<sup>[13]</sup>。

### 1.2 基础集构建算法

通过上述分析可知,传统方案的整定包括4项参数即轮次数、动作频率、切负荷量、延时。只要确定了各项参数取值的集合,然后按照一定的规律将参数进行组合即可生成方案的基础集。一般先确定轮次数、动作频率和延时,最后确定切负荷量。

轮次数又可分为2项,即基本轮轮次数 $N_F$ 和后备轮轮次数 $N_B$ 。由文献[13]可知,后备轮方案的轮次数、动作频率及切负荷量均可由基本轮算出,因此实际变化的参数仅有 $N_F$ 。根据 $N_F$ 的取值范围 $N_{\min} \leq N_F \leq N_{\max}$ ,取一定的步长 $\Delta N$ ,从 $N_{\min}$ 开始按 $\Delta N$ 递增至 $N_{\max}$ 即可建立 $N_F$ 的取值集合,记为 $\Phi_{N_F}$ 。

基本轮动作频率整定需考虑2个方面:首切频率值和轮次间频率级差。首切频率 $f_{s1}$ 变化范围 $f_{s1\min} \leq f_{s1} \leq f_{s1\max}$ ,取变化步长为 $\Delta f_{s1}$ ,同 $\Phi_{N_F}$ 计算的方法一样可计算首切频率的取值集合 $\Phi_{f_{s1}}$ 。同理可确定频率级差 $\Delta f$ 的取值集合 $\Phi_{\Delta f}$ 。

与轮次数相似,切负荷的延迟时间也分为2项,即基本轮延时 $t_F$ 和后备轮延时 $t_B$ ,但这两者的取值范围与变化步长大小均不相同,因此需分别计算取值集合 $\Phi_{t_F}$ 和 $\Phi_{t_B}$ 。一般基本轮各轮的延时都相同,后备轮也是一样。

切负荷量的整定相对灵活一些,但切负荷量的大小直接关系到方案的低频减载性能。为获得较优的方案,基础集的构建应尽可能涵盖各种切负荷量分配方式。切负荷量的整定首先需要确定切负荷总量 $\Delta P_{\Sigma}$ ,然后根据一定的方式分配到各个轮次中去,其中分配方式的选取对低频减载的性能有很大影响。 $\Phi_{\Delta P_{\Sigma}}$ 的建立应根据以往的事故功率缺额来计算。 $\Phi_{\Delta P_{\Sigma}}$ 的求取与 $\Phi_{N_F}$ 相同,即确定最值 $\Delta P_{\min}$ 、 $\Delta P_{\max}$ 和步长 $\delta_{\Delta P}$ ,然后在取值范围内等步长递增就得到了 $\Delta P_{\Sigma}$ 的取值集合。

常用的切负荷量的分配方式主要有平均分配、递增分配和递减分配方式,其中平均分配方式由 $N_F$ 和 $\Delta P_{\Sigma}$ 决定,故不需要另做计算。递增与递减切负荷方式应分别满足式(1)(2)的约束。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_F} \Delta P_i = \Delta P_{\Sigma} \\ \Delta P_i > \Delta P_j, 1 \leq j < i \leq N_F \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_F} \Delta P_i = \Delta P_{\Sigma} \\ \Delta P_i > \Delta P_j, 1 \leq i < j \leq N_F \end{cases} \quad (2)$$

其中  $\Delta P_i$  为第  $i$  轮切负荷量。

式(1)(2)对应的是 2 种特殊的切负荷量分配方式。一般情况下设  $\delta\Delta P_i = \Delta P_{i+1} - \Delta P_i$ ,  $1 \leq i \leq N_F - 1$ , 则  $\delta\Delta P_i$  为切负荷量变化步长。令  $\delta\Delta P_i = g(i)$ , 若  $g(i)$  为常数函数, 那么轮次间切负荷量为等步长变化, 否则切负荷量是变步长变化, 此时切负荷量的分配具有多种形式。式(1)(2)中的等式约束用  $\delta_{\Delta P_i}$  可表示为

$$\begin{cases} \Delta P_{\Sigma} = N_F \Delta P_1 + \sum_{i=1}^{N_F-1} i \delta_{\Delta P_i} \\ \delta_{\Delta P_i} = \Delta P_{i+1} - \Delta P_i = g(i) \end{cases} \quad (3)$$

在给定  $\Delta P_{\Sigma}$ 、 $N_F$  后根据不同的  $\Delta P_1$  和  $g(i)$  组合可以求出多种切负荷量分配的集合, 记为  $\varphi_{\Delta P}$ , 注意  $\varphi_{\Delta P}$  中的每个元素均为有序序列, 分别代表各轮次切负荷量。所有  $\Delta P_{\Sigma}$  与  $N_F$  的组合可通过求两者的笛卡尔积<sup>[14]</sup>  $\Phi_{N_F} \times \Phi_{\Delta P_{\Sigma}}$  得到, 然后按式(3)求  $\Phi_{N_F} \times \Phi_{\Delta P_{\Sigma}}$  中每个元素对应的  $\varphi_{\Delta P_i}$ ,  $i=1, \dots, n$ , 其中  $n$  为  $\Phi_{N_F} \times \Phi_{\Delta P_{\Sigma}}$  中元素的个数, 则总的切负荷量分配集合  $\Phi_{\Delta P} = \bigcup_{i=1}^n \varphi_{\Delta P_i}$ 。

至此求出的相互独立的参数取值集合有:  $\Phi_{j_{s1}}$ 、 $\Phi_{\Delta P}$ 、 $\Phi_{F}$ 、 $\Phi_{IB}$ 、 $\Phi_{\Delta P}$ , 然后对这些集合中的元素进行组合就可以确定低频减载方案的基础集, 具体方法如下:

1) 求笛卡尔积  $\Phi_{SF} = \Phi_{j_{s1}} \times \Phi_{\Delta P} \times \Phi_{F} \times \Phi_{IB}$ , 其中  $\Phi_{SF}$  为基本轮方案的集合。

2) 根据基本轮方案  $\Phi_{SF}$  计算出后备轮方案的动作频率、切负荷量参数取值集合, 记为  $\Phi_{SB}$ 。

3) 求笛卡尔积  $\Phi_{SB} = \Phi_{SF} \times \Phi_{SB}$ , 得出后备轮方案的集合。

4) 由  $\Phi_{SF}$  与  $\Phi_{SB}$  的关系可知,  $\Phi_{SF}$  与  $\Phi_{SB}$  一一对应, 故可将  $\Phi_{SF}$  与  $\Phi_{SB}$  中的元素对应组合从而得到完整方案的基础集  $\Phi_S$ 。

## 2 低频减载同调分区

### 2.1 同调分区的定义

低频减载方案只能应用于单个确定的分区中, 但实际保护动作时, 由于系统的解列分区可能处于多个单分区组成的子系统中。单分区减载方案会影响整个子系统的频率恢复特性, 方案整定时不仅要在单分区情况下进行基础集的优化, 同时还应在相应的子系统中进行全局优化。

电网发生断线或其他事故引起系统解列时, 系

统中的某些分区将会发生分离。发生分离的这些分区一般与系统联络不够紧密, 即与电网其他部分相连接的联络线的回路数较少。定义分区或多分区子系统与电网连接的回路数为该分区或多分区子系统的度。度反映了分区与电网连接的紧密程度。从图论的角度, 电网发生解列时, 电网分区图将由连通图变为分离图, 其分支数大于或等于 2。

分区的分离应满足 2 个条件: 1) 单分区或组合分区的度小于 3 才能从网络中分离; 2) 分区分离使电网分离成 2 个分支。

上述条件是仅考虑低频减载装置动作而不考虑调度员主动解列的前提下, 实际电网发生事故时断 2 回线路, 且电网解列为 2 部分的情况。这是因为: 1) 调度员主动解列对于低频减载装置的设置已没有实际意义, 实际电网中多回线路断开后引起调度员的干预时, 低频减载的功能已不再重要, 故不是本文讨论的内容; 2) 采用基础集及同调分区的概念后, 对于分支数大于 2 的情况, 在本文研究中自然完备地包含。

对于满足分区分离条件约束可以从系统中分离的多分区连通子系统称为同调分区。图 1 为某电网分区的示意图, 分区 14、15 可构成同调分区, 而分区 10 和 14 不能构成同调分区, 因为两分区从电网分离后系统解列成 3 个分支; 分区 1、2、3、4、5、6、7 也不能构成同调分区, 因为该子系统与剩余电网连接的度大于 3。

当低频减载保护发生时, 分区可能是孤立<sup>[15]</sup>的也可能处于同调分区中, 2 种情况下的频率特性有很大的差异, 低频减载的效果也将发生变化, 因

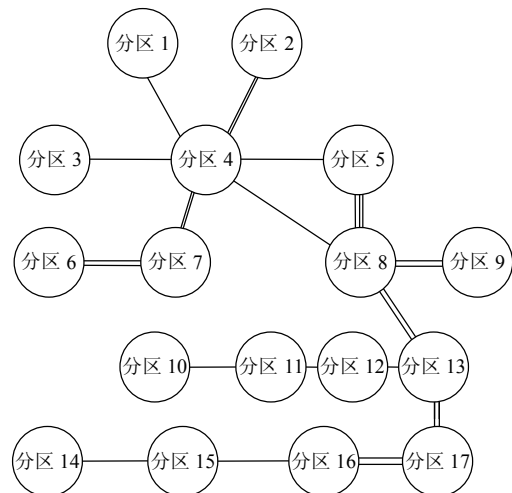


图 1 某电网分区示意图

Fig. 1 Dissected sketch map of a power grid

此在上述2种情况下低频减载方案的全局优化具有重要意义。

2.2 电网分区图的割集

割集的定义如下<sup>[16]</sup>: 设  $S \subseteq E(G)$ , 如果

$$R(G - S) = p - 2 \tag{4}$$

并且  $\forall S' \subset S$ , 则

$$R(G - S') = p - 1 \tag{5}$$

其中:  $G$  为连通图;  $R(G - S)$  为图的秩;  $p$  为图  $G$  的秩;  $E(G)$  为图  $G$  边的集合, 连通图的秩为顶点数减1, 则称边集  $S$  为图  $G$  的一个割集。

图2为对应图1的简单连通图记为  $G = (V, E)$ , 其中  $V$  为图  $G$  的顶点集合,  $E$  为图  $G$  边的集合。对割集  $S$ , 在  $G$  中去掉  $S$  的所有边后,  $G$  变成具有2个分支的分离图, 但是只去掉  $S$  中的部分边, 图  $G$  仍然是连通的, 如图2中  $S = \{(v_4, v_8), (v_5, v_8)\}$  就是一个割集。对图  $G$  中每条边赋予一定的权值代表线路回数, 如果  $S$  中所有边的权值之和小于3, 那么这样一个割集正好对应于一次分区分离, 所分离出的2个分支就是2个互补的同调分区(也可能含有单分区), 故分析电网所有同调分区与分析电网分区图的所有割集等价。

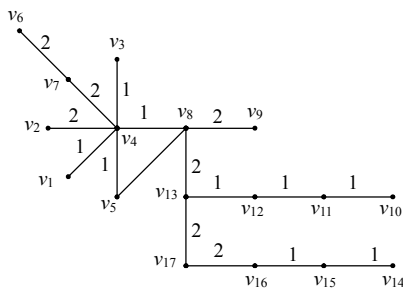


图2 对应图1的连通简单图 G  
Fig. 2 Connected simple graph G of Fig. 1

2.3 同调分区的生成方法

为分析电网所有的同调分区, 需先求出分区图的所有断集, 然后从断集集合中筛选出满足条件的割集, 最后根据筛选的结果生成同调分区的集合。求解图  $G$  断集的具体步骤如下:

- 1) 图  $G$  的生成树如图3所示。

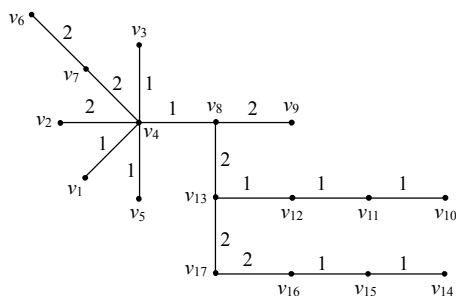


图3 图 G 的一棵生成树  
Fig. 3 A spanning tree of graph G

- 2) 构造基本割集组。表1列出了图  $G$  对应图3生成树的基本割集组。

表1 图 G 的基本割集组  
Tab. 1 Fundamental cut-set group of graph G

割集	边集合	权值	割集	边集合	权值
$S_1$	$(v_1, v_4)$	1	$S_9$	$(v_8, v_{13})$	2
$S_2$	$(v_2, v_4)$	2	$S_{10}$	$(v_{10}, v_{11})$	1
$S_3$	$(v_3, v_4)$	1	$S_{11}$	$(v_{11}, v_{12})$	1
$S_4$	$(v_4, v_7)$	2	$S_{12}$	$(v_{12}, v_{13})$	1
$S_5$	$(v_6, v_7)$	2	$S_{13}$	$(v_{14}, v_{15})$	1
$S_6$	$(v_4, v_5), (v_5, v_8)$	4	$S_{14}$	$(v_{15}, v_{16})$	1
$S_7$	$(v_4, v_8), (v_5, v_8)$	4	$S_{15}$	$(v_{16}, v_{17})$	2
$S_8$	$(v_8, v_9)$	2	$S_{16}$	$(v_{13}, v_{17})$	2

- 3) 计算基本割集组所有可能的环和  $S_p, \dots, S_n$ 。割集  $S_i$  和  $S_j$  环和的定义为

$$S_i \oplus S_j = (S_i \cup S_j) - (S_i \cap S_j) \tag{6}$$

基本割集组与这些环和共同构成了图  $G$  所有断集的集合。该集合包含了要求的其他非基本割集。

由图  $G$  的断集生成同调分区需要做2次筛选:

- 1) 从断集中筛选出割集; 2) 从割集中筛选出权值之和小于3的割集。为减少计算量先从断集集合中筛选出权值小于3的断集, 然后进行割集的筛选。

设通过权值约束筛选后的断集的集合为  $C = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$ , 对任意  $S_i \in C$ , 取  $S_i$  中一条边  $e(v_i, v_j)$ , 分别以  $v_i$  和  $v_j$  为起点, 对图  $G - S_i$  进行遍历得到2个顶点的集合  $V_i$  和  $V_j$ 。由于断集  $S_i$  中的任意一条边只能连接  $G - S_i$  中的2个分支, 若  $V_i \cup V_j = V$ , 即  $V_j = \bar{V}_i$ , 则说明图  $G - S_i$  只有2个分支, 因此  $S_i$  为割集; 否则  $S_i$  不是割集, 应舍去。

由上述分析可知, 在割集筛选的过程中, 对任一割集都会生成2个互补的顶点集合, 记为  $V_s$  和  $\bar{V}_s$ , 并令  $V_s$  中元素个数小于或等于  $\bar{V}_s$ 。如果  $V_s$  中元素个数等于1, 那么该集合中的顶点对应的分区就是单分区; 若  $V_s$  中元素个数大于1, 那么  $V_s$  对应于一个同调分区。根据上述方法求得图1的可分离的单分区和同调分区, 由于系统较大时有功和负荷相对比较平衡, 故一般取分区数小于总分区数一半的子系统作为该电网的同调分区, 如表2所示。

表2 图 G 的部分同调分区及所有独立分区  
Tab. 2 Some coherent areas and all autocephalous subareas of graph G

分区集合	度	分区类型	分区集合	度	分区类型
1	1	独立分区	1,2,3,4,6,7	2	同调分区
2	2	独立分区	10,11	1	同调分区
3	1	独立分区	10,11,12	1	同调分区
6	2	独立分区	14,15	1	同调分区
9	2	独立分区	14,15,16	2	同调分区
10	1	独立分区	14,15,16,17	2	同调分区
14	1	独立分区	10,11,12,13,		
6,7	2	同调分区	14,15,16,17	2	同调分区

建立了所有同调分区的集合后,对每个同调分区所包含的各个分区的候选方案集中选取方案进行组合,得出该同调分区的方案集。然后建立适当的系统模型进行仿真、分析、比较和优化,即可得出各个分区的全局优化方案。

### 3 低频减载方案的全局优化

#### 3.1 可行集筛选

设  $\Phi_{Bk} = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$  为分区  $k$  的低频减载方案基础集,其中  $S_i$  为第  $i$  个方案。可行集首先应该满足分区独立时低频减载频率特性参数达到国家标准,在分区  $k$  独立时对方案  $S_i$  进行切负荷仿真分析得到方案  $S_i$  的一组频率特性参数。

可行方案的约束条件为

$$\begin{cases} f_{\min s} \leq f_{\min} \\ f_{ss} \leq f_s \\ f_{\max} \leq f_{\max s} \end{cases} \quad (7)$$

其中:  $f_{\min s}$  为频率下降时允许最小值;  $f_{\min}$  为最低频率;  $f_{ss}$  为稳态频率允许最小值;  $f_{\max}$  为最高频率;  $f_s$  为稳态频率;  $f_{\max s}$  为频率调节允许最大值。

当方案  $S_i$  满足式(7)的约束条件时即为可行方案,基础集中所有可行的方案组成的集合即为可行集,记为  $\Phi_{Ak}$ 。可行集的筛选可减小方案全局优化时的计算量,避免无用计算。

#### 3.2 方案全局优化

方案的全局优化需要在独立分区和同调分区 2 种情况下进行。进行同调分区中的方案优化之前,首先应分析出电网的所有同调分区,然后根据同调分区的分区组合来选取单分区方案进行组合生成同调分区方案,再进行仿真优化。优化条件为

$$\begin{cases} P_s \leq P_{so} \\ |f_s - f_0| \leq \Delta_o \\ t_s \leq t_{so} \\ f_{\min o} \leq f_{\min} \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $P_s$  为实际切负荷总量;  $f_0$  为额定频率;  $P_{so}$ 、 $\Delta_o$ 、 $t_{so}$ 、 $f_{\min o}$  为对应优化参数。

具体优化步骤如下:

1) 初始式(8)的优化参数。

2) 对各分区的方案可行集  $\Phi_{Ak}$ ,在分区独立情况下进行仿真得出频率特性参数,按式(8)进行优化筛选得到优化集  $\Phi_{Ak}$ ,令  $\Phi_{Ak} = \Phi_{Ak}$ 。

3) 对每个同调分区选取其所包含的分区方案进行组合得出同调分区的切负荷方案,然后进行仿

真并按式(8)进行优化。设分区  $k$  在同调分区  $i$  中,  $S$  为分区  $k$  的一个方案,即  $S \in \Phi_{Ak}$ 。若优化后同调分区方案集合  $\Phi_{Ci}$  中所有与  $S$  相关的方案都被淘汰,那么方案  $S$  就被淘汰,可从  $\Phi_{Ak}$  中删除,按此优化方法可得到同调分区中优化后的方案集合  $\Phi_{Ak}''$ ,令  $\Phi_{Ak} = \Phi_{Ak}''$ 。

4) 当分区方案集合  $\Phi_{Ak}$  不为空时,调整优化方程式(8)中的优化参数,加强优化条件,重复第 2)、3) 步,直到求出所有分区的全局最优方案。

方案优化中应特别注意参数调整的方式,优化前期参数调整的幅度可大一些,在接近最优方案时参数调整的幅度应该逐渐变小,否则可能只得到一个较优的方案子集。

## 4 实例分析

### 4.1 仿真模型

切负荷仿真中采用单机带集中负荷的模型来计算系统平均频率的动态变化过程,并分析系统减载时的频率变化特性。该模型中频率变化与负荷和系统有功输出之间有如下关系(以下均是标么值):

$$\Delta f = g(P_m, P_L, \omega, t) \quad (9)$$

式中:  $P_m$  为保留在运行中发电机输出的有功功率;  $\omega$  为等效发电机的转速,标么制下等于频率  $f$ ;  $P_L$  为在系统频率为  $f$  时的负荷有功功率

$$P_L = P_0 * f^{K_L} \quad (10)$$

式中:  $P_0$  为初始额定频率时的负荷有功;  $K_L$  为负荷的频率调节系数。

### 4.2 方案设计及优化

对图 1 所示的电网,已知分区 14 的低频减载方案如表 3 所示。

现需要整定分区 15 的方案。根据前述方案整定的方法进行方案设计,具体步骤如下:

1) 构建分区 15 方案基础集。

取基本轮切负荷总量的集合为  $\Phi_{\Delta P_s} = \{20\%\}$ ,基本轮次数集合为  $\Phi_{N_F} = \{4\}$ ,分别选取平均轮次和递增方式进行切负荷分配,其中递增方式取首切

表 3 分区 14 低频减载方案

Tab. 3 UFLS scheme for area 14

$f/\text{Hz}$	$\Delta P_s/\text{Hz}$	$t/s$
49	0.01	0.5
48.8	0.01	0.5
48.6	0.01	0.5
48.4	0.01	0.5
49	0.03	10
48.8	0.035	10

负荷量为  $10\% \Delta P_{\Sigma}$ ，从而可得  $\Phi_{\Delta P} = \{(5\%, 5\%, 5\%, 5\%), (2\%, 4\%, 6\%, 8\%)\}$ 。

另取  $\Phi_{f_{s1}} = \{49\}$ ， $\Phi_{\Delta f} = \{0.2, 0.25\}$ ， $\Phi_{t_f} = \{0.5\}$ ， $\Phi_{I_B} = \{12\}$ ，根据方案基础级生成方法可生成4个方案，如表4所示。

表4 分区15方案基础集

Tab. 4 Fundamental scheme set for area 15

方案1			方案2		
f/Hz	$\Delta P_i/\%$	t/s	f/Hz	$\Delta P_i/\%$	t/s
49	0.05	0.2	49	0.05	0.2
48.8	0.05	0.2	48.75	0.05	0.2
48.6	0.05	0.2	48.5	0.05	0.2
48.4	0.05	0.2	48.25	0.05	0.2
49	0.015	12	49	0.015	12
48.8	0.025	12	48.75	0.025	12
方案3			方案4		
f/Hz	$\Delta P_i/\%$	t/s	f/Hz	$\Delta P_i/\%$	t/s
49	0.02	0.2	49	0.02	0.2
48.8	0.04	0.2	48.75	0.04	0.2
48.6	0.06	0.2	48.5	0.06	0.2
48.4	0.08	0.2	48.25	0.08	0.2
49	0.015	12	49	0.015	12
48.8	0.025	12	48.75	0.025	12

2) 切负荷仿真分析。

首先在单分区中进行仿真分析，当分区15孤立时其有功缺额为20%，采用单机带集中负荷模型分别对以上4套方案进行切负荷仿真得到如图4所示频率特性曲线。

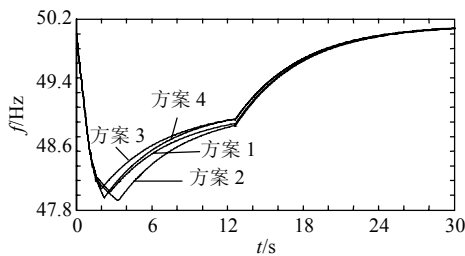


图4 分区孤立时方案切负荷频率特性曲线  
Fig. 4 Frequency characteristic curves of UFLS simulation when the region is isolated

从图4可以看出，4个方案切负荷的稳态频率基本相同，但方案3切负荷时频率下降的最小值高于其他方案，且频率恢复速度更快，因此单分区情况下方案3应该是最佳方案。

当分区15处于分区14与分区15组成的同调分区中时，将分区15的4个方案分别与分区14的方案进行组合形成同调分区方案集合。通过仿真得出同调分区低频减载频率特性曲线如图5所示。

显然同调分区方案中只有方案2参与的同调分区切负荷方案的稳态频率最接近额定值，其他方案的稳态频率均低于49.8 Hz。

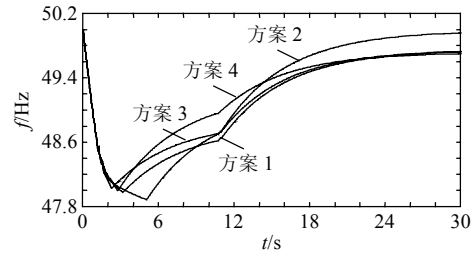


图5 同调分区中各方案切负荷频率特性曲线  
Fig. 5 Frequency curves of UFLS simulation in coherent area

3) 方案全局优化。

表5给出了图4和图5的频率特性参数，通过该特性参数可对分区15的4个方案进行优化。

表5 图4和5频率特性参数

Tab. 5 Characteristic parameters of frequency curves for Fig. 4 and Fig. 5

分区情况	方案	$f_{max}/\text{Hz}$	$f_{min}/\text{Hz}$	$f_s/\text{Hz}$	$t_f/\text{s}$	$\Delta P_i/\%$
分区独立	1	50.07	47.84	50.07	16.65	21.50
	2	50.06	47.72	50.06	16.76	21.50
	3	50.08	47.88	50.08	16.38	21.50
	4	50.08	47.76	50.08	16.38	21.50
同调分区	1	50.00	47.97	49.72	18.45	17.24
	2	50.00	47.88	49.96	15.71	17.85
	3	50.00	48.03	49.73	18.00	17.24
	4	50.00	48.00	49.70	17.06	17.85

从表5可以看出，单分区时方案3的切负荷效果最好，其频率下降时的最小频率最高，且稳态频率也在国标要求内。而在同调分区中，方案3的稳态频率偏差要大于0.2，若取0.2为稳态频率偏差优化参数，那么仅有方案2满足优化条件，因此考虑同调分区进行全局优化时应当选取方案2为最优方案。

5 结论

低频减载方案的整定主要包括2个方面：候选方案即方案基础集的设计和方案的优化。以往进行方案基础集设计时，通常是经验整定出少数几套方案。这种方法具有计算量小、针对性强等优点，但由于生成的方案基础集过小而容易遗漏最优方案。通过对方案特性的分析，本文提出了基于方案参数取值集合的基础集生成方法。这种方法可以建立起相对完整的基础集，对最优方案的设计具有重要的意义。

方案的优化是低频减载方案设计的另一个重要方面。在基于方案切负荷频率特性参数优化方法的基础上，本文进一步考虑系统拓扑结构的变化对低频减载的影响，给出了电力系统同调分区的分析

方法, 提出了计及同调分区的低频减载方案全局优化算法。从对实际电网的分析中可以看出, 分区孤立时具有较好切负荷效果的方案在同调分区中不一定能表现出良好的频率恢复特性。方案设计时不仅应考虑分区孤立的情况, 还应该考虑其处于同调分区时的情形, 综合这 2 方面进行全局优化才能得出最优方案。本研究算法完成的工程实用化软件包在国内多个电力系统已成功应用。

## 参考文献

- [1] 杨博, 解大, 陈陈, 等. 电力系统低频减载的现状和应用[J]. 华东电力, 2002(9): 14-18.  
Yang Bo, Xie Da, Chen Chen, et al. Current status of low frequency load shedding in power system and its application[J]. East China Electric Power, 2002(9): 14-18(in Chinese).
- [2] 孙光辉, 沈国荣. 加强电网三道防线确保我国电力系统的安全[C]. 中国科协 2004 年学术年会电力分会场暨中国电机工程学会 2004 年学术年会论文集, 中国, 海南, 2004.
- [3] Delfino B, Massucco S, Morini A, et al. Implementation and comparison of different under frequency load-shedding schemes [C]. Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver BC, Canada, 2001.
- [4] 陈俊山, 洪兰秀, 郑志远. 电力系统低频减载研究与应用发展[J]. 继电器, 2007, 35(14): 79-82.  
Chen Junshan, Hong Lanxiu, Zheng Zhiyuan. Investigation and application of under-frequency loading shedding[J]. Relay, 2007, 35(14): 79-82(in Chinese).
- [5] Hsu C T, Kang M S, Chen C S. Design of adaptive load shedding by artificial neural networks[J]. IEE Proc Gener Transm and Distrib, 2005, 152(3): 415-421.
- [6] Sanaye-Pasand M, Davarpanah M. A new adaptive multidimensional load shedding scheme using genetic algorithm[C]. Electrical and Computer Engineering Conference, Canadian, 2005.
- [7] Seyedi H, Sanaye-Pasand M. New centralised adaptive load-shedding algorithms to mitigate power system blackouts[J]. IEE Generation Transmission and Distribution, 2009, 3(1): 99-114.
- [8] 王葵, 潘贞存. 一种新型低频减载方案的研究[J]. 电网技术, 2001, 25(12): 31-33.  
Wang Kui, Pan Zhencun. A new load shedding scheme for limiting under frequency[J]. Power System Technology, 2001, 25(12): 31-33(in Chinese).
- [9] 秦明亮, 杨秀朝. 减少低频减载方案过切的措施研究[J]. 电网技

术, 2002, 26(3): 83-86.

- Qin Mingliang, Yang Xiuchao. Measures to reduce over-shedding caused by under-frequency load shedding project[J]. Power System Technology, 2002, 26(3): 83-86(in Chinese).
- [10] 王冲, 解大, 陈陈, 等. 电力系统低频减载分析软件包的开发和应用[J]. 继电器, 2004, 32(13): 55-58.  
Wang Chong, Xie Da, Chen Chen, et al. Development and application of power system under-frequency load shedding analysis software package[J]. Relay, 2004, 32(13): 55-58(in Chinese).
- [11] 侯学勇, 邱巍, 鞠平, 等. 江苏电网低频减载优化研究[J]. 江苏电机工程, 2008, 27(4): 8-10.  
Hou Xueyong, Qiu Wei, Ju Ping, et al. Study of optimization of under-frequency load shedding in Jiangsu power grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2008, 27(4): 8-10(in Chinese).
- [12] 赵强, 王丽敏, 刘肇旭, 等. 全国电网互联系统频率特性及低频减载方案[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 35-40.  
Zhao Qiang, Wang Limin, Liu Zhaoxu, et al. Study on dynamic frequency characteristics and coordinative under-frequency load shedding scheme for nationwide interconnected power grid of China[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 35-40(in Chinese).
- [13] DL 755—2001 电力系统安全稳定导则[S].
- [14] 同济大学数学系. 高等数学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 3.
- [15] 井广秀, 孙含笑, 胡家跃, 等. 驻马店和信阳地区电网与河南主网解列事故分析[J]. 电网技术, 2001, 25(9): 71-73.  
Jing Guangxiu, Sun Hanxiao, Hu Jiayue, et al. Splitting accident analysis of Zhumadian and Xinyang regional power networks from Henan provincial power network[J]. Power System Technology, 2001, 25(9): 71-73(in Chinese).
- [16] 王朝瑞. 图论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002: 53, 75-98.



解大

收稿日期: 2009-10-18。

作者简介:

解大(1969—), 男, 副教授, 研究方向为 FACTS、并网型风力发电、电力系统仿真及智能电网, E-mail: xieda@sjtu.edu.cn;

何恒靖(1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统仿真;

常喜强(1982—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与仿真;

姚秀萍(1961—), 女, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行与仿真。

(责任编辑 王晔)