基于割集的电力系统低频减载同调分区算法

何恒靖[1]，解 大[1]，常喜强[1,2]，姚秀萍[2]

（1.上海交通大学电气工程系，上海 200040；2.新疆电力公司，新疆 乌鲁木齐 830002）

摘要：对电力系统分区运行下系统发生解列时各分区低频减载的作用区域进行了研究。通过分析实际电网解列时系统拓扑结构变化的特性，结合低频减载实际应用的原理，给出了低频减载同调分区及相关概念的定义。基于电网分区图，应用对图的割集的分析方法，提出了建立系统所有同调分区集合的算法。最后按照低频减载方案设计的一般方法，结合提出的同调分区理论及分析方法，给出了考虑同调分区的低频减载方案设计与优化的算例。算例结果表明研究各种情况下低频减载的作用区域对分区低频减载方案的设计和优化有着重要的作用。

关键词：电力系统；同调分区；低频减载；割集

Power system under frequency load shedding coherent-area analysis based on cut-set

HE Heng-jing[1]，XIE Da[1]，CHANG Xi-qiang[1,2]，YAO Xiu-ping[2]

（1.Electrical Engineering Department，Shanghai Jiaotong University，Shanghai 200040，China；
2.Xinjiang Electrical Power Company，Urumuqi 830002, China）

Abstract：This paper mainly studies the protected area of Under Frequency Load Shedding(UFLS) scenario when the electric system which is running under partitioned condition splits. By analyzing the topological characteristics of islanded system and the mechanism of UFLS, UFLS coherent area (UFLSCA) and relevant concepts are defined. A method which is used to find all UFLSCAs of a system when it splits up in various situations is introduced. This method is mainly based on the analysis of cut-set of the system graph and the graph is derived from dissected sketch map of the power system. Finally, analysis of an electric grid by such method and UFLS scheme optimization which has taken into account UFLSCA is given as an example. The result demonstrates that analyzing UFLSCAs in different situations is very important to design and optimization of UFLS schemes.

Key words：power system；coherent area；under frequency load shedding：cut-set

中图分类号： TM71　　文献标识码：A　　文章编号： 1674-3415(2010)09-0012-06

0　引言

电力系统低频减载对于重大事故时防止事故扩散、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[1]，其中低频切负荷方案的设计和优化是其重要方面。目前国内外对低频减载的研究已取得了一定的成果，尤其是方案设计方面。在传统法、自适应法和半适应法三种方法[2-4]基础上，结合一些新的算法和理论，文献[5-7]提出了许多更有效的方案设计方法，文献[8]中介绍了一种用于辅助频率分析和低频减载方案设计的分析软件。但文献[5-8]中对低频减载方案的研究均是基于某一特定的单分区或小系统，并未考虑多个分区互连时各分区之间低频减载方案的相互作用对分区低频切负荷频率特性的影响。

当发生紧急事故使电力网解列时，低频减载作用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，同时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，而目前已提出的各种方案设计方法中并未考虑这一情况。为得到分区低频减载的全局最优方案，方案设计时应考虑多个单分区组合构成子系统的情况，并进一步结合多分区子系统进行切负荷方案的设计、分析、优化和检验。达到上述目标的关键在于分析系统在各种情况下所有可能的多分区子系统。

针对上述问题，本文提出了一种分析电网多分区子系统的方法。本文首先结合电网运行的实际情况，对这种多分区子系统给出了严格的定义即电力系统低频减载“同调分区”的概念。然后结合图论

中割集的概念，提出了基于对电网分区图割集的分析求取电力网络中所有同调分区集合的算法。最后通过对实际电网的算例分析，采用单机带集中负荷模型对方案在单分区和多分区子系统两种情况下切负荷频率特性进行仿真、比较和定量分析，进一步说明了同调分区分析的方法及其在低频减载方案设计中的重要意义。

1 同调分区定义

低频减载方案应用于单分区中，但实际保护动作时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到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设计、优化，同时还应在相应的子系统中进行全局优化。如图 1 为电网分区的示意图。

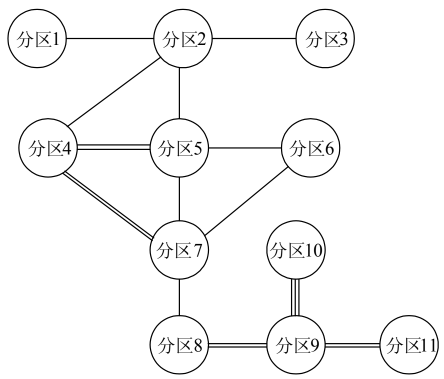

图 1 电网分区示意图

Fig.1 Dissected sketch map of electric system

1.1 低频减载分区

电网的分区是指以受端系统为核心，将外部电源连接到受端系统，形成一个供需基本平衡的区域，并经联络线与相邻区域相连[9]。分区的重要作用之一是有利于第三道稳定防线的实施[10]，这其中就包括了低频减载。为了在事故时有效地进行减载以维持系统频率稳定，需要选取电网分区作为低频减载的分区，如图 1 中的分区 1~11。

单个低频减载分区称为单分区，由多个单分区构成的连通区域称为组合分区，如图 1 中分区 8、9、10、11 就构成了 1 个组合分区。多个组合分区或单分区构成的非连通区域的集合称为多分区组合，如图 1 中断开分区 7 和 8 以及分区 8 和 9 之间的联络线，电网就分裂成 1 个单分区和 2 个组合分区，这三部分组成的非连通区域是多分区组合。

1.2 单分区及组合分区“度”的定义

单分区或组合分区的“度”是指单分区或组合分区与电网其他部分相连接的联络线的回路数，如图 1 中分区 5 的度为 4。度反映了分区与电网连接的紧密程度。

1.3 分区分离

分区分离是指电网发生断线或其他事故引起系统解列，使得原本连通的电网发生分离。

从图论的角度，电网分区图由连通图变为分离图，其分支数大于或等于 2。在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（因调度员主动解列对于低频减载装置的设置已没有意义），考虑实际情况下电网发生事故时断两回线路，并且电网一般解列为两部分即对应的连通图解列为两个分支，因此分区的分离必须满足两个条件：1）单分区或组合分区的度小于 3 才能从网络中分离；2）分区分离仅使电网分离成 2 个分支。受分区分离条件约束，可以从网络中分离的单分区称为独立分区，如图 1 中的分区 1、3、6、11。

1.4 同调分区

满足分区分离条件约束可以从系统中分离的组合分区称为同调分区。

同调分区的实际意义在于：解列或分离后的各子系统通常能够保持自同步及一定的供需平衡[11]，子系统各个分区的电气特性相对保持一致且易于控制。

另外，还有一类组合分区它们在分区分离条件约束下不会发生分离，且通常是同调分区的子区域，定义其为最小公约同调分区。最小公约同调分区的低频减载特性同单个分区相似，因此可以将其等效为单分区来研究。如图 1 中分区 9 和 10 考虑分区分离约束条件时不会分离。

2 基于割集的同调分区分析方法

为研究单分区低频减载方案对同调分区切负荷效果的影响，需要先建立所有同调分区集合。某些分区可能从网络中分离成为独立分区，这种情况下还需将该分区单独分离进行研究。

2.1 同调分区的割集定义

割集的定义如下[12]：设 $S \subseteq E(G)$，如果

$$R(G-S)=p-2 \tag{1}$$

$$\forall S' \subset S, R(G-S')=p-1 \tag{2}$$

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

图 2 为对应图 1 的简单连通图 $G=(V,E)$，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 变成具有二

个分支的分离图，但是只去掉 S 中的部分边，图仍然是连通的，如图 2 中 $S=\{(v_2,v_4),(v_2,v_5)\}$ 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，所分离出的两个分支就是两个互补的同调分区（也可能含有独立分区），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。

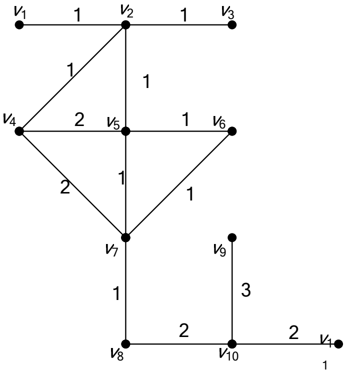

图 2 对应图 1 的连通简单图 G

Fig.2 Connected simple graph G of Fig.1

设 $V_1\subseteq V$，端点分别属于 V_1 和 $\overline{V}_1$ 的所有边的集合称为图 G 的一个断集[12]，记为 $E(V_1\times\overline{V}_1)$。显然从图 G 中去掉 $E(V_1\times\overline{V}_1)$ 后其分支数将大于 1，若去掉 $E(V_1\times\overline{V}_1)$ 后图的分支数等于 2，那么断集 $E(V_1\times\overline{V}_1)$ 就是图的一个割集，因此图的割集的集合是其断集集合的非空子集，可以通过求图的断集来求图的割集集合。

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。

2.2 分区图的断集求解

对于给定的电网分区图，不能直接用于基于割集的图论分析，需要对分区图作一些变换。如图 2 所示，对分区图中的每个分区可等效为一个顶点 v_i，分区之间的连接用一条边 e 来替代，对每条边赋予对应的权值 w 来表示分区间联络线的回路数。一般电网分区图是连通无环的，对非连通的分区图可以对每个连通子图分别进行分析。通过上述变换即可构造出满足图论分析要求的连通简单图。计算图 G 的一个基本割集组并求其所有可能的环和即可求出图 G 的所有断集。求解断集的具体步骤如下：

1）建立图 G 的生成树

采用链表数据结构表示图 G，对图 G 进行广度优先遍历或深度优先遍历[13]即可构造出一棵生成树，且生成树并不唯一。选取其中一棵生成树 T，如图 3 所示。

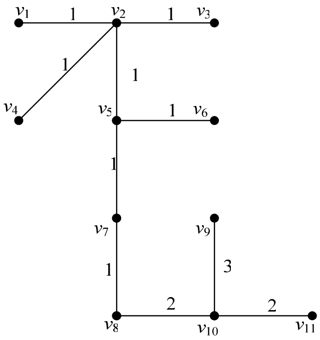

图 3 图 G 的一棵生成树

Fig.3 A spanning tree of graph G

2）构造基本割集组

根据选取的生成树 T 可构造出图 G 的 1 个基本割集组 $S_1,\cdots,S_{p\text{-}1}$，其中 p 为顶点数。建立基本割集组是求取图 G 所有断集的前提。表 1 给出图 G 1 个基本割集组及每个割集中所有边的权值之和。

表 1 图 G 的基本割集组

Tab.1 Fundamental cut-set group of graph G

割集序号	边集合	权值和
S_1	(v_1,v_2)	1
S_2	(v_2,v_3)	1
S_3	$(v_2,v_4),(v_4,v_5),(v_4,v_7)$	5
S_4	$(v_2,v_5),(v_4,v_5),(v_4,v_7)$	5
S_5	$(v_5,v_6),(v_6,v_7)$	2
S_6	$(v_4,v_7),(v_5,v_7),(v_6,v_7)$	4
S_7	(v_7,v_8)	1
S_8	(v_8,v_{10})	2
S_9	(v_9,v_{10})	3
S_{10}	(v_{10},v_{11})	2

3）计算基本割集组所有可能的环和 $S_p\cdots S_n$

割集 S_i 和 S_j 环和的定义如式（3）：

$$S_i\oplus S_j=(S_i\bigcup S_j)-(S_i\bigcap S_j) \qquad (3)$$

基本割集组与这些环和共同构成了图 G 所有断集的集合，这个集合中包含了所要求的其他非基本的割集。

2.3 同调分区的生成算法

由图 G 的断集生成同调分区需要作两次筛选：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。根据筛选的结果可生成同调分区集合。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 $C=\{S_1,S_2,\cdots,S_k\}$，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 $G-S_i$ 进行遍历得到两个顶点的集合 V_i 和 V_j。由于断集 S_i 中的任意一条边只能连接 $G-S_i$ 中的两个分支，若 $V_i \bigcup V_j = V$ 即 $V_j = \overline{V}_i$，则说明图 $G-S_i$ 只有两个分支，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两个互补的顶点集合，记为 V_s 和 $\overline{V}_s$ 并令 V_s 中元素个数小于或等于 $\overline{V}_s$。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一个独立分区，$\overline{V}_s$ 对应于一个同调分区；若 V_s 中元素个数大于 1，那么 V_s 和 $\overline{V}_s$ 就对应于两个互补的同调分区。根据上述方法求得图 1 的所有独立分区和同调分区，如表 2 所示，其中只列出了对应 V_s 的分区集合，与之互补的同调分区可直接得出。

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	度值	分区类型
1	1	独立分区
3	1	独立分区
6	2	独立分区
11	2	独立分区
1，2，3	2	同调分区
9，10，11	2	同调分区
8，9，10，11	1	同调分区

建立了所有的同调分区的集合后，对每个同调分区从其所包含的各个分区的候选方案集合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。

2.4 单机带集中负荷模型

仿真分析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，并分析系统切负荷时的频率变化特性。此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）：

$$\Delta f = g(P_m, P_L, \omega, t) \qquad (4)$$

其中：P_m 为保留在运行中发电机输出的有功功率；ω 为等效发电机的转速，标么制下就等于频率 f；P_L 为在系统频率为 f 时的负荷有功功率，表达式如式（5）。

$$P_L = P_0 * f^{K_L} \qquad (5)$$

其中：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。

3 实例分析

对于各分区之间联系不够紧密的电网，事故时容易造成系统解列，使部分子系统从电网中分离形成同调分区，因此各分区低频减载方案设计时需要考虑该分区位于同调分区中的情况。本文以某实际电网为例，按前述基于割集的同调分区分析方法计算其所有同调分区，并给出计及同调分区的低频减载方案设计、优化的算例。图 4 为该电网分区结构图。

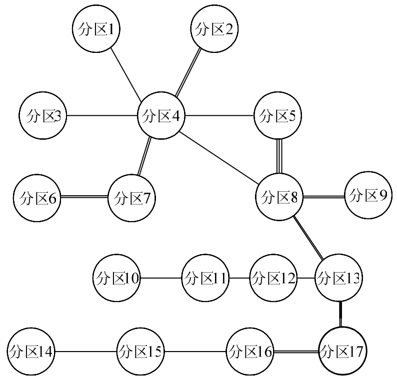

图 4 某实际电网分区示意图

Fig.4 Dissected map of an electric grid system

按照分析同调分区的步骤，对电网图作一定的变换使之成为连通简单图，如图 5 所示。

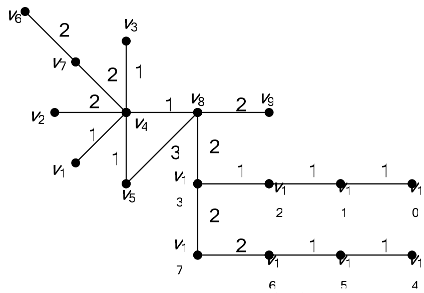

图 5 对应图 4 的连通简单图 G_{xj}

Fig.5 Connected simple graph G_{xj} for Fig.4

由图 G_{xj} 构建生成树及对应的基本割集组。图 6 为 G_{xj} 的一棵生成树，表 3 为对应的基本割集组。

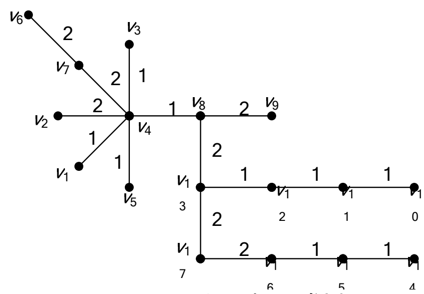

图 6 图 G_{xj} 的 1 棵生成树

Fig.6 A spanning tree of graph G_{xj}

表 3 图 G_{xj} 的基本割集组

Tab.3 Fundamental cut-set group of graph G_{xj}

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

计算基本割集组所有可能的环和，根据前述分区分离的要求，筛选出所有满足条件的割集的集合并转化为节点集合表示形式来计算所有同调分区。表 4 给出了该电网同调分区集合的一部分（与之互补的同调分区不再列出）及所有的独立分区。分析出所有可能的同调分区之后，组合各个分区候选方案并在对应同调分区中进行仿真、优化即可得出全局优化方案。

表 4 部分同调分区及所有独立分区

Tab.4 Some coherent areas and all autocephalous subareas of the electric grid

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	10,11,12,13,14,15,16,17	2	同调分区
6,7	2	同调分区			

已知图 G_{xj} 中分区 14 的 3 个候选方案，需要从 3 个候选方案中优化出一个方案。由表 4 可知分区 14 为独立分区，在计及同调分区的情况下需要在单分区和同调分区中分别仿真计算，然后进行全局优化。考虑分区 14 和图 G_{xj} 中分区 15 组成同调分区的情况，表 5 给出了分区 15 的方案及分区 14 的 3 个候选方案。

当分区 14 孤立时，采用单机带集中负荷模型仿真得到 3 个候选方案切负荷频率特性曲线，如图 7 所示。从图中可以看出方案 2 的最低频率高于其他方案，并且频率恢复速度更快，因此方案 2 最优。

当分区 14 处于分区 14 与分区 15 组成的同调分区中时，将分区 14 的 3 个候选方案分别与分区 15 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 8 所示，此时分区 14 方案 2 与分区 15 方案组成的同调分区方案切负荷的最低频率要低于其他方案，且产生了较大的频率超调量。

表 5 分区 14 和分区 15 的方案

Tab.5 Schemes of area 14 and 15

分区 15 方案（给定）		分区 14 方案 1	
频率/Hz	切负荷量	频率/Hz	切负荷量
49	3.6%	49	1%
48.8	4.6%	48.75	1%
48.6	5.5%	48.5	1%
48.4	6.3%	48.25	1%
49	1.3%	49	3%
48.8	2%	48.75	3.5%
分区 14 方案 2		**分区 14 方案 3**	
频率/Hz	切负荷量	频率/Hz	切负荷量
49	1%	49	0.6%
48.8	1%	48.75	0.8%
48.6	1%	48.5	1.2%
48.4	1%	48.25	1.4%
49	3%	49	3.6%
48.8	3.5%	48.75	4.2%

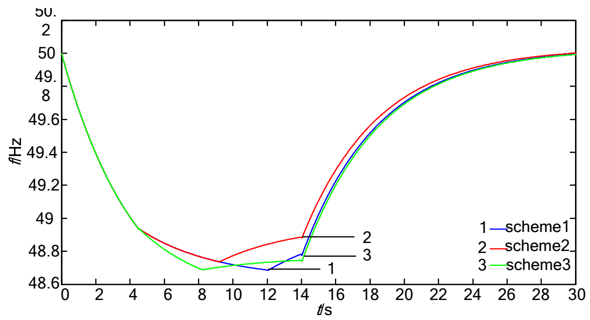

图 7 分区 14 单独切负荷频率曲线

Fig.7 UFLS frequency curves of area 14 when isolated

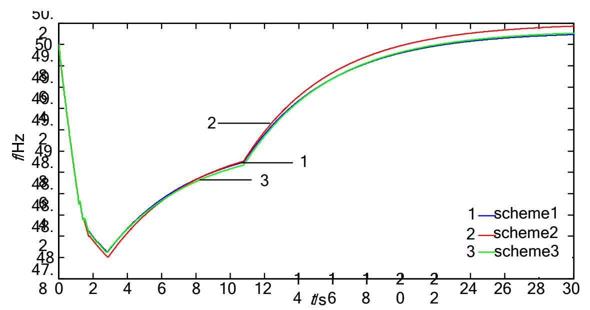

图 8 分区 14 和分区 15 组成同调分区时切负荷频率曲线

Fig.8 UFLS frequency curves of coherent-area which consist of area 14 and 15

对应两组频率曲线的特性参数如表 6 所示。

表 6 频率曲线特性参数

Tab.6 Characteristics of frequency cruves

分区情况	方案	最小频率/Hz	稳态频率/Hz	稳定时间/s
独立分区	1	48.68	49.99	17.81
	2	48.74	50.00	17.4
	3	48.69	49.99	17.96
同调分区	1	48.05	50.09	14.18
	2	48.00	50.17	13.84
	3	48.05	50.11	14.21

从图 8 和表 6 中可以看出分区 14 孤立时方案 2 最优，但考虑同调分区时方案 2 会造成较大超调量使得稳态频率过高，因此综合考虑两种情况应该选取方案 1。全局优化时应该对表 4 中含有分区 14 的所有同调分区进行仿真和比较。需要说明的是，在当前电网第三道稳定防线分层分区运行要求下，本算法在实际大规模电网的分层分区数量的基础上对算法的计算量进行了验证，本算法的计算速度可以满足实际需要。

4　总结

电力系统低频减载同调分区与系统分区图的割集具有对应关系，通过计算电网分区图的割集可以解出电网所有的同调分区。

从对实际电网的分析中可以看出，单分区低频减载方案对其所在同调分区的低频减载效果有着较大的影响。方案设计时不仅应考虑分区独立的情况，还应该考虑其处于同调分区时，综合这两方面进行设计优化才能得出最优方案。因此基于割集的电力系统同调分区分析方法对设计全局最优低频减载方案以提高各种事故下电力系统频率的稳定有着重要的意义。

参考文献

[1] 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[A]. 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[C]. 2004.464-468.
SUN Guang-hui，SHEN Guo-rong. Enhancing Three Defense Lines for Insuring the Security and Stability of the Power Grid of China[A]. in: Chinese Society for Electrical Engineering Annual Meeting[C]. 2004. 464-468.

[2] Delfino B， Massucco S， Morini A，et al. Implementation and Comparison of Different Under Frequency Load-Shedding Schemes[A]. in: Power Engineering Society Summer Meeting[C]. 2001. 307- 312.

[3] 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)：14-18,72.
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)：14-18,72.

[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 Jun-shan，HONG Lan-xiu，ZHENG Zhi-yuan. Investigation and Application of Under-frequency Loading Shedding[J]. Relay，2007，35（14）：79-82.

[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[A]. in: Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering[C]. 2005. 1974-1977.

[7] Seyedi H，Sanaye-Pasand M. New Centralised Adaptive Load-shedding Algorithms to Mitigate Power System Blackouts[A]. in: 2007 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering[C]. 2007. 44-48.

[8] 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）：55-58，67.
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）：55-58，67.

[9] DL 755-2001，电力系统安全稳定导则[S].
DL 755-2001，Guide on Security and Stability for Power System[S].

[10] 滕林，王刚，仇玉萍，等. 安徽 500 kV/220 kV 电网分层分区的初步设想[J]. 华东电力，2006，34（11）：56-58.
TENG Lin，WANG Gang，QIU Yu-ping，et al. Tentative Idea on Layering and Zoning of Anhui 500 kV/200 kV Grids[J]. East China Electric Power，2006，34（11）：56-58.

[11] 李莉，刘玉田，刘源祺. 基于同调分析的电力系统极端紧急控制—解列与减载[A]. 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十二届学术年会论文摘要集[C]. 2006. 608-610.
LI Li，LIU Yu-tian，LIU Yuan-qi. Power System Extreme Emergency Control Based Coherency Analysis-splitting and Load Shedding[A]. in: the 22nd China University Annual Scholar Meeting for Power System and Automation[C]. 2006. 608-610.

（下转第 22 页　continued on page 22）

Optimization Based on Approximate Newton Directions[J]. Proceedings of the CSEE，2007，27（25）：19-24.

[7] 赵维兴，刘明波，缪楠林. 基于对角加边模型的多区域无功优化分解算法[J]. 电力系统自动化，2008，32（4）：25-29.
ZHAO Wei-xing，LIU Ming-bo，MIAO Nan-lin. A Decomposition Algorithm for Multi-area Reactive-power Optimization Based on the Block Bordered Diagonal Model[J]. Automation of Electric Power Systems，2008，32（4）：25-29.

[8] Wong K P, Yuryevich，Evolutionary-Programming-Based Algorithm for Environmentally Constrained Economic Dispatch[J]. IEEE Trans on Power Systems，1998，13（2）：301-306.

[9] Momoh J A，Zhu J Z. Optimal Generation Scheduling Based on AHP/ANP[J]. IEEE Trans on Systems，Man & Cybernetics，Part B，2003，33，（3）：531－535.

[10] Momoh J A，Zhu J Z. Improved Interior Point Method for OPF Problems[J]. IEEE Trans on Power Systems，1999，14（3）：1114-1120.

[11] 尚金成. 节能发电调度的经济补偿机制研究[J]. 电力系统自动化，2009，33（3）：46-50.
SHANG Jin-cheng. Research on Economic Compensation Mechanism for Energy-saving Generation Dispatch Part One Design and Analysis of Economic Compensation Mechanism Based on Administrative Means[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009，33（3）：46-50.

[12] 尚金成. 兼顾市场机制与政府宏观调控的节能发电调度模式及运作机制[J]. 电网技术,2007，31（24）: 55-62.
SHANG Jin-cheng. Research on Energy-Saving Generation Dispatching Mode and Operational Mechanism Considering Market Mechanism and Government Macro-Control[J]. Power System Technology, 2007，31（24）: 55-62.

[13] 陈之栩，谢开，张晶，等. 电网安全节能发电日前调度优化模型及算法[J]. 电力系统自动化，2009，33（1）: 10-13,98.
CHEN Zhi-xu，XIE Kai，ZHANG Jing，et al. Optimal Model and Algorithm for Day-ahead Generation Scheduling of Transmission Grid Security Constrained Convention Dispatch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(1): 10-13,98.

[14] 胡建军. 基于节能发电调度和国际贸易理念的电力市场竞争机制[J]. 电力系统自动化，2008, 32(24): 35-38,73.
HU Jian-jun. A Novel Power Market Competition Mechanism Based on Energy-conservation Power Generation Dispatch and International Trade Concept[J]. Automation of Electric Power Systems，2008,32(24): 35-38,73.

[15] 施建华，谭素梅. 节能发电调度发电计划编制算法[J]. 电力系统自动化，2008, 32(24): 48-51.
SHI Jian-hua，TAN Su-mei. Algorithm of Energy Saving Generation Dispatch Scheduling[J]. Automation of Electric Power Systems，2008, 32(24): 48-51.

[16] 陈之栩，李丹，张晶. 华北电网安全节能发电优化调度系统功能设计[J]. 电力系统自动化，2008, 32(24): 43-47.
CHEN Zhi-xu，LI Dan，ZHANG Jing. Function Design for North China Grid Security Constrained Convention Dispatch Optimization System[J]. Automation of Electric Power Systems，2008,32(24): 43-47.

[17] Zhu J Z，Xiong X F. Optimal Reactive Power Control using Modified Interior Point Method[J]. Electric Power Systems Research，2003，66（4）：187-192.

收稿日期：2009-06-18； 修回日期：2009-07-27

作者简介：

赵维兴（1979-），男，博士研究生，主要研究方向为电力系统节能发电调度、优化调度算法及电网安全稳定分析计算；E-mail：zwx182@163.com

林　成（1975-），男，高级工程师，主要从事电力系统计划运行管理、节能发电调度工作；

孙　斌（1966-），男，高级工程师，主要从事电力系统分析与运行控制、节能发电调度工作。

（上接第 17 页　continued from page 17）

[12] 王朝瑞. 图论[M]. 北京：北京理工大学出版社，2002. 53, 75-98.
WANG Chao-rui. Graph Theory[M]. Beijing：Beijing Institute of Technology Press，2002. 53, 75-98.

[13] 王昆仑，李红. 数据结构与算法[M]. 北京：中国铁道出版社，2007. 331-332.
WANG Kun-lun, LI Hong. Data Structure and Algorithm[M]. Beijing：China Railway Publishing House，2007. 331-332.

收稿日期：2009-06-25； 修回日期：2009-08-10

作者简介：

何恒靖（1986-），男，硕士研究生，研究方向为电力系统仿真；

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

常喜强（1982-），男，硕士研究生，研究方向为电力系统运行与仿真。