基于灰色关联分析的自适应低频减载

柏丹丹，和敬涵，王小君，叶豪东

（北京交通大学，北京 100044）

摘要：针对当前低频减载方案常按频率跌落延时切除离线整定的负荷量、缺少对负荷特性的综合考虑而引起的欠切、过切等问题，提出以负荷频率效应系数、单位电能损失和负载率为决策指标对不同重要性级别下的负荷节点进行灰色关联分析排序，按关联度由大到小确定切负荷顺序。基于广域测量的系统初始频率变化率自适应估计系统功率缺额，在计及发电机和负荷的调节作用的同时计算切负荷总量，并按减载顺序主动分配。四种典型故障场景下的仿真结果表明所提方案能有效决策减载策略，以最小的减载量和减载代价获得了最优的频率动态恢复曲线，验证了可行性。

关键词：低频减载；灰色关联分析；减载排序；WAMS；初始频率变化率

Adaptive UFLS scheme based on grey correlation analysis

BAI Dan-dan, HE Jing-han, WANG Xiao-jun, YE Hao-dong

(Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The current under frequency load shedding (UFLS) scheme usually cuts the load of offline setting according to the frequency drop delay, and it ignores the load characteristics, which leads to the overcut and undercut problems. Grey correlation analysis is proposed to calculate correlation degree of shedding load with different importance level based on the indexes of load frequency regulation factor, unit power outage loss, and load rate. The load shedding order depends on the correlation degree. Considering system spinning reserve capacity and load regulation characteristics, the total shedding capacity is decided after using initial frequency change rate measured by WAMS technology to adaptively evaluate the system power gap. The total shedding capacity is assigned to corresponding load automatically in the order of load shedding. Four typical fault scenarios validate that the proposed scheme can decide the intelligent UFLS adaptively and obtain the optimum system dynamic frequency recovery characteristic curve with the minimum load shedding.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277009).

Key words: UFLS; grey correlation analysis; shedding order; WAMS; initial frequency change rate

中图分类号： TM712 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2014)06-0020-06

0 引言

电能不能大量存储的特性导致电力系统正常运行时必须保证电能生产与消耗的平衡，一旦系统出现有功缺额，电力系统频率会随之下降，严重时甚至会导致频率崩溃事故的发生。低频减载作为电力系统安全稳定的最后一道防线，是维持严重事故后系统频率稳定的校正控制手段[1-2]。目前电网中广泛采用的低频减载方案多通过离线计算系统可能遇到最严重方式下的功率缺额来分配各个轮次的减载负荷量，无法自适应于互联大系统运行方式多变、故障状态多变、不确定因素多等发展趋势[3-4]。近年来，发生在美国、俄罗斯尤其是印度大停电事故中都出现因低频减载装置的误动和拒动导致系统频率进一步跌落而引发系统崩溃的状况[5-6]。

为了提高低频减载的自适应性，文献[7]利用测量的动作时刻的频率变化率根据简化的系统频率响应模型估算系统缺额，再按照功率缺额的一定比例进行延时切负荷操作。该方法仍将全网负荷作为一个综合负荷来考虑，忽略了各节点负荷的差异性。文献[8]提出低频减载时优先切除频率调节效应系数小的负荷，将重要负荷放在减载末级，但并未将两者综合考虑。

基金项目：国家自然科学基金项目(51277009)；阿尔斯通-北京交通大学国际合作研究项目(R/T 5.1.4-D)

智能电网和广域测量技术[9-10]的发展为自适应低频减载提供了技术支撑，文献[11]基于 WAMS 测量系统惯性中心频率在 49.5 Hz 时的频率变化率来估计系统功率缺额作为切负荷总量，但由于发电机旋转备用容量的投入有一定的时延[12-13]，从而整定的切负荷总量与实际情况有所出入。

针对上述问题，提出用灰色关联分析法对参与减载的不同重要性级别下的负荷节点的频率调节效应系数、单位电能停电损失和负载率计算关联度排序，优先切除关联度大的负荷。基于广域测量的系统初始频率变化率来估计系统功率缺额，在计及发电机和负荷的调节效应的基础上计算切负荷总量。在尽可能保证系统稳定运行的前提下深层次地挖掘最经济、最快速和最高效的系统频率调控能力。

1　灰色关联分析排序算法

灰色关联分析的基本原理是通过对统计序列几何关系的比较来计算系统中多因素间的关联程度，序列曲线的几何形状越接近，则关联度越大，它对样本量的多少和样本有无规律要求较低，具有计算量小的优势[14]。将其应用到含多指标耦合的方案排序算法中：

1）确定规范化决策矩阵

利用各方案各指标的原始数据构建决策矩阵 $\boldsymbol{X}=\{x_{ij}\}_{m\times n}$，其中 $x_{ij}(i=1,2,\cdots,m,j=1,2,\cdots,n)$ 为方案 i 的指标 j 的属性值。选择每个评价指标中的最优值构成最优指标集作为比较的基准，记为 $H=[h_j,j=1,2,\cdots,n]$，其中 h_j 为指标 j 在诸方案中的最优值，若评价指标为极大型指标，最优值取该指标在各方案中的最大值，若为极小型指标则最优值取该指标在各方案中的最小值。以最优指标集规范化决策矩阵后得 $\boldsymbol{E}=\{e_{ij}\}_{m\times n}$。

$$\boldsymbol{E}=\begin{bmatrix} x_{11}/h_1 & x_{12}/h_2 & \cdots & x_{1n}/h_n \\ x_{21}/h_1 & x_{22}/h_2 & \cdots & x_{21}/h_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1}/h_1 & x_{m1}/h_2 & \cdots & x_{m1}/h_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中，$e_{ij}=x_{ij}/h_j$ 为规范化后的方案 i 的第 j 个决策指标的属性值。

2）计算关联系数

方案 i 的第 j 个决策指标与该指标的最优值之间的关联系数 $\xi_i(j)$ 的几何意义是比较曲线 $X(i)=\{x_{ij}\}_{1\times n},(j=1,2,\cdots,n)$ 与曲线 H 在 j 时刻的相对差值，计算公式为[15]

$$\xi_i(j)=\frac{\min\limits_i\min\limits_j\left|1-e_j(i)\right|+\rho\cdot\max\limits_i\max\limits_j\left|1-e_j(i)\right|}{\left|1-e_j(i)\right|+\max\limits_i\max\limits_j\left|1-e_j(i)\right|} \quad (2)$$

式中，ρ 为分辨系数，其作用在于提高关联系数之间的差异显著性，一般在 0~1 之间选取，通常取 $\rho=0.5$ [16]。

3）确定决策方案的排序

利用关联系数可以计算出方案 i 的关联度为

$$r_i=\frac{1}{n}\sum\nolimits_{j=1}^{n}\xi_i(j) \quad (3)$$

从而计算出 m 个决策方案的关联度结果矩阵 $\boldsymbol{R}=\{r_i,i=1,2,\cdots,m\}$。按关联度的数值从大到小排序得到关联序，即为参与的方案排序矩阵 $\boldsymbol{L}=\left\{\max\limits_i(R),\cdots,\min\limits_i(R)\right\}$。

2　基于灰色关联分析的切负荷排序

假定参与排序的切负荷节点总数为 m，即决策方案有 m 个，负荷频率效应系数、单位电能停电损失和负载率为对应的决策指标。在频率下降过程中，频率效应系数越大的负荷其吸收的功率减少的越多，应优先切除频率效应系数小的负荷，负荷频率效应系数的最优指标值应取 m 个节点中的最小值。负载率是指线路上实际运行负荷容量与线路承载的额定容量的比值，负载率越高表明线路长期容量利用率越高，负载率的最优指标值应取 m 个节点中的最小值。单位电能停电损失表示因电力供应中断而发生断电给用户造成的经济损失[17]，故最优决策指标值应选择 m 个节点中的最小值。

用电负荷按其重要性程度不同一般分为三级：Ⅰ级负荷中断供电将造成人身伤亡或政治、军事、经济上的重大损失，Ⅱ级负荷中断供电将造成严重停产、停工，局部地区交通堵塞，大部分城市居民的正常生活秩序被打乱等，Ⅲ级负荷短时停电造成的损失不大。在切负荷动作时为了尽可能减少停电代价应优先切除Ⅲ级负荷，在Ⅲ级可切负荷容量不足以平衡有功缺额的情况下再逐步切除Ⅱ级负荷和Ⅰ级负荷。假定每一个负荷节点的可切负荷均分为三级，针对每一级负荷下的以负荷频率效应系数、单位电能停电损失和负载率为决策指标的 m 个负荷节点进行灰色关联度排序，可以得到如下减载方案排序。

$$\boldsymbol{L}=\{\boldsymbol{L}_{\mathrm{III}},\boldsymbol{L}_{\mathrm{II}},\boldsymbol{L}_{\mathrm{I}}\}=$$
$$\{\max_i(\boldsymbol{R}_{\mathrm{III}}),...,\min_i(\boldsymbol{R}_{\mathrm{III}}),\max_i(\boldsymbol{R}_{\mathrm{II}}),...,\min_i(\boldsymbol{R}_{\mathrm{II}}),\max_i(\boldsymbol{R}_{\mathrm{I}}),...,\min_i(\boldsymbol{R}_{\mathrm{I}})\} \quad (4)$$

式中：$\boldsymbol{R}_{\mathrm{III}},\boldsymbol{R}_{\mathrm{II}},\boldsymbol{R}_{\mathrm{I}}$ 分别为Ⅲ级、Ⅱ级和Ⅰ级负荷的关联度结果矩阵；$\boldsymbol{L}_{\mathrm{III}},\boldsymbol{L}_{\mathrm{II}},\boldsymbol{L}_{\mathrm{I}}$ 分别为对应级别负荷的排序矩阵。

3　基于 WAMS 的切负荷总量决策和分配

3.1 切负荷总量的自适应决策

根据自适应低频减载的定义[7]，由系统频率响应模型可以估计系统功率不平衡量 P_Δ 为

$$P_\Delta = T\left.\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t}\right|_{t=0} \quad (5)$$

式中：$\left.\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t}\right|_{t=0}$ 为系统初始频率变化率；T 为发电机组的惯性时间常数。

考虑到系统频率的时空分布性[18]，用系统惯性中心频率变化率作为系统频率变化率。定义系统惯性中心频率为[7]

$$f_{\mathrm{COI}}=\frac{1}{T_\Sigma}\sum_{i=1}^{n}T_i f_i \quad (6)$$

式中：T_i 为第 i 台发电机的惯性时间常数，且 $T_\Sigma=\sum_{i=1}^{n}T_i$；$n$ 为系统发电机台数；f_i 为第 i 台发电机出口母线电压频率，可由 WAMS 系统获得。

在系统发生有功缺额故障之后，频率的跌落会引起发电机组的输出功率自动增加和负荷消耗的有功功率自动减少。因此，在整定切负荷总量时应充分考虑系统的旋转备用和负荷的调节能力，故整定切负荷总量 P_{shed} 为

$$P_{\mathrm{shed}}=P_\Delta-SR-K_{\mathrm{L}}\Delta f=T_\Sigma\left.\frac{\mathrm{d}f_{\mathrm{COI}}}{\mathrm{d}t}\right|_{t=0}-SR-K_{\mathrm{L}}\Delta f \quad (7)$$

式中：SR 为系统旋转备用容量；K_{L} 为负荷频率效应系数。

3.2 切负荷总量的分配

假定 m 个负荷节点中第 i 个负荷节点的重要性为Ⅰ级、Ⅱ级和Ⅲ级的负荷总量分别为 $P_{i\mathrm{I}}$、$P_{i\mathrm{II}}$ 和 $P_{i\mathrm{III}}$，从而可求得 m 个负荷节点的Ⅰ级、Ⅱ级和Ⅲ级的负荷总量分别 $P_{\mathrm{I}\Sigma}=\sum_{i=1}^{m}P_{i\mathrm{I}}$，$P_{\mathrm{II}\Sigma}=\sum_{i=1}^{m}P_{i\mathrm{II}}$ 和 $P_{\mathrm{III}\Sigma}=\sum_{i=1}^{m}P_{i\mathrm{III}}$。在自适应决策出切负荷总量之后根据负荷节点排序矩阵迅速分配切负荷容量，并直接切除相应负荷，流程如图 1 所示，其中，$\boldsymbol{L}_{\mathrm{III}},\boldsymbol{L}_{\mathrm{II}},\boldsymbol{L}_{\mathrm{I}}$ 分别为Ⅲ级、Ⅱ级和Ⅰ级负荷基于灰色关联分析的排序矩阵。

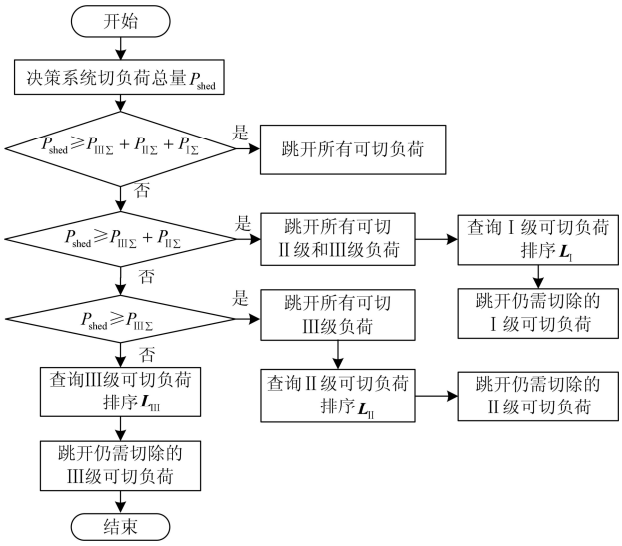

图 1 切负荷总量的分配流程图

Fig. 1 Decision-making flow of shedding capacity

4　仿真与分析

为验证所提方法的有效性，搭建如图 2 所示的 36 节点仿真系统模型，包含有 9 个负荷节点，每一负荷节点均包含Ⅰ级、Ⅱ级和Ⅲ级可切负荷。负荷数据如表 1 所示，K_{L} 为负荷的频率调节效应系数，c 为单位电能停电损失，单位为 RMB/MW，负载率 η 为百分数，P 为实时有功负荷大小，单位为 MW。由表 1 中信息可以计算得到Ⅰ级、Ⅱ级和Ⅲ级负荷的总容量分别 $P_{\mathrm{I}\Sigma}=629$ MW，$P_{\mathrm{II}\Sigma}=747$ MW 和 $P_{\mathrm{III}\Sigma}=1191$ MW。在选定的系统运行方式下，所有发电机组的有功出力为 2 653 MW，额定有功功率为 2 924 MW，系统有功负荷大小为 2 567 MW。

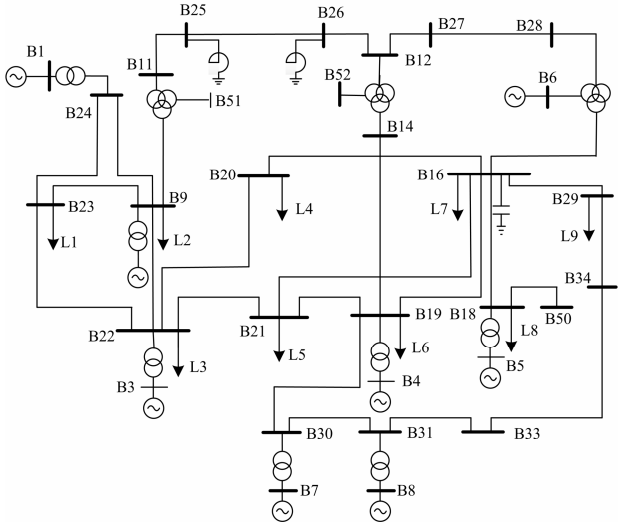

图 2 系统模型图

Fig. 2 Model of 36 nodes system

利用所有负荷节点的Ⅲ级负荷的K_{L}、C和η为决策指标构建决策矩阵

$$\boldsymbol{X}=\{x_{ij}\}_{9\times3}=\begin{bmatrix}2 & 1024 & 55.21\\ 1.7 & 809 & 49.26\\ 1.9 & 936 & 39.87\\ 2.4 & 1208 & 40.28\\ 1.6 & 1101 & 60.27\\ 2.3 & 958 & 52.09\\ 2.8 & 708 & 41.52\\ 2.1 & 1423 & 39.24\\ 1.5 & 988 & 41.68\end{bmatrix}$$

式中，$x_{ij}(i=1,2,\cdots,9;j=1,2,3)$为负荷节点$i$的第$j$个决策指标值。

优先切除负荷频率效应系数小的、平均切负荷代价小的和负载率小的，所以确定最优指标集$H=[h_j,j=1,2,3]=[1.5,708,39.24]$，其中$h_j$为第$j$个指标在诸方案中的最优值。按照最优指标集规范化决策矩阵后得$\boldsymbol{E}=\{e_{ij}\}_{m\times n}$，其中$e_{ij}=x_{ij}/h_j$。再按照公式（2）求得关联系数$\xi_i(j)$，关联系数矩阵为

$$\boldsymbol{G}=\{\xi_i(j)\}_{9\times3}=\begin{bmatrix}0.376 & 0.347 & 0.356\\ 0.442 & 0.438 & 0.399\\ 0.396 & 0.379 & 0.492\\ 0.314 & 0.294 & 0.487\\ 0.469 & 0.323 & 0.327\\ 0.327 & 0.370 & 0.378\\ 0.269 & 0.500 & 0.473\\ 0.358 & 0.250 & 0.500\\ 0.500 & 0.359 & 0.471\end{bmatrix}$$

由关联系数计算关联度后得到决策的结果矩阵为

$$\boldsymbol{R}_{\mathrm{III}}=[0.364,0.430,0.416,0.352,0.397,0.351,0.378,0.367,0.458]$$

方案排序矩阵$\boldsymbol{L}_{\mathrm{III}}=[L9,L2,L3,L5,L7,L8,L1,L4,L6]$

采用同样的方法计算$\boldsymbol{R}_{\mathrm{II}}$和$\boldsymbol{L}_{\mathrm{II}}$

$$\boldsymbol{R}_{\mathrm{II}}=[0.408,0.417,0.379,0.460,0.336,0.366,0.470,0.342,0.437]$$

$$\boldsymbol{L}_{\mathrm{II}}=[L7,L4,L9,L2,L1,L3,L6,L8,L5]$$

计算$\boldsymbol{R}_{\mathrm{I}}$和$\boldsymbol{L}_{\mathrm{I}}$

$$\boldsymbol{R}_{\mathrm{I}}=[0.356,0.384,0.362,0.382,0.319,0.401,0.426,0.346,0.385]$$

$$\boldsymbol{L}_{\mathrm{I}}=[L7,L6,L9,L2,L4,L3,L1,L8,L5]$$

结合电网特点和运行方式，设置4种典型预想故障场景如表2所示。

表1 系统负荷数据信息

Table 1 Data of system load

母线名称		B16	B29	B18	B19	B20	BU21	BU22	B23	B9
负荷名称		*L*1	*L*2	*L*3	*L*4	*L*5	*L*6	*L*7	*L*8	*L*9
Ⅰ	K_{L}	2.4	2.8	2.7	2.4	3.0	2.5	1.9	2.7	2.6
级	C	1 789	1 078	1 425	1 723	2 017	1 582	1 399	1 681	1 335
负	η	60.21	55.22	54.19	46.82	52.77	39.27	62.31	55.39	48.75
荷	P	50	80	90	16	52	10	100	31	200
Ⅱ	K_{L}	1.8	2.0	2.8	1.5	2.4	2.5	1.9	2.4	1.7
级	C	1 127	920	1 002	1 398	1 274	1 003	817	1 562	1 059
负	η	59.30	51.23	38.17	45.89	61.82	51.20	39.27	48.67	52.71
荷	P	150	100	140	30	10	10	38	200	69
Ⅲ	K_{L}	2.0	1.7	1.9	2.4	1.6	2.3	2.8	2.1	1.5
级	C	1 024	809	936	1 208	1 101	958	708	1 423	988
负	η	55.21	49.26	39.87	40.28	60.27	52.09	41.52	39.24	41.68
荷	P	300	340	200	40	10	50	88	56	107

表2 系统典型预想故障场景

Table 2 Typical scenarios of system faults

场景	1	2	3	4
P_{Δ}/MW	306	622	847	927
缺额百分比/%	11.53	23.45	31.93	34.94

表3为按照文献[19]整定的传统减载方案，共有7轮基本轮和一轮特殊轮，将其装设在系统的九个负荷节点。在表2所述的4种故障场景下分别仿真系统在11.53%、23.45%、31.93%和34.94%故障下传统减载方案和智能减载方案的动作情况和频率动态特性，如表4所示。在这四种故障场景下，传统减载方案和自适应减载方案动作之后系统频率都稳定在49.5 Hz以上，且两者的稳态频率很接近，但是传统方案却比自适应方案切除的负荷量分别多了42.04 MW、18.8 MW、40.3 MW、99 MW，即智能减载方案用更少的切负荷量达到了与该传统减载方案相同的频率恢复水平，说明了自适应减载方案在保证用户供电可靠性方面具有明显的优势。

表3 传统低频减载方案

Table 3 Traditional UFLS strategy

轮次	基一轮	基二轮	基三轮	基四轮	基五轮	基六轮	基七轮	特一轮
定值/Hz	49.25	49	48.75	48.5	48.25	48	47.75	49.25
减载量/%	3	3.4	3.8	4.2	4.6	5	5.4	3
延时/s	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	20

表 4 不同故障场景下减载动作

Table 4 UFLS action under different faults

	场景	1	2	3	4
传	切负荷总量/MW	77.04	369.8	616.3	755
统	稳态频率/Hz	49.61	49.70	49.74	49.78
方	最低频率/Hz	49.17	48.3	47.73	47.38
案	动态时间/s	45.15	32.57	41.36	32.93
	恢复至 49.5 Hz 的时间/s	15.83	12.85	11.44	10.95
自	切负荷总量/MW	35	351	576	656
适	稳态频率/Hz	49.60	49.66	49.74	49.78
应	最低频率/Hz	49.15	49.01	48.98	49.01
方	动态时间/s	25.51	23.29	17.54	23.82
案	恢复至 49.5 Hz 的时间/s	20.01	11.06	9.50	10.11

图 3 和图 4 分别为典型场景中故障缺额最小的场景 1 和故障缺额最大的场景 4 下系统的频率动态变化曲线，结合表 4 中的数据，针对系统频率自故障跌落至回升至安全范围 49.5 Hz 以上的动态过程（包括最低频率点以及动态过程的持续时间等），自适应方案恢复的更平滑、快速和高效，为系统中大多数设备在故障穿越过程中的良好运行状态创造了条件，有效降低了故障带来的安全隐患和经济损失。

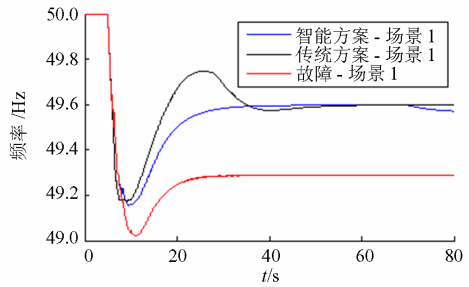

图 3 场景 1 下减载后系统频率动态曲线

Fig. 3 Frequency line under scenario 1

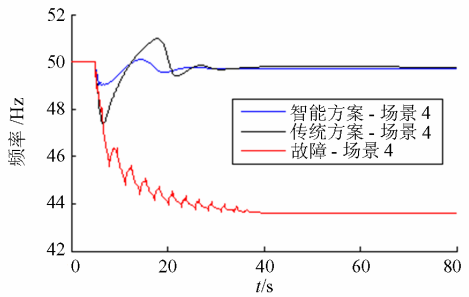

图 4 场景 4 下减载后系统频率动态曲线

Fig. 4 Frequency line under scenario 4

5　结论

本文在充分考虑系统发电机的旋转备用容量和负荷调节特性的基础上结合广域量测技术提出了一种自适应整定切负荷总量的低频减载方案。多种故障场景下的仿真案例表明该方案在应对不同有功缺额扰动时，利用灰色关联分析法有针对性地切除了负载率低、切负荷代价小的不重要负荷，能以比传统减载方案更小的减载量和更优化的频率恢复特性曲线使系统在更短的时间趋于稳定，为研究当前智能电网中系统频率控制手段开拓了思路。由于文中的切负荷操作是在整定切负荷总量后的一次性直接切除动作，今后还需进一步研究扰动发生位置、瞬时电压变化等对切负荷排序的影响，在可靠切负荷的前提下，减弱切负荷动作对电力系统的冲击。

参考文献

[1] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架（一）从孤立防线到综合防御[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 8-15.
XUE Yu-sheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts part I from isolated defense lines to coordinated defending[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 8-15.

[2] 李爱民, 蔡泽祥. 基于轨迹分析的互联电网频率动态特性及低频减载的优化[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 171-177.
LI Ai-min, CAI Ze-xiang. Frequency dynamics analysis and load shedding assessment based on the dynamic simulation trajectory of interconnected power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 171-177.

[3] 何恒靖, 解大, 常喜强, 等. 低频减载方案基础集的设计及 TOPSIS 多属性决策[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 7-15.
HE Heng-jing, XIE Da, CHANG Xi-qiang, et al. Novel under frequency load shedding alternative set design method and multiple attribute decision making based on TOPSIS[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(14): 7-15.

[4] 刘少华, 王超, 安军, 等. 计及频率静特性的低频减载方案的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 140-144.
LIU Shao-hua, WANG Chao, AN Jun, et al. Study of under-frequency load shedding scheme based on frequency static characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 140-144.

[5] 曾鸣, 李红林, 薛松, 等. 系统安全背景下未来智能电网建设关键技术发展方向——印度大停电事故深层次原因分析及对中国电力工业的启示[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 175-181.
ZENG Ming, LI Hong-lin, XUE Song, et al. Key

technologies of future smart grid construction based on power system security: a view of blackout in India and experience and enlightenment to power industry in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 175-181.

[6] 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 Hong-lei, WU Jun-yong, WU Lin-feng. Dynamic partitioning and active-split strategy in power system emergency control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 224-230.

[7] ARULAMPALAM A, SAHA T K. Fast and adaptive under frequency load shedding and restoration technique using rate of change of frequency to prevent blackouts[C] // Power and Energy Society General Meeting, 2010: 1-8.

[8] 李宇琦, 黄彦全, 何秋玲, 等. 考虑负荷频率调节效应系数的低频减载方案研究[J]. 电气开关, 2012(5): 34-37.
LI Yu-qi, HUANG Yan-quan, HE Qiu-ling, et al. Research of low frequency load shedding project considering load frequency adjustment effect coefficient[J]. Electric Switcher, 2012(5): 34-37.

[9] 杨春生, 周步祥, 林楠, 等. 广域保护研究现状及展望[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 147-149.
YANG Chun-sheng, ZHOU Bu-xiang, LIN Nan, et al. Research current status and prospect of wide-area protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 147-149.

[10] 王振树, 李林川, 牛丽. 基于贝叶斯证据框架的支持向量机负荷建模[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 127-133.
WANG Zhen-shu, LI Lin-chuan, NIU Li. Load modeling based on support machine based on Bayesian evidence framework[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 127-133.

[11] 侯王宾, 刘天琪, 李兴源. 基于综合权值和广域测量的低频减载[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(21): 70-75.
HOU Wang-bin, LIU Tian-qi, LI Xing-yuan. Under-frequency load shedding based on comprehensive weight and wide area measurement system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 70-75.

[12] 高翔. 现代电网频率控制应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[13] 赵渊, 吴小平, 谢开贵. 基于频率动态特性的电力系统频率失稳概率评估[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 212-220.
ZHAO Yuan, WU Xiao-ping, XIE Kai-gui. Probabilistic assessment for frequency instability of power system based on frequency dynamic characteristic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 212-220.

[14] 沈阳武, 彭晓涛, 施通勤, 等. 基于最优组合权重的电能质量灰色综合评价方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 67-73.
SHEN Yang-wu, PENG Xiao-tao, SHI Tong-qin, et al. A grey comprehensive evaluation method of power quality based on optimal combination weight[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 67-73.

[15] 吴小萍, 陈秀芳. 线路方案灰色优选模型及其应用研究[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(7): 101-105.
WU Xiao-ping, CHEN Xiu-fang. A grey optimal selection model and its application in multi-objective decision making of line schemes[J]. System Engineering-Theory & Practice, 2002, 22(7): 101-105.

[16] 杨婴, 张新全, 李向林, 等. 应用灰色关联度综合评价17个不同秋眠级苜蓿的生产性能[J]. 草业学报, 2009, 18(5): 67-72.
YANG Zhao, ZHANG Xin-quan, LI Xiang-lin, et al. Applying grey correlative degree analysis to comprehensively evaluate growth performance of 17 types of alfalfa with different fall-dormancy grades[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(5): 67-72.

[17] 陈俊红, 胡俊祥. 缺电成本及其调查估算方法的探讨[J]. 青海电力, 2006, 25(3): 1-4.
CHEN Jun-hong, HU Jun-xiang. Study on the power outage cost and its survey estimation methods[J]. Qinghai Electric Power, 2006, 25(3): 1-4.

[18] 张恒旭, 刘玉田. 电力系统动态频率响应时空分布特征量化描述[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 64-70.
ZHANG Heng-xu, LIU Yu-tian. Quantitative description of space-time distribution features of dynamic frequency response[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 64-70.

[19] DL428-91 电力系统自动低频减负荷技术规定[S]. 北京: 水利电力出版社, 1991.

收稿日期：2013-06-10；　修回日期：2013-08-08

作者简介：

柏丹丹（1989-），女，硕士研究生，研究方向为电力系统保护与控制；E-mail: 11121572@bjtu.edu.cn

和敬涵（1964-），教授，博士生导师，从事智能电网、电力系统保护与控制、电动汽车与V2G等方面的研究工作。