DOI：10.3969/j.issn.1000-1026.2012.06.003

考虑系统频率恢复性能的低频减载参数优化模型

汪 震[1]，宋晓喆[1]，甘德强[1]，孙维真[2]，张 洁[3]

（1. 浙江大学电气工程学院，浙江省杭州市 310027；2. 浙江省电力调度通信中心，浙江省杭州市 310008；
3. 杭州市电力局调度所，浙江省杭州市 310007）

摘要：在研究传统的低频减载参数优化控制代价最小模型的基础上，提出一种兼顾考虑系统频率恢复性能和切负荷量最小的低频减载参数优化模型，同时考虑了各种预设场景的风险概率因素。基于模型特点，采用差分进化算法来求解问题。针对优化问题的稳态约束和超调约束，提出用分段惩罚函数法来提高差分进化算法的执行效率。实际的电力系统算例仿真表明，提出的模型比控制代价最小模型的综合表现更佳，初步论证了模型和算法的可行性和有效性。

关键词：低频减载；频率恢复；风险；差分进化算法

0 引言

在中国经济高速增长的背景下，电网互联规模不断扩大，大区互联已经成为中国电网未来发展的趋势。如何提高电网的安全稳定水平、防止大面积停电事故的发生，是大电网运行中的核心内容。在 2001 年修订的《电力系统安全稳定导则》里明确了中国电力系统安全稳定运行的三级安全稳定标准指导思想[1]。为实践这个导则，中国电力系统正按照“三道防线”来规划和实施电力系统建设和运行调度管理，以确保整个电网在遇到各种事故时能安全稳定运行[2-4]。“三道防线”中的第 3 道防线就是要保证电力系统在严重复杂的故障下，防止长时间、大范围的停电及防止事故扩大，以免造成巨大的经济损失和社会负面影响。低频减载（UFLS）是一种电力系统发生严重事故后的校正控制手段，其控制目标是避免系统因事故发展造成频率进一步下降而导致的大规模停电，是解决预防控制和紧急控制欠控或拒动的有效控制手段之一[5]。

UFLS 决策优化是基于一定约束条件的 UFLS 装置参数优化问题，优化的参数包括装置布点、轮次、延时、各轮减载量等[5]。由于问题本身的重要性，越来越多的学者开始关注 UFLS 决策优化协调问题[5-11]。文献[6]提出一种基于线性规划模型的 UFLS 模型，考虑了负荷频率特性指数影响，使切负荷量最小。文献[7]提出一种基于某些风险指标来确定低压减载（UVLS）参数的方法。文献[8]提出首先用图论方法缩小决策空间，将问题转化为求解 UFLS 的满足性问题，然后基于“搜索＋校验”方法对问题进行求解。文献[9]提出一种考虑典型工况和故障集风险概率的 UFLS 优化模型，按风险控制代价（切负荷量）优化各轮减载量。文献[10]提出以最小风险过切/欠切代价为目标的 UFLS 参数优化模型，采用解耦迭代优化方法优化 UFLS 装置的布点及各轮减载量。文献[5]对近来国内外 UFLS/UVLS 方面的研究工作作了系统而深入的综述，展望了相关领域的发展方向。

UFLS 是一种轨迹驱动的控制方式，根据国外自适应 UFLS 的研究结果，系统频率的暂态过程与系统的切负荷量有紧密联系，直接反映系统频率在恢复过程中是否出现超调现象[11]。本文提出一种基于轨迹的 UFLS 综合性价比模型，一方面考虑切负荷量最小，另一方面考虑优化频率恢复过程中的暂态性能，即对控制代价和控制过程中的系统性能表现进行综合考虑，同时考虑各种预设场景的风险概率因素。本文提出的方法可由现有的一些高级应用软件（如 BPA）来实现，用于解决大规模电力系统的实际问题。

1 UFLS 模型

1.1 模型Ⅰ：控制代价最小模型

UFLS 的一个常用优化目标是使频率下降过程中的控制代价最小，即区域内的负荷损失最小[5]。如果同时考虑某种场景（运行方式和故障的组合）的发生概率[9-10]，则相应的数学模型可表示为：

收稿日期：2011-03-04；修回日期：2011-10-28。
中国博士后科学基金资助项目（20090461354）；中央高校基本科研业务费专项资金资助项目（2011QNA4012）；浙江省电力公司科技项目“电网智能计算及分析系统”。

$$J_1 = \min_{\{T_l, R_l\}} \sum_{q \in C} \lambda_q \left(\sum_{p \in S} \sum_{l=1}^{L} \Delta P_{p,q}^{(l)} \right) \tag{1}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{p \in S} \Delta P_{p,q}^{(l)} \leqslant S_l \quad \forall l \tag{2}$$

$$|\Delta f(t_f)| < \delta \tag{3}$$

$$f(t) < 51 \tag{4}$$

$$T_{l,\min} \leqslant T_l \leqslant T_{l,\max} \tag{5}$$

$$R_{l,\min} \leqslant R_l \leqslant R_{l,\max} \tag{6}$$

式中：$p \in S$ 表示所有给定的 UFLS 装置负荷控制母线集 S 中第 p 个负荷索引；$q \in C$ 表示一组 UFLS 参数优化的预想"工况-故障"场景集合 C 中第 q 个场景；λ_q 为相应场景出现的概率，作归一化处理后使得 $\sum_q \lambda_q = 1$；$l = 1, 2, \cdots, L$，表示区域设定的 L 个 UFLS 轮次；$\Delta P_{p,q}^{(l)}$ 为第 p 个负荷在第 q 个场景下的第 l 轮次的切载量；$\Delta f(t_f) = f(t_f) - f_0$，其中 f_0 为额定频率，$f(t_f)$ 为暂态仿真终止时刻 t_f 对应的频率；δ 为频率偏差的上限；S_l 为第 l 轮次切负荷限额，即第 l 轮次最大总削减量，本文中取为总负荷与第 l 轮次最大削减百分比的乘积；T_l 和 R_l 分别为第 l 轮次的 UFLS 装置延时值及减负荷百分比；$T_{l,\max}$ 和 $T_{l,\min}$ 分别为第 l 轮次的 UFLS 装置延时值上、下限；$R_{l,\max}$ 和 $R_{l,\min}$ 分别为第 l 轮次的 UFLS 装置减负荷百分比上、下限。

本文的研究假定 UFLS 装置的安装地点已经确定，并按照中国电网中普遍使用的 6 轮次 UFLS 设置条件，暂不考虑特殊轮次的优化，待优化的 UFLS 参数包括每一轮次的延时和减载比例。本文中所使用的参数范围设置如表 1 所示，其中的参数采用中国版 BPA 综合计算程序中规定的格式。

表 1　UFLS 优化参数范围
Table 1　Parameter limits of UFLS

l	频率定值/Hz	$T_{l,\min}$/s	$T_{l,\max}$/s	$R_{l,\min}$/%	$R_{l,\max}$/%
1	49.00	0.2	0.5	10	15
2	48.75	0.2	0.5	10	15
3	48.50	0.2	0.5	10	15
4	48.25	0.2	0.5	3	10
5	48.00	0.2	0.5	3	10
6	47.50	0.2	0.5	2	5

在模型Ⅰ中，UFLS 问题可描述为：通过适当的参数设置，在满足相关约束条件的基础上使各种预想场景下的负荷损失量最小，即综合控制代价最小。式(2)表示系统每轮次减负荷总量的上限约束。式(3)表示系统的稳态频率限制，即系统在所有预想场景下的最终稳态频率值应在允许范围内。如文献[12]规定：稳态运行时，电力系统的频率偏差限值为±0.2 Hz，小容量系统允许频率偏差限值为±0.5 Hz。式(4)表示系统在频率恢复过程中不能出现频率超调，以免引起过切负荷。如文献[13]中规定：孤岛系统频率升高或因切负荷引起恢复时的频率过调，其最大值不应超过 51 Hz。式(5)和式(6)表示每轮次 UFLS 装置的参数约束。

1.2　模型Ⅱ：综合性价比优化模型

在自动控制理论中，系统暂态过程的性能(如稳定时间和过冲特性等)都可以通过其轨迹偏差程度进行定量评估。为此，将这种思想用于评价各种减载方案在不同预想场景下的暂态稳定性能。使用累加总变化(ATV)指标 F_{ATV} 来评估频率在减载恢复过程中的偏移程度[14]：

$$F_{\text{ATV}} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} \int_{t_1}^{t_{\text{sim}}} |\Delta f(t)| \, \mathrm{d}t \tag{7}$$

式中：t_1 为轨迹曲线的起始积分时间；t_{sim} 为仿真结束时间；M 为频率观测点数。

考虑到暂态过程中区域内不同地点的频率差异，式(7)评估了 M 个频率观测点的均值，其中 $m = 1, 2, \cdots, M$，表示第 m 个频率观测点。在研究中经过反复测试发现，对于 UFLS 过程中常见的过调现象，t_1 取 UFLS 第 1 轮次开始动作后频率第 1 次回到 50 Hz 的时刻，此时能取得较好的优化效果；如果 UFLS 动作后系统不能回到 50 Hz，即系统频率出现欠调，则 t_1 取 UFLS 第 1 轮次开始动作后频率第 1 次回到 49 Hz 对应的时刻。

式(7)主要包含频率偏差曲线对时间的积分，因此 F_{ATV} 值是一个无量纲的量。显然函数值越小，在 t_1 之后频率的振荡总体偏差越小，系统的频率恢复性能越好。另外，如果在频率恢复过程中出现超调现象，F_{ATV} 值会相应较大(过冲严重)。因此，F_{ATV} 值从某种程度上可以反映频率恢复过程中的超调程度。

如果在 UFLS 参数优化中既考虑系统恢复过程中的动态性能，又考虑尽量减少控制代价，即性价比因素，则能较全面地评估 UFLS 参数优化方案。将上述 2 个模型结合，得到如下加权模型：

$$J_2 = J_1 F_{\text{ATV}} = \min_{\{T_l, R_l\}} \sum_{q \in C} \lambda_q \left(\frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} \int_{t_1}^{t_{\text{sim}}} |\Delta f(t)| \, \mathrm{d}t \right) \cdot \sum_{p \in S} \sum_{l=1}^{L} \Delta P_{p,q}^{(l)} \tag{8}$$

s.t. 式(2)至式(6)

式(8)中将 J_1 与 F_{ATV} 直接相乘，主要考虑到两者的趋小偏好特性。

2　基于差分进化算法的求解方法

2.1　差分进化算法

式(1)、式(8)及其约束条件组成的优化问题是

高度非线性的复杂优化问题,它们的目标函数值计算内含一次暂态仿真计算,同时,目标函数对参数的梯度没有显式表达式,是基于梯度的传统优化算法无法求解的问题。这里采用差分进化[15-16]算法来求解本文的优化问题,算法的主要原理见附录 A。在设计差分进化算法时采用实数编码,在解码时对延时参数采用实数取整,削减量采用四舍五入保留有效位数进行处理。在应用差分进化算法时,为了提高计算效率,加快算法搜索过程,拟对优化模型的稳态约束条件和超调约束条件通过惩罚函数法进行"软化"处理,既保证了种群进化的延续性,也符合电力系统的实际情况。

2.2 约束特殊处理

1)稳态约束

在本文中,采用的分段稳态约束处理规则为:

$$J_1=\begin{cases}J_1 & |\Delta f(t_f)|\leqslant 0.2\\ J_1+\beta_1 P_{\text{total}} & -0.5<\Delta f(t_f)<-0.2\\ J_1+\beta_2 P_{\text{total}} & 0.2<\Delta f(t_f)<0.5\\ J_1+\infty & \text{其他}\end{cases}\tag{9}$$

式中:P_{total}为区域总负荷;β_1,β_2 为百分比系数。

当稳态频率偏差在[−0.5 Hz,−0.2 Hz]时,控制代价目标函数在原有基础上增加对欠调的惩罚项,其值等于 $P_{\text{total}}\beta_1$,β_1 取 5%;当稳态频率偏差在[0.2 Hz, 0.5 Hz]时,控制代价目标函数在原有基础上增加对超调的惩罚项,β_2 取 10%;当稳态频率偏差绝对值大于 0.5 Hz 时,控制代价目标函数加一个极大惩罚项,表示所对应的 UFLS 方案是不可接受的。

2)超调约束

除上述对稳态超调处理之外,在暂态过程中出现超调时,本文不把频率小于 51 Hz 作为一种硬约束,而是作为一种软约束。式(7)的核心是部分频率偏差曲线积分,频率恢复过程的超调现象如图 1 所示。

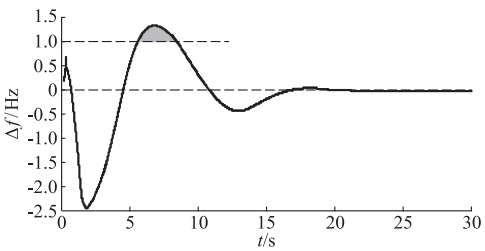

图 1 频率恢复过程的超调现象
Fig. 1 Over-shedding phenomenon during frequency dynamics

当频率偏差曲线越过超调约束时(如图 1 阴影部分所示),采用的分段处理规则为:

$$F_{\text{ATV}}=\begin{cases}F_{\text{ATV}} & \Delta f(t)\leqslant 1.0\\ F_{\text{ATV}}+\int_{t_{\Delta f=1.0}}^{t_{\Delta f=1.2}}|\Delta f(t)|\,\mathrm{d}t & 1.0<\Delta f(t)\leqslant 1.2\\ F_{\text{ATV}}+4\int_{t_{\Delta f=1.2}}^{t_{\Delta f=1.5}}|\Delta f(t)|\,\mathrm{d}t & 1.2<\Delta f(t)\leqslant 1.5\\ F_{\text{ATV}}+\infty & \Delta f(t)>1.5\end{cases}\tag{10}$$

式中:$t_{\Delta f=1.0}$,$t_{\Delta f=1.2}$ 和 $t_{\Delta f=1.5}$ 分别为频率过调量 Δf 达到 1.0 Hz,1.2 Hz 和 1.5 Hz 时对应的时刻。

式(10)对出现超调的频率偏差曲线的积分面积作特殊处理,按不同的频率超调区间乘以不同的惩罚倍数予以惩罚,超调程度越重则倍数越大。当频率过调至[1.0 Hz,1.2 Hz]区间时,将过调面积乘以 2;当频率过调至[1.2 Hz,1.5 Hz]区间时,将过调面积乘以 5;当频率过调至 1.5 Hz 之外时,类似式(9)的处理方法,在性能指标值中增加一个极大惩罚项,表示所对应的 UFLS 方案是不可接受的。

2.3 差分进化算法求解步骤与实现

差分进化算法流程见附录 A 图 A1,求解步骤如下。

1)初始化:随机产生 N_{P} 个个体,对每一个个体的目标函数进行评估,并得到其中的最优个体 x_{best}。

2)繁衍:对于每个父代个体,根据差异进化算子产生其子个体,如果子个体不在参数范围内,将采用中点微调策略[16]修正。

3)选择:每个子个体都同其父个体竞争,胜出个体保留成为下一代的父代。

4)重复步骤 2 和步骤 3,直到满足算法终止条件。

在差分进化算法实现中,因为不需要问题相关的梯度信息,差分进化算法可以与一些大型商业软件联合实现对这类问题的求解[17]。本文从数学建模到算法设计都没有涉及问题相关的梯度信息,每次目标函数值的计算都对应一次特定 UFLS 参数下的暂态仿真计算,可由基于支持 UFLS 暂态仿真计算的软件(如 BPA)来实现[18]。

3 算例分析

3.1 仿真计算

本文用上述方法解决一个实际系统的 UFLS 参数优化问题。某实际电力系统 2009 年的网架示意图如图 2 所示。

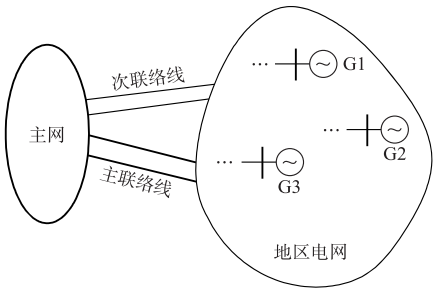

图 2　某实际电力系统的网架示意图
Fig. 2　Sketch diagram of an actual power system

图 2 中，地区电网主要通过双回 220 kV 交流线（主联络线）与主网互联；地区电网与主网之间还通过另一双回线互联（次联络线），一般情况下线上交换功率较少。地区电网内有 3 台主力发电机（G1，G2，G3），区内允许的稳态频率偏差限值为±0.5 Hz。本文将研究地区电网的 UFLS 参数优化及系统经历大扰动后 UFLS 控制动作的效果和频率恢复性能，特别讨论地区电网在孤岛和联网 2 种运行方式下的表现。

对地区电网中 12 个负荷点的 UFLS 装置进行参数优化，并将这些负荷点母线频率选为暂态仿真过程中的频率观测点。在研究中假定所有的 UFLS 装置参数设置一致，暂态仿真计算时间取 30 s。在整个算法实现中，上层差分进化算法采用 Python 语言（一种简单而功能强大的解释性计算机语言）实现，底层暂态仿真计算基于 BPA 综合计算程序。本文中的差分进化算法参数设置如下：种群规模为 50，最大代数为 80，采用收缩因子 $K=F=0.85$ 的简单策略[16,19]来求解 UFLS 参数优化问题。根据电网特点，设置预想故障为：①主联络线三永故障 6 周期跳双回线；②次联络线双线检修停运；③机组 G1 和 G2 全停；④机组 G3 全停。结合系统典型的运行方式，UFLS 参数优化的典型场景如表 2 所示。

表 2　UFLS 参数优化的典型场景
Table 2　Typical scenarios for UFLS optimization

场景	总负荷/MW	有功缺额/MW	缺额百分比/%	故障	发生概率/(次·a)	备注
1	890.26	330.26	37.10	①+②	0.03	孤网
2	830.76	270.76	32.59	①+②	0.03	孤网
3	436.42	66.42	15.22	②+③	0.03	联网
4	465.26	65.26	14.03	②+④	0.03	联网
5	635.26	75.26	11.85	①+③	0.01	联网

表 2 中前 2 个场景是地区电网孤网运行方式，另外 3 个是地区电网联网运行方式。按 2 种 UFLS 参数优化模型进行计算，不同模型的差分优化算法迭代过程如图 3 所示。

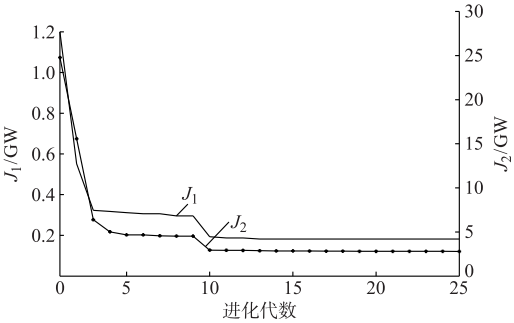

图 3　算法迭代过程
Fig. 3　Processes of algorithm iteration

从图 3 可以看出，在迭代过程中，差分优化算法能够快速地收敛于最优值。

3.2　结果讨论

优化后的 UFLS 参数值如表 3 所示。

表 3　UFLS 参数优化结果
Table 3　Results of UFLS optimization

l	频率定值/Hz	T_l/s		R_l/%	
		J_1	J_2	J_1	J_2
1	49.00	0.20	0.20	11	8
2	48.75	0.24	0.20	8	8
3	48.50	0.20	0.20	8	8
4	48.25	0.28	0.20	3	3
5	48.00	0.46	0.20	3	3
6	47.50	0.24	0.20	2	2

应用表 3 中的参数分别对表 2 中的系统典型工况和预想场景进行暂态仿真计算，5 种场景在暂态仿真过程中的 UFLS 参数优化结果比较如表 4 所示。

表 4　UFLS 参数优化效果比较
Table 4　Comparison of UFLS parameter optimization effect

场景	切负荷量/MW		F_{ATV}		$\Delta f(t_f)$/Hz	
	模型Ⅰ	模型Ⅱ	模型Ⅰ	模型Ⅱ	模型Ⅰ	模型Ⅱ
1	199.15	182.08	7.620	3.823	0.240 3	0.1038
2	158.75	158.75	10.300	10.950	0.329 8	0.329 5
3	119.49	119.49	21.010	21.160	0.495 8	0.495 8
4	76.82	64.36	8.801	5.240	0.274 6	0.146 5
5	29.25	21.27	7.300	4.126	0.144 3	0.144 1

1）孤网方式

孤网方式下的场景 1 和 2 中，地区电网受电比例较大，分别达到 37.10%和 32.59%（见表 2），所以它们的切负荷量要高于联网方式。在场景 1 中（见表 4），模型Ⅱ的切负荷量比模型Ⅰ要少 17.07 MW，相应的 F_{ATV}值、稳态频率偏差比模型Ⅰ少得多。场景 2 中，2 种模型的切负荷量、F_{ATV}值和稳态频率非常接近。

2）联网方式

联网方式下的场景 3，4，5 所对应的功率缺额在

11.85%～15.22%之间,地区电网发生相应故障后仍能得到主网的功率支援。在场景3下,2种模型的切负荷量及稳态频率相等,而模型Ⅱ的F_{ATV}值略大于模型Ⅰ。在场景4和5下,模型Ⅱ的结果均明显优于模型Ⅰ,尤其在场景4中,模型Ⅱ的各项指标显著优于模型Ⅰ。

综合来说,相比仅使用控制代价最小为目标的UFLS方案(模型Ⅰ),综合性价比优化模型(模型Ⅱ)能够进一步考虑在切负荷过程中的暂态频率的恢复性能,得出的UFLS方案综合表现更佳。上述现象也进一步说明了系统暂态过程的表现与切负荷量和系统频率是否存在过调有紧密联系。需要指出的是,不同场景的F_{ATV}值没有直接可比性,这是因为UFLS是轨迹驱动的控制,不同的场景,实际驱动的UFLS动作轮次可能不相同;某些场景下,部分UFLS后续轮次不会动作。这也解释了表4中出现部分负荷水平低的场景的F_{ATV}值比负荷水平高的场景的F_{ATV}值大的情况。

场景1和场景4在某观察点的暂态过程频率曲线如图4所示,分别对应地区电网的孤网和联网运行方式。可以观察到,通过UFLS控制,地区电网在2种运行方式下的频率都能较好地得到恢复。综合性价比方案的频率恢复过程要比控制代价方案表现好,前者在暂态过程中的过冲要小于后者,稳态频率偏差也小于后者,进一步验证了表4中的内容。

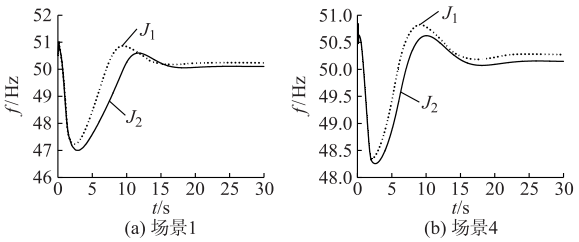

图4 2种代表场景的暂态过程

Fig. 4 Frequency transient processes in two representative scenarios

4 结语

UFLS/UVLS是中国电网“三道防线”的一个重要环节,避免了系统因事故发展造成系统频率/电压下降而导致的大规模停电。本文提出了一种UFLS综合性价比优化模型,模型基于扰动轨迹且不需要梯度信息,能够基于现有的电力系统高级应用软件实现本文提出的求解方法。实际电力系统算例的研究结果表明,对比传统的控制代价最小模型,本文所提出的模型能综合考虑性价比因素,优化得到的UFLS方案综合表现更佳。另外,模型中考虑了各种预设场景的风险概率因素,能够适应未来综合防御体系中基于轨迹量化分析和风险控制的发展方向。

本文提出的UFLS参数优化模型是一种多场景条件下综合考察性能和切负荷量的优化模型,在评价单一指标(如性能或切负荷量)时,其结果可能略逊于传统的控制代价最小模型。综合优化模型的价值在于,它考虑了系统频率恢复过程中的频率暂态过程和与系统切负荷量紧密相关的因素。必须指出,本文中的许多工作还有待进一步深入探索,如考虑如何在差分进化算法停滞阶段,改善其种群多样性和收敛性。如何考虑UFLS装置与安控装置的协调优化等,是今后值得研究的课题。

附录见本刊网络版(http://aeps.sgepri.sgcc.com.cn/aeps/ch/index.aspx)。

参考文献

[1] DL 755—2001 电力系统安全稳定导则[S].北京:中国电力出版社,2001.

[2] 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):8-16.
XUE Yusheng. 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): 8-16.

[3] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架:(二)广域信息、在线量化分析和自适应优化控制[J].电力系统自动化,2006,30(2):1-10.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part Ⅱ reliable information, quantitative analyses and adaptive controls[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 1-10.

[4] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架:(三)各道防线内部的优化和不同防线之间的协调[J].电力系统自动化,2006,30(3):1-10.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part Ⅲ optimization and coordination of defense-lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 1-10.

[5] 薛禹胜,任先成,WU Q H,等.关于低频低压切负荷决策优化协调的评述[J].电力系统自动化,2009,33(9):100-107.
XUE Yusheng, REN Xiancheng, WU Q H, et al. A review on optimization and coordination of under frequency/voltage load shedding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 100-107.

[6] 李秀卿,蔡泽祥.电力系统低频减载控制优化算法[J].电力系统自动化,1998,22(10):23-25.
LI Xiuqing, CAI Zexiang. An optimal algorithm of low frequency load shedding in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(10): 23-25.

[7] 戴剑锋,朱凌志,周双喜,等.基于风险的低压减载策略问题研究[J].中国电机工程学报,2006,26(19):18-22.
DAI Jianfeng, ZHU Lingzhi, ZHOU Shuangxi, et al. A risk-based study on under voltage load shedding schemes[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 18-22.

[8] 余庆媛,沈沉,乔颖,等.电力系统低压减载和低频减载协调控制

策略[J]. 电力系统自动化，2008，32(23)：23-27.
SHE Qingyuan，SHEN Chen，QIAO Ying，et al. A coordinated load shedding scheme for both under-voltage and under-frequency load shedding[J]. Automation of Electric Power Systems，2008，32(23)：23-27.

[9] 徐泰山，李碧君，鲍颜红，等. 考虑暂态安全性的低频低压减载量的全局优化[J]. 电力系统自动化，2003，27(22)：12-15.
XU Taishan，LI Bijun，BAO Yanhong，et al. Optimal parameter-setting of under-frequency and under-voltage load shedding for transient security[J]. Automation of Electric Power Systems，2003，27(22)：12-15.

[10] 任先成，薛禹胜，WU Q H，等. 低频低压切负荷布点及轮次的优化与协调[J]. 电力系统自动化，2009，33(11)：1-7.
REN Xiancheng，XUE Yusheng，WU Q H，et al. Optimization and coordination of UF/UVLS placement and multi-step load shedding[J]. Automation of Electric Power Systems，2009，33(11)：1-7.

[11] 赵强，刘肇旭，张丽. 对中国低频减载方案制定中若干问题的探讨[J]. 电力系统自动化，2010，34(11)：48-53.
ZHAO Qiang，LIU Zhaoxu，ZHANG Li. Discussions on the several problems of under-frequency load shedding scheme in China[J]. Automation of Electric Power Systems，2010，34(11)：48-53.

[12] GB 15945—2008　电能质量——电力系统频率偏差[S]. 北京：中国电力出版社，2008.

[13] DL 1040—2007　电网运行准则[S]. 北京：中国电力出版社，2007.

[14] SKOGESTAD S，POSTLETHWAITE I. Multivariable feedback control：analysis and design[M]. Hoboken，NJ，USA：John Wiley & Sons，2005.

[15] PRICE K V. An introduction to differential evolution[M]// CORNE D，DORIGO M，GLOVER F，et al. New York，NY，USA：McGraw-Hill，1999：79-108.

[16] STORN R. Designing digital filters with differential evolution[M]// CORNE D，DORIGO M，GLOVER F，et al. New York，NY，USA：McGraw-Hill，1999：109-125.

[17] XIN Huanhai，GAN Deqiang，HUANG Zhilong，et al. Applications of stability-constrained optimal power flow in the East China system[J]. IEEE Trans on Power Systems，2010，25(3)：1423-1433.

[18] 汪震，甘德强，宋晓喆，等. 基于商业电力系统分析软件的智能计算平台设计及应用[J]. 电力科学与技术学报，2011，26(1)：27-34.
WANG Zhen，GAN Deqiang，SONG Xiaozhe，et al. Development and application of smart computation platform based on commercial power system software package[J]. Journal of Electric Power Science and Technology，2011，26(1)：27-34.

[19] WANG Z，CHUNG C Y，WONG K P，et al. Robust power system stabiliser design under multi-operating conditions using differential evolution[J]. IET Generation，Transmission & Distribution，2008，2(5)：690-700.

汪　震(1976—)，男，通信作者，博士，副教授，主要研究方向：电力系统稳定和控制、计算智能在电力系统中的应用和分布式发电。E-mail：eewangzhen@gmail.com

宋晓喆(1986—)，男，博士研究生，主要研究方向：电力系统稳定和控制。

甘德强(1966—)，男，博士，教授，博士生导师，主要研究方向：电力系统稳定和控制、电力市场。

A Parameter Optimization Model of Under-frequency Load Shedding Considering Frequency Recovery Performance

WANG Zhen[1]，*SONG Xiaozhe*[1]，*GAN Deqiang*[1]，*SUN Weizhen*[2]，*ZHANG Jie*[3]

(1. College of Electrical Engineering，Zhejiang University，Hangzhou 310027，China；
2. Zhejiang Electric Power Dispatching & Communication Center，Hangzhou 310008，China；
3. Hangzhou Electric Power Dispatching Center，Hangzhou 310007，China)

Abstract: Based on the minimum control cost model of traditional under-frequency load shedding (UFLS) parameter optimization，an optimization model of UFLS parameters is developed. This model considers the frequency recovery performance of the system and the minimum load shedding amount，together with the factors of risk probability. Based on the characteristics of the developed model，differential evolution (DE) algorithm is used to solve the problem. According to the steady constraint and overshoot constraint in optimization problem，piecewise punishment function method is proposed to improve the execution efficiency of DE algorithm. The practical example simulation of the power system shows that the comprehensive performance of the proposed model is better than minimum control cost model，feasibility and effectiveness of the proposed model and algorithm are validated preliminary.

This work is supported by Post-doctoral Science Foundation of China (No. 20090461354)，the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2011QNA4012) and the Project from Zhejiang Electric Power Corporation.

Key words: under-frequency load shedding；frequency recovery；risk；differential evolution algorithm

附录 A

差分进化算法的特点是简单有效、易于实现、算法参数鲁棒性好，不需要任何目标函数的梯度信息。进化算法的核心是它的繁衍规则，比如 GA 主要有交叉、变异运算以及它们的变体。差分进化算法的核心繁衍规则为差异进化算子，本文采用 R. Storn 推荐的 DE/rand-to-best/1/bin 算子[16]。为描述方便，文中以 N_p 表示种群规模，$x_{i,j}[t]$ 表示第 t 代中第 i 个个体的第 j 个变量，第 t+1 代个体用如下差异进化算子产生：

$$x_{i,j}[t+1] = x_{i,j}[t] + K(x_{best,j} - x_{i,j}[t]) + F(x_{r1,j}[t] - x_{r2,j}[t]) \tag{A1}$$

式中：r_1 和 r_2 为互不相等且不等于 i 的整数，从 1～N_p 中随机选取；K 和 F 为缩放系数，通常在[0,1]区间取值；$x_{best,j}$ 标记到当前代为止的最佳个体的第 j 个变量。

差分进化算法的流程如图 A1 所示，其中的中点微调策略见文献[16]。

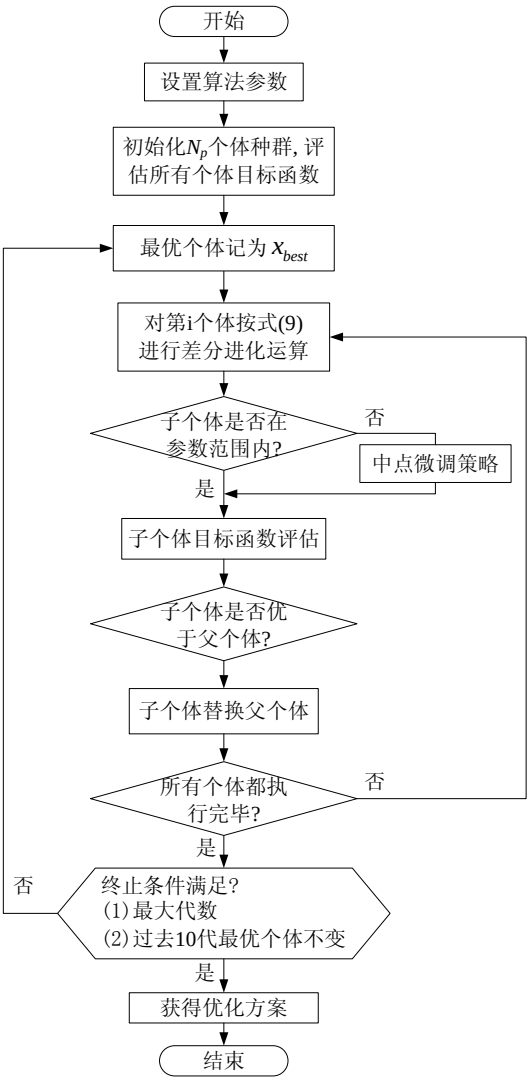

图 A1　差分进化算法求解流程

Fig.A1　Flow chart of DE algorithm solution