

[文章编号] 1003-4684(2023)04-0064-07

基于多元联合的电网频率紧急协调控制策略

贺忠尉¹, 向勇¹, 李大虎^{2,3}, 余金蔓², 叶泽力², 黄文涛²

(1 国网湖北省电力有限公司恩施供电公司, 湖北 恩施 445000;

2 湖北工业大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068; 3 国家电网湖北省电力有限公司, 湖北 武汉 430077)

[摘要] 为实现大容量、特高压电网的低频恢复, 提出一种多元联合的紧急低频控制策略, 将抽水蓄能、发电机热备用、精准切负荷以及常规切负荷四种手段相互结合来进行联合频率控制。协调几种手段之间的动作轮次和频率点, 建立系统频率又快又好恢复及负荷损失最小作为目标函数, 并给出相应的约束条件。在策略求解方面, 通过模拟退火算法优化求解每种策略启动轮次的最佳频率动作值, 算法求解结果给出具体的整定方案。通过 PSASP 软件对某片区电网进行仿真, 实例验证了该策略的有效性和快速性, 提供了有效解决措施和方案。

[关键词] 电网频率调节; 多元联合; 模拟退火算法

[中图分类号] TM712 **[文献标识码]** A

随着用电负荷的快速增长, 大容量联络线故障易造成受端电网频率急剧下跌, 导致电网解列以及大面积停电, 2003 年发生美加大停电, 2011 年发生的巴西大停电都是严重的电网频率崩溃事故。电网故障后的频率控制主要依靠旋转备用和切机/切负荷控制措施。旋转备用主要有火电机组热备用和抽水蓄能机组的发电工况, 具有调节功率大, 响应速度快的特点, 应用广泛。文献[1]提出了一种水电机组参与频率调节控制的方法, 能够有效解决调速器系统的稳定问题。文献[2]实现了一种针对系统出现较大功率缺额的控制策略, 该策略充分考虑了切负荷量的最优控制, 根据最优控制来实现频率的稳定。文献[3]充分考虑了负荷的重要性以及系统频率恢复特性, 在系统频率恢复过程中充分考虑低频减载(Under-frequency load shedding, UFLS)优化模型, 以频率偏移最小作为控制目标, 采用粒子群优化算法对低频减载方案的各个动作轮次进行优化, 最终给出有效的低频减载方案。文献[4]对系统中切负荷点确定以及切负荷容量进行优化, 在优化的过程中根据系统稳态频率约束来进行低频减载的优化, 最终求解出相应的优化方案。文献[5]对交直流混联电网中的特高压直流输电线路闭锁故障进行了分析, 根据其闭锁的原理采用了粒子群优化算法来对最佳切负荷量进行优化, 最后通过仿真验证所提方法的合理性和有效性。文献[6]采用负荷主动响应来对特高压首端电网直流闭锁故障进行分析, 并制

定相应的拉闸限电操作, 通过上述操作不断优化, 减少切负荷量。

文献[7]在传统逐级低频减载方案的基础上, 提出了一种新的连续 UFLS 方案, 并考虑了频率阈值和时间延时的非线性因素。上述文献考虑的调节手段较为单一, 面对大容量特高压传输线路故障导致的紧急低频问题显得不足, 且大多考虑以切负荷为代价, 这并不是最优的控制手段, 有少量研究通过多种手段协同控制频率恢复, 多元联合手段的难点在于不同控制手段之间的协调, 本文致力于这方面的研究^[8-10]。针对大电网, 特别是特高压故障背景下出现大额功率缺额的情况, 给出控制策略, 本文结合抽水蓄能发电工况、发电机热备用、精准切负荷和常规切负荷四种紧急频率控制手段, 根据相应的模型对故障进行分析并制定相应的动态频率轨迹曲线, 根据频率轨迹曲线制定优化目标, 采用模拟退火算法进行优化求解, 最终根据协调手段验证本文方案的合理性和优越性, 最终为特高压受端电网故障后大功率冲击所带来的频率稳定问题提供解决方案。

1 建模以及动态频率特性

1.1 电力系统频率的动态特性

特高压联络线发生故障后, 受端电网出现较大规模的功率缺额, 导致系统频率出现较大幅度下降, 相应表达式^[11-12]如下:

$$f = f_{\infty} + (f_N - f_{\infty})e^{-\frac{1}{T_N}t}$$

式中: f_{∞} 为由功率缺额引起的另一个稳定运行频率; T_s 为系统频率变化的时间常数; f_N 为额定频率。

1.2 电力系统动态频率分析

本文的紧急控制策略制定基于频率的动态变化,类似于低频减载的过程。本文研究系统频率动态过程采用单机等值模型,其中单机等值模型描述的是将整个电网的频率动态变化过程等效为一台机组,综合考虑了负荷随频率变化、发电机一次调频过程、电网的惯性等^[13-15],如图 1 所示。

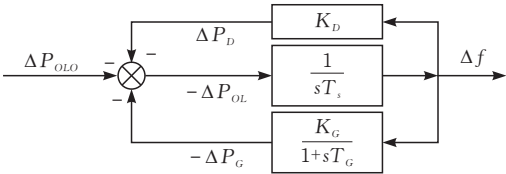


图 1 单机系统模型框图

系统传递函数如下:

$$T_s \frac{d\Delta f}{dt} = -\Delta P_{OL}$$

式中: Δf 为频率变化量; ΔP_{OL} 为系统过负荷量。

发电机侧变化情况:

$$T_G \frac{d\Delta f}{dt} + \Delta P_G = -K_G \Delta f$$

式中: T_G 为全系统发电机组调整系统的综合时间常数; ΔP_G 为发电机功率变化量; K_G 为发电机组的功率频率静态特性系数。

负荷侧变化情况:

$$\Delta P_D = K_D \Delta f$$

式中: ΔP_D 为负荷功率变化量; K_D 为系统负荷频率调节效应系数。

系统过负荷情况:

$$\Delta P_{OL} = \Delta P_D - \Delta P_G + \Delta P_{OLO}$$

式中: $\Delta P_{OL0} = P_{D0} - P_{G0}$, 表示系统中出现的初始过负荷量或者初始功率缺量。

在紧急控制过程当中,加入各种限幅环节来模拟发电机备用容量,相应的模型^[16-18]框图见图 2。

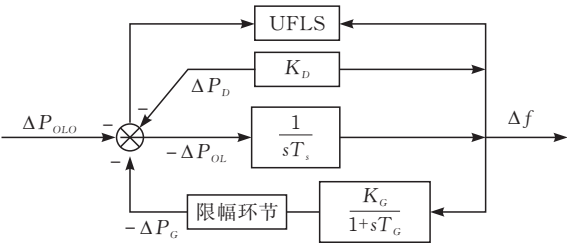


图 2 考虑低频减载频率响应模型

令 $T_f = \frac{T_s}{K_D}$ 为系统频率下降的时间常数, $K_s = K_D + K_G$ 为全系统的功率频率综合调节效应系数。

根据上述模型求解,则频率动态响应过程为:

$$f(t) = f_N - \frac{\Delta P_{OLO}}{K_s} (1 - 2A_m e^{\alpha t}) \cos(\beta t + \varphi)$$

其中:

$$\alpha = -\frac{1}{2} \left(\frac{K_D}{T_s} + \frac{1}{T_G} \right)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{4K_G T_G T_s - (K_D T_G - T_s)^2}{2T_G T_s}}$$

$$A_m = \frac{\sqrt{K_G K_s}}{2T_s \beta}$$

$$\varphi = \arctan \left[\frac{1}{\beta} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{K_D}{T_s} - \frac{1}{T_s} \right) + \frac{K_G}{T_s} \right) \right], \varphi \in (-\pi, \pi)$$

1.3 多元联合手段的数学模型

1.3.1 抽水蓄能发电过程的数学模型 抽水蓄能电站作为旋转备用设备,其工作状态主要在抽水、抽水调相、发电、发电调相和旋转备用状态之间转换,图 3 为抽水蓄能电站的工况转换图。数学模型采用水轮机简化解析非线性模型,则水轮机输出的机械功率(图 3)^[19-20]表达式为:

$$\begin{cases} U = K_U \sqrt{H} \mu_c \\ P_m = K_P H U - P_L \\ P_L = K_P H U_{NL} \\ U_{NL} = A_t y_{NL} \sqrt{H_0} \\ \mu_c = A_t y(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, U 为水的流速; K_U 为比例系数; μ 为导水叶开度; H 为水轮机净水头; P_m 为水轮机的输出机械功率; K_P 为比例系数; P_L 为空载损耗; U_{NL} 为水轮机由静止到旋转时的临界水流流速; $A_t = 1/y_{FL} - y_{NL}$, 其中, y_{FL} 为水轮机导水叶的最大开度, y_{NL} 为水轮机空载开度。

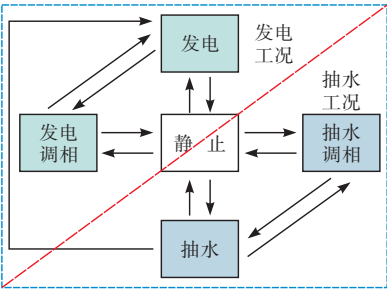


图 3 抽水蓄能电站工况转换

抽水蓄能机组采用直线启动规律,则

$$y(t) = \begin{cases} k_c t & 0 \leq t \leq \frac{y_{\max}}{k_c} \\ y_{\max} & t \geq \frac{y_{\max}}{k_c} \end{cases} \quad (2)$$

式中: y 为导水叶开度; k_c 为启动过程的比例系数。

则由式(1)~(2)可得抽水蓄能机组的功率动态变化过程:

$$P_c(t) = P_m(t) = K_P H [K_U \sqrt{H} A_t y(t) - U_{NL}]$$

1.3.2 发电机热备用的数学模型 在发电机的热备用过程当中,需要对发电机的工作状态进行检查,并且根据出口刀闸位置的状态来判断启动过程中的

升压并网过程。建立其数学模型时主要考虑蒸汽容积的影响。由于汽门与喷嘴之间存在一定的容积,当汽轮机调速汽门开度 μ 变化,进汽流量突然增大(或减小)时,容积内的蒸汽压力不能随之立刻增大(或减小),因而出汽流量不能立刻增大(或减小)。从而使汽轮机的输出功率 P_m 也不能立即随之变化,因此, P_m 的变化将滞后于 μ 的变化。则汽轮机的输出功率表达式为:

$$T_m = \frac{1}{1+sT_{CH}} \cdot \mu, P_m = T_m \cdot \omega$$

如果发电机热备用机组采用直线启动,则:

$$P_m(t) = T_m \omega = \mu(1 - e^{-\frac{t}{T_{CH}}})$$

式中: T_{CH} 为汽容时间常数,一般取 $0.1 \sim 0.3$ s; μ 为开度增量,在同步转速下,取 $\omega=1$,则发电机输入机械功率 $P_m = T_m$,输出功率 $P = T$ 。

1.3.3 精准切负荷 精准切负荷主要是对用电户进行优先级负荷控制,设置可中断负荷、可延时负荷和不可中断负荷。它的动作时间是毫秒级,是对电力系统二道防线的补充。本文的精准切负荷将可中断负荷作为控制对象,并根据其特征分为一级可控负荷和二级可控负荷。一级可控负荷可以通过调节运行模式来减小功率缺额(如多模式电动汽车,多档位热水器等),二级可控负荷为开关型设备(如空调,热水器等)。则可中断负荷用电特性模型为:

$$p_t^h = \begin{cases} s_t^h y_t^h (P_m^h - P_{m=1}^h) & \forall f \in F_1 \\ s_t^h y_t^h p_e^h & \forall f \in F_2 \end{cases}$$

其中: $F = F_1 \oplus F_2$

$$s_t^h = \begin{cases} 1 & t \in [t_{start}, t_{end}] \\ 0 & t \notin [t_{start}, t_{end}] \end{cases}$$

$$y_t^h = \begin{cases} 1 & t \in t_u \\ 0 & t \notin t_u \end{cases}$$

式中: $h \in F$ 分别为一二级可控负荷的集合; $0-1$ 变量 s_t^h 表示 t 时段是否属于设备运行时间区间; $0-1$ 变量 y_t^h 表示 t 时段是否属于习惯使用时间区间; p_m^h 表示一级负荷处于 m 工作模式的运行功率; p_e^h 为二级可控负荷的额定功率。

如果电网发生紧急故障,为确保电网安全稳定,需要进行良好精确控制,在保证频率快速恢复的同时还需要负荷损失最小。

1.3.4 低频减载 低频减载作为电力系统稳定控制的第三道防线,当电网功率缺额超过抽水蓄能、发电机热备用、精准切负荷容量时,只能采取低频减载的方法来减少系统的有功缺额。此外,依据《电力系统自动低频减载负荷技术规定》,为了有效减缓频率下降,首轮的动作阈值应该取高,但还要考虑旋转备用的启动和避免暂时性频率降低所导致的不必要动

作。因此本文方案中首轮减载控制比传统低频减载动作门槛值略高(为 $f_{cq\max}$),在此基础上设置 $N_{cq}-1$ 轮基本轮,每轮切除量为 $P_{cq(i)}$,为缺额的 $m_i\%$ 。同时设置一级特殊轮,为了防止由于其他未考虑因素导致的系统频率悬停,其独立于基本轮动作,频率门槛值为 f_s 。其减载量 P_s 为系统剩余不平衡功率:

$$P_s = P_{OLO} - P_{front} \quad (3)$$

式中: P_s 为特殊轮减载量; P_{front} 为特殊轮动作前所切除的总负荷量、抽水蓄能机组和发电机热备用机组所发出的功率之和。

其优先级的确定考虑频率调节效应的影响。假设两种负荷 P_{L1} 和 P_{L2} 的 $K_{L1} > K_{L2}$,其负荷的频率特性曲线如图4所示,当频率从 f_0 降至 f_1 时,其有功变化 $\Delta P_1 > \Delta P_2$,即负荷1对频率变化更为敏感。

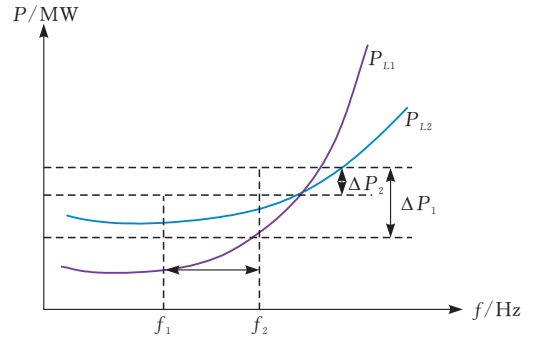


图4 负荷的频率特性曲线

当频率下降 Δf ,负荷 K_L 越大,其有功吸收量削减的越快。因此采取优先切除 K_L 较小的负荷,保留 K_L 较大负荷的减载方案,能够在频率下降时充分利用负荷频率调节效应,从而减少负载吸收的有功值,有助于减少不平衡功率和快速恢复稳态频率。

1.4 协调控制策略

协调控制策略是将四种不同的策略进行协调,并且利用计算模块实时获取功率缺额,根据功率缺额,并利用算法来进行协调分配,最终制定相关控制策略。

四种不同的调节手段有着不同的频率动作范围。系统频率偏差不超过 0.2 Hz时,为频率死区。当频率偏差超过 0.2 Hz,则首先启动抽水蓄能发电工况来进行频率控制。当频率继续下降到一定范围时,开始启动发电机热备用增加出力。如果频率仍然下降,在第三道防线低频减载动作之前,开始启动精准切负荷来进行频率控制。最后,如果频率仍然下降,开始启动第三道防线低频减载手段进行频率控制。表1为四种策略的启动频率。图5为多元协

调控控制策略图。

表 1 四种策略的启动频率

启动频率范围	备用机组/轮次	功率
$f_c \in (f_{cmin}, f_{cmax})$	N_c 台	P_c / 台
$f_f \in (f_{fmin}, f_{fmax})$	N_f 台	P_f / 台
$f_{jq} \in (f_{jqmin}, f_{jqmax})$	N_{jq} 台	P_{jq} / 轮
$f_{cq} \in (f_{cqmin}, f_{cqmax})$	N_{cq} 台	$P_{cq(i)}$ / 轮

表 1 中： f_c 为抽水蓄能动作的启动频率， f_{cmin} 为抽水蓄能启动频率的下限值， f_{cmax} 为抽水蓄能启动频率的上限值；抽水蓄能机组台数为 N_c ，单台抽

水蓄能机组容量为 P_c ； f_f 为发电机热备用动作的启动频率， f_{min} 为发电机热备用启动频率的下限值， f_{cmax} 为发电机热备用启动频率的上限值；发电机热备用台数为 N_f ，每台发电机热备用功率为 P_f ； f_{jq} 为精准切负荷动作启动频率， f_{jqmin} 为精准切负荷启动频率下限值， f_{jqmax} 为精准切负荷启动频率上限值；精准切负荷共有 N_j 轮，每轮切除负荷 P_{jq} ； f_{cq} 为低频减载动作启动频率， f_{cqmin} 为低频减载启动频率下限值， f_{cqmax} 为低频减载启动频率上限值；低频减载共 N_{cq} 轮，每轮切负荷 P_{cq} 。

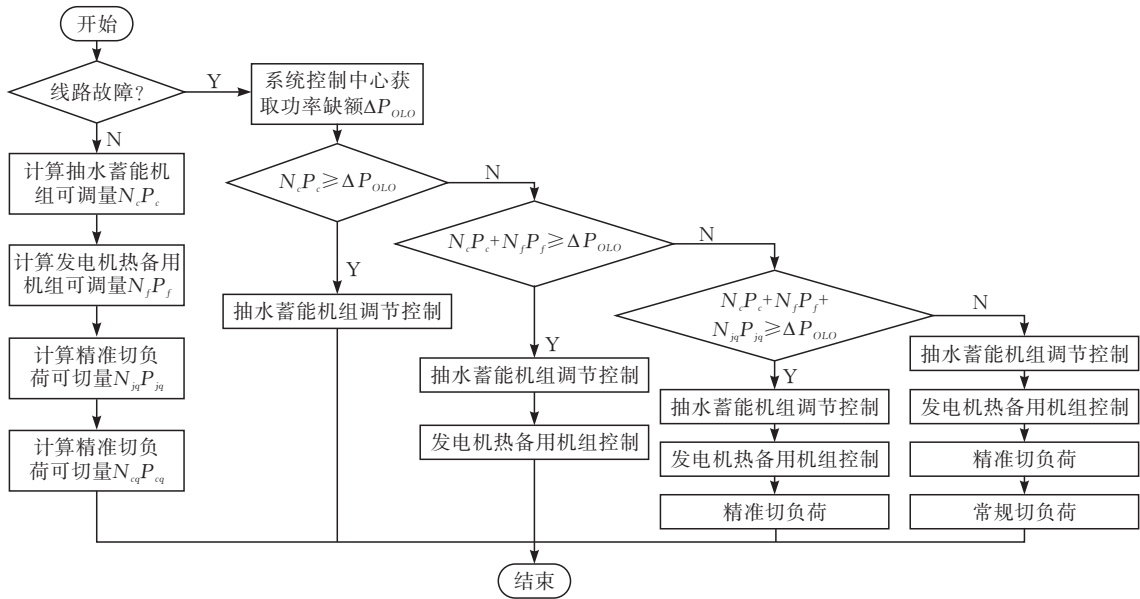


图 5 受端电网频率控制图

1.5 协调控制策略后受端电网频率动态过程分析

当分别依次加入抽水蓄能、发电机热备用、精准切负荷和常规切负荷的作用时，则有：

$$\Delta P_{OL} = \Delta P_{OL0} - \sum_{i=0}^{N_c} P_c i - \sum_{i=0}^{N_f} P_f i - \sum_{i=0}^{N_{jq}} P_{jq} i - \sum_{i=0}^{N_{cq}} P_{cq} i$$

式中： ΔP_{OL} 为当前时刻功率缺额。则：

$$f(t) = f_N - \frac{\Delta P_{OL0} - \sum_{i=0}^{N_c} P_c i - \sum_{i=0}^{N_f} P_f i - \sum_{i=0}^{N_{jq}} P_{jq} i - \sum_{i=0}^{N_{cq}} P_{cq} i}{K_s} \cdot (1 - 2A_m e^{at}) \cos(\beta t + \varphi)$$

2 基于模拟退火算法的多元联合策略求解

2.1 目标函数及约束条件

为了使频率更快更好地恢复，且跌落的幅值最小，定义目标函数 S 。

1) 目标函数 S 为 $f = f_N$ 曲线与各段频率变化曲线围成的面积之和，即图 6 中的灰色部分。

$$S = \sum_{i=0}^{N_c+N_f+N_{jq}+N_{cq}} \int_{t_i}^{t_{i+1}} (f_N - f_{f(i)}) dt \tag{4}$$

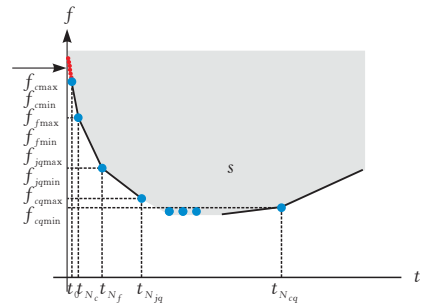


图 6 采取策略后的频率变化

将式(3)代入(4)中积分可得

$$S = \sum_{i=0}^{N_c+N_f+N_{jq}+N_{cq}} \left[\frac{\Delta P_{OL}}{\beta K_s} \sin(\beta t + \varphi) - \frac{2A_m \Delta P_{OL} e^{at} \beta}{K_s (\alpha^2 \beta^2 - 1)} \cdot [\alpha \beta \cos(\beta t + \varphi) + \sin(\beta t + \varphi)] \right]$$

2) 等式约束条件

$$f_{x(i)} = f_N - \frac{\Delta P_{OL}}{K_s} \cdot (1 - 2A_m e^{at_i}) \cos(\beta t_i + \varphi)$$

3) 不等式约束条件

启动频率的上下限约束为：

$f_{xmin} \leq f_{x(i)} \leq f_{xmax}, i = 1, 2, \dots, N_c + N_f + N_{jq} + N_{cq}$
切负荷总量控制：

$$\sum_{i=0}^{Njq} P_{jq} + \sum_{i=0}^{Ncq} P_{cq} \leq P_Z \tag{5}$$

式中： P_Z 为系统所允许的最大切负荷量。

2.2 算法的引入

为了寻找最小目标函数值,本文采用模拟退火算法。这种算法在处理全局优化、离散变量优化等高度非线性化的优化问题中,具有优势^[24]。模拟退火算法由三部分组成:

- 1) 加热过程:通过升温,加强内部粒子的热运动,随着内能增大,粒子变为无序状,使其偏离平衡位置。
- 2) 等温过程:随着热量的交换,粒子由无序状态变为有序,在每个温度下都达到平衡。
- 3) 冷却过程:粒子的热运动减弱,伴随着温度的下降,内能的降低。在这一过程中,结合概率特性在解空间中随机寻找目标函数的全局最优解,其中 Metropolis 准则是模拟退火算法收敛于全局最优解的关键所在, Metropolis 准则以一定的概率接受恶化解,这样就使算法跳离局部最优的陷阱。

2.3 算法的实现

模拟退火算法主要需要三个函数来控制迭代过程:冷却时间,随机解和 Metropolis 准则。

- 1) 定义降温函数:
- $$T = T * K$$
- 式中: T 为初始温度; K 为迭代长度。
- 2) 随机解的生成,满足约束条件:
- $$X = [f_{c1}, \dots, f_{cNc}, f_{f1}, \dots, f_{fNf}, f_{jq1}, f_{jq2}, f_{cq1}, \dots, f_{cq4}, t_{c1}, \dots, t_{cNc}, t_{f1}, \dots, t_{fNf}, t_{jq1}, t_{jq2}, t_{cq1}, \dots, t_{cq4}]$$
$$f_{(xi)} = rand(f_{(xi)min}, f_{(xi)max})$$
- 3) 通过 Metropolis 准则以一定的概率接受较差解:

$$prob = \begin{cases} 1 & \Delta E < 0 \\ e^{-\frac{\Delta E}{T}} & \Delta E > 0 \end{cases} \tag{6}$$

式中: $prob$ 为新解被接受概率; ΔE 为系统能量之差,即 $\Delta E = \Delta E^{Ti} - \Delta E^{Ti-1}$ 。

2.4 约束条件的处理

对于约束条件的处理方式通常有两种,一是直接修改,二是采用罚函数法。对于约束条件式(6)采用直接修改的方式,对随机产生的初始解判断是否满足约束条件,如果不满足,则按照式(7)进行修改:

$$f_{x(i)} = \begin{cases} f_{xmax} & f_{x(i)} > f_{xmax} \\ f_{xmin} & f_{x(i)} < f_{xmin} \end{cases} \tag{7}$$

对于约束条件式(5)以罚函数的处理方式放入目标函数中,变换后的目标函数

$$S = \sum_{j=0}^{Nc+Nf+Njq+Ncq} \left[\frac{\Delta P_{OL}}{K_s} (t + \frac{T_s}{K_s} e^{\frac{K_s}{T_s'}}) |t_{ij}^{j+1}| \right] + P(x),$$
$$P(x) = mU,$$

$$U = \min(0, P_Z - \sum_{i=0}^{Njq} P_{jq} + \sum_{i=0}^{Ncq} P_{cq})$$

式中: m 为惩罚系数,取常数值。

2.5 算法求解流程

- 图 7 为模拟退火算法的流程图。
- 1) 初始化温度 T , 马可夫链长度 l , 容差 YZ 等。
- 2) 随机生成初始解 X_0 , 并计算目标函数值 S_0 。
- 3) 扰动产生新解 X'_0 , 并计算目标函数值 S'_0 。
- 4) 计算目标函数差值 $\Delta m = S'_0 - S_0$ 。若 $\Delta E \leq 0$, 则接受新解, 即当前最优解; 若 $\Delta E > 0$, 则按 Metropolis 准则接受新解。
- 5) 判断是否达到迭代次数, 是则返回 3); 否则继续。
- 6) 搜寻在此温度下的所有解。判断是否满足循环结束条件, 是则输出最优值, 否则温度下降, 重复步骤 3)–6)。

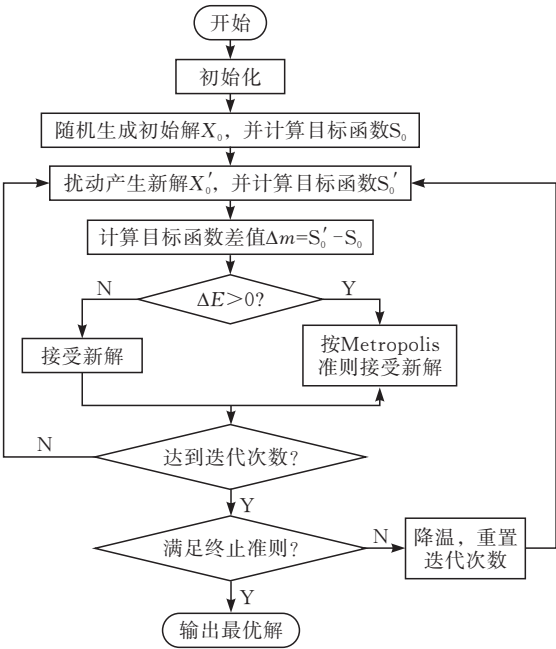


图 7 算法流程

3 仿真算例

为了验证所提方案的有效性,本文采用 PSASP 软件包进行计算。以中国某片区实际电网为例: $f_N = 50$ Hz; $T_S = 8.01$; $K_{D*} = 1.9$ pu; $K_{G*} = 21.6$ pu; $f_{x\min} = 49.8$ Hz; $f_{x\max} = 49.2$ Hz; $f_{cq\min} = 49.2$ Hz; $f_{cq\max} = 48.6$ Hz; 此时电网内各项资源措施的可调节量如表 2 所示。

该电网内有 2 台抽水蓄能机组处于备用状态, 额定功率为 300 MW, 分 2 轮次启动; 有 1 台热备用火电机组, 1 轮启动, 额定功率为 300 MW; 可中断负荷有 900 MW, 分两次切除, 每轮切除 450 MW; 常规切负荷分四轮切除, 首轮切除缺额的 25%, 第

二轮切除 25%，第三轮切除 25%，特殊轮频率切除的门槛值为 49.3 Hz，切除 25%。

表 2 多元联合手段资源的可用措施量		
序号	资源措施	可调节量/MW
1	抽水蓄能	600
2	发电机热备用	300
3	精准切负荷	900
4	常规切负荷	1200

本文设置了两组不同功率缺额方案,综合分析本文所提策略对电网频率的影响及有效性。电网功率缺额为 2600 MW 时,频率曲线变化如图 8 所示。

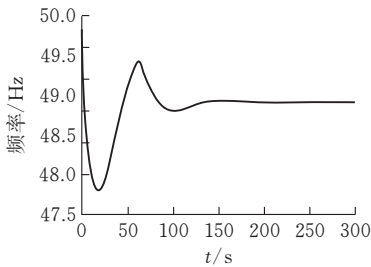


图 8 功率缺额为 2600 MW 时系统频率变化

利用本文方法计算得到每一轮最佳启动频率值。同时,定义 4 组对比方案,设置在相同的频率段动作,分为相同的轮次,每轮级差定为 0.1 Hz 或者 0.2 Hz。如表 3 所示。

表 3 对比方案的定义					
轮次	各种方案下的频率/Hz				
	1	2	3	4	优化方案
1	49.80	49.80	49.70	49.70	49.77
2	49.70	49.60	49.50	49.60	49.63
3	49.60	49.40	49.40	49.50	49.53
4	49.50	49.30	49.30	49.40	49.45
5	49.40	49.20	49.20	49.30	49.32
特殊轮	49.30	49.30	49.30	49.30	49.30

为了验证所提策略的有效性,将方案 1—4 和优化方案进行仿真对比。图 9 为各种方案下频率的变化图,为了比较各种策略的优劣性,定义几个变量相互比较。 f_{\min} 为整个过程中电网频率最低点值; f_h 为电网频率最终恢复值; t_h 为频率恢复到另一个稳态的时间; S 为整个策略曲线与 $f=f_N$ 所围成的面积。具体比较情况如表 4 所示。

表 4 是仿真结果分析表,是图 9 的仿真结果。通过图 9 的仿真图片,可以很直观的看出紧急故障下本文所提的多元联合协调控制策略对频率恢复具有很明显的效果。并通过表 4 的仿真结果分析表可以看出优化方案恢复的频率与其他 4 种一致,为 49.73 Hz,但在恢复时间上却比其他方案更短,第一摆落落的频率更高,所围成面积也最小。最终也验证了本文所提方案的有效性。

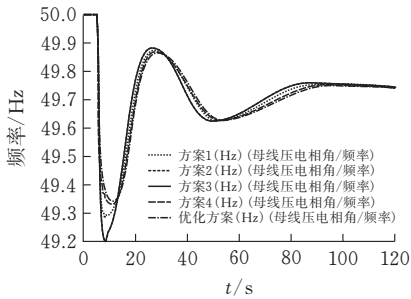


图 9 方案对比

表 4 仿真结果分析				
方案	f_{\min} /Hz	f_h /Hz	t_h	S
1	49.29	49.73	78.49	28.63
2	49.20	49.73	78.34	27.47
3	49.20	49.73	79.67	27.55
4	49.33	49.73	77.98	26.94
优化方案	49.34	49.73	76.15	26.33

4 结论

根据四种策略对电网频率的影响效果设置优先级顺序,对抽水蓄能发电工况特性和发电机热备用进行分析,精准切负荷。根据负荷用电特性设置两级负荷,低频减载通过设置基本轮与特殊轮相结合的方式,来降低负荷过切率。本文根据频率轨迹的方法建立了目标函数和约束条件,给出了实时确定的策略轮数以及每轮频率动作值,并应用模拟退火算法给出最终优化结果。通过 PSASP 软件仿真验证本文策略对动态频率曲线的影响,得到以下结论:

- 1)本文基于最优频率轨迹的方法,考虑抽水蓄能、发电机热备用、精准切负荷和常规切负荷的特性进行分轮次启动,对于快速、有效地恢复系统频率并减少负荷损失具有重要意义。
- 2)优化后的控制效果优于不经优化的策略,这为电网频率紧急控制提供了一个可靠的理论依据和有效措施。
- 3)本文提出的分轮次低频减载方案,可以有效避免过切,并充分发挥发电机调速器作用,以较小的减载量获得更优的频率恢复效果。

[参 考 文 献]

[1] 周野,刘福锁,常海军,等.用于频率紧急控制的水电群精准控制策略[J].电力系统自动化,2020,44(11):121-126.

[2] 王青,王昊,宋云亭,等.外送型地区电网解列故障下水电机组频率控制策略[J].电网技术,2013,37(12):3515-3520.

[3] 高学民,么莉,张辉,等.基于负荷频率特性的低频减载方案优化[J].电力系统及其自动化学报,2015,27

(02):82-88.

[4] 和敬涵,柏丹丹,王小君,等.低频减载综合代价最优化算法[J].电网技术,2013,37(12):3461-3466.

[5] 胡益,王晓茹,滕予非,等.特高压直流闭锁后的交直流混联受端电网最优切负荷方案[J].电力系统自动化,2018,42(22):98-108.

[6] 韩冰,姚建国,於益军,等.负荷主动响应应对特高压受端电网直流闭锁故障的探讨[J].电力系统自动化,2016,40(18):1-6.

[7] C LI . Continuous under-frequency load shedding scheme for power system adaptive frequency control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35 (02): 950-961.

[8] ALI RAFINIA, NAVID REZAEI, JAMAL MOSH-TAGH. Optimal design of an adaptive under-frequency load shedding scheme in smart grids considering operational uncertainties[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2020, 121: 106137.

[9] 汪震,宋晓喆,甘德强,等.考虑系统频率恢复性能的低频减载参数优化模型[J].电力系统自动化,2012,36(06):17-22.

[10] 黄文涛,邓长虹,汪志强,等.基于最优频率轨迹的电力系统低频切泵方案[J].电力系统自动化,2012,36(11):14-18.

[11] 黄文涛,邓长虹,汪志强,等.基于外点罚函数法的实时低频切泵策略[J].中国电机工程学报,2013,33(16):104-111.

[12] 席崇羽,王海跃,段非非,等.±800kV 特高压直流输电线路典型故障分析[J].湖南电力,2016,36(01):55-59.

[13] 李虎成,袁宇波,卞正达,等.面向特高压交直流大受端电网的频率紧急控制特性分析[J].电力工程技术,2017,36(02):27-31,109.

[14] 罗亚洲,陈得治,李轶群,等.华北多特高压交直流强耦合大受端电网系统保护方案设计[J].电力系统自动化,2018,42(22):11-18,19,68.

[15] 胡益,王晓茹,滕予非,等.特高压直流闭锁后的交直流混联受端电网最优切负荷方案[J].电力系统自动化,2018,42(22):98-108.

[16] 徐兴伟.基于轨迹的复杂电力系统频率动态过程分析[D].保定:华北电力大学,2010.

[17] 李新年,雷霄,陈树勇,等.±1100 kv 特高压直流接入系统控制策略优化[J].电网技术,2016,40(05):1326-1333.

[18] 李兆伟,吴雪莲,庄侃沁,等.“9·19”锦苏直流双极闭锁事故华东电网频率特性分析及思考[J].电力系统自动化,2017,41(07):149-154.

[19] 国家能源局. DL/T 428—2010 电力系统自动低频减负荷技术规定 [EB/OL]. (2011-01-09) [2022-03-19]. <https://www.doc88.com/p-7199540643187.html>.

[20] 赵晋泉,汤建军,吴迪,等.直流馈入受端电网暂态电压与频率稳定紧急协调控制策略[J].电力系统自动化,2020,44(22):45-53.

Control Strategy of Emergency Coordination of Grid
Frequency Based on Pluralistic Union

HE Zhongwei¹, XIANG Yong¹, LI Dahu^{2,3}, YU Jinman², YE Zeli², HUANG Wentao²

(1 State Grid Hubei Electric Power Company Limited Enshi Power
Supply Company, Enshi 445000, China ;

2 College of Electrical and Electronic Engineering, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China ;

3 State Grid Hubei Electric Power Co., Wuhan 430077, China)

Abstract: At present, with the development of ultra-high frequency transmission line, it is easy to take a large number of low-frequency power loss caused by the construction of ultra-high frequency transmission line. In this context, this paper proposes a multi-element joint emergency low-frequency control strategy, which combines pumped storage, generator hot standby, accurate load shedding and conventional load shedding to carry out joint frequency control. The action rounds and frequency points between several means is coordinated to establish the fast and good recovery of system frequency and the minimum load loss as the objective function, and give the corresponding constraints. In the aspect of strategy solution, the simulated annealing algorithm is used to optimize the optimal frequency action value of each strategy start cycle, and the algorithm solution results give a specific setting scheme. Through the simulation of a regional power grid with PSASP software, an example verifies the effectiveness and rapidity of the strategy, and provides effective solutions and schemes for realizing the low-frequency recovery of large capacity and UHV power grid.

Keywords: pluralistic union; grid frequency; emergency control; simulated annealing

[责任编辑: 张岩芳]