

# 区域电网内多输电断面有功协同控制策略在线生成方法

刘阳,夏添,汪旻

(国家电网公司华中分部,湖北 武汉 430077)

**摘要:**以多个断面功率不越极限为控制目标、调整量最小为优化目标,基于直流潮流法的断面有功灵敏度建立求解多断面有功协同控制策略的非线性规划模型;为提高模型求解的可靠性和速度,引入辅助变量将该模型转化为线性规划模型;利用交流潮流法进行安全校核,以检验策略的有效性。从计算启动、建模求解及安全校核三方面设计闭环的在线滚动计算流程;提出适用于各种网络拓扑变化的节点电纳矩阵及其逆矩阵的滚动修正方法;采用可调元件有功调节限值修正策略剔除无效的调整措施。案例结果验证了所提方法的有效性;且每轮计算耗时在2 min以内,表明所提方法的计算速度满足实时调度要求。

**关键词:**多输电断面;有功协同控制;实时调度;有功安全校正;非线性规划;线性规划;断面有功灵敏度

**中图分类号:**TM 73

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202007008

## 0 引言

为了保障电网安全稳定运行,调控机构依据《电力系统安全稳定导则》等规定开展电网方式计算,综合考虑各种安全稳定约束确定输电断面构成并制定其控制限额,调度运行中必须将各输电断面的功率控制在限额以内。

然而,近年来我国部分区域电网的输电断面卡口问题较为突出。其原因在于:①电源点更为集中,大容量直流、火电机组大量投产,且在煤炭资源获取成本较低的地区火电机组过于密集,或是同一流域的水电机组过于密集,而电力疏散通道结构偏弱,导致外送通道长期重载;②某些地区为负荷中心但电源较少,难以平衡本地用电需求,依赖受入大量外部电力,受入通道长期重载;③部分省网在度夏、度冬高峰时段用电负荷接近其最大承载能力,电力平衡紧张局面时常出现,为最大限度保障电力可靠供应,部分输电通道潮流长时间接近稳定极限运行,更容易出现断面重载甚至多断面同时重载现象。

受多重因素制约,多断面协同控制策略的制定难度较大,这主要体现在以下两方面:一是不同重载断面的送受端机群不一致,任一机组的调节对各断面潮流的影响不同,甚至出现减小某些断面功率必须以增大另外一些断面功率为代价,而且随着重载断面数量的增多,各机组调整策略的组合更具多样性,各断面之间的制约关系更加复杂,制定协同控制策略的难度也更大;二是大负荷期间,大部分机组必须以高负荷率运行来保证电力供应,同时,在高温、高寒天气下因机组缺陷、气煤供应不足等导致的机组出力受限情况时常发生,此外还受新能源消纳、火电厂大气污染物排放限制、阶段性集中来水、保可靠供电等内外部因素的影响,上述原因导致断面控制资

源的调节范围和灵活性下降,因此制定有效的控制策略更具挑战性。目前断面控制策略的制定主要依赖调度员的经验判断,而该问题的复杂程度已超出人工经验的能力范围,当前的“粗放型”、“经验型”调度模式已逐渐呈现出适应性。因此,多断面协同控制措施的求解是当前电网调度运行中面临的一个重要课题。

断面控制属于有功校正问题,从求解方法上主要分为非线性规划、基于灵敏度的反向等量配对法以及线性规划法3类。有功校正通常以调节量绝对值之和最小或二次函数表示的发电成本最低为控制目标,此时的目标函数为非线性函数,最直接的方法是采用非线性规划法进行求解<sup>[1-5]</sup>,但是该方法存在收敛性问题和计算耗时长等缺点,限制了其在实时控制中的实用性。基于灵敏度的反向等量配对法是根据综合调节性能指标确定各调节措施的调整方向和优先级顺序,然后依次等量反向配对,不断增加配对量直至满足要求<sup>[6-12]</sup>,然而这类方法的有效性取决于综合调节性能指标的合理性,否则难以兼顾对其他支路的影响或是对调节措施的调整方向或优先级的限定导致调节措施组合的自由度降低,可能遗漏最优解甚至造成无解<sup>[4]</sup>。线性规划法是将非线性规划模型转化为线性规划模型,如:文献[13]根据综合调节性能指标指定调节元件的调整方向,从而将目标函数转化为线性函数;文献[14-15]采用分段直线逼近非线性目标函数的方法,文献[16]采用正、负调整量作为变量将目标函数线性化,这些方法均具有较强的实用性,但为了避免引起其他支路过载;文献[15-16]将不同支路的灵敏度相反的调节元件排除在外使其不参与调整,该做法可能遗漏最优解甚至造成无解;文献[17]利用拉格朗日乘子法将非线性规划问题转化为线性规划问题,但是中间计算过程较多。

实际调度中以断面总功率不越限为控制目标,由于调度中采用的离线限额考虑了 $N-1$ 及其他稳定约束,断面不越限约束比支路不过载约束要严格得多,各线路实际运行功率通常远低于其载流极限功率。然而,目前大部分有功安全校正方法以单支路不过载或多支路分别不过载为控制目标,与调度实际不一致。少数文献针对断面控制提出策略生成算法,如:文献[7]利用反向等量配对法得出单断面调整策略,对于多断面问题未展开讨论;文献[11]针对单断面提出控制算法,以按照断面总功率及风险支路功率下降的原则选取反向配对调节节点,但仍以断面内的所有支路不过载为调整结束判据,未考虑断面总功率越限的约束;文献[3]针对多断面控制提出计算方法,但该方法是非线性规划方法。因此,亟待提出一种适用于实时调度的多断面协同调整策略计算方法。

本文提出一种多断面有功协同控制策略的在线生成方法。直接以断面总功率不越限为控制目标建立非线性规划模型,并利用一种新的辅助变量法将目标函数转化为线性函数,从而将其转化为线性规划模型,进而得出优化的调整策略,最后采用交流潮流法校验策略的可行性。采用滚动模式进行在线计算,并提出算法的优化措施,即可调元件调节限值的修正策略、电纳矩阵及逆矩阵的滚动修正方法,这些措施加快了计算速度,其中前者自动剔除调节量小的无效措施,提高了策略的可执行性。本文方法未对可调措施的调整方向和优先级作任何限定,因此解的最优性得到保证。

## 1 多断面有功协同调整的数学模型

### 1.1 问题描述

在电网实时运行中,当出现多个断面同时重载或越限时,必须将这些断面的负载率(断面实际功率与限额之比)控制在安全范围内,同时还须保证控制过程中不会引起其他断面负载率超出安全范围。断面功率的控制手段主要为调节有功元件。为此,解决多断面有功协同控制问题的关键就是给出满足上述控制要求的有功元件调节策略。

### 1.2 断面安全范围的设定及目标断面集的选取

由于断面功率存在波动,为保证断面功率时刻在限额以内,实际控制时必须留出一定裕度。本文将负载率不超过90%作为断面的安全范围。

目标断面集是需要进行协同控制的输电断面的集合,该断面集不仅应包含当前已经超出安全范围的断面(负载率大于90%),还应包含虽在安全范围内但可能因为调整策略的执行导致重载的断面。因为负载率为80%~90%的断面在实施调整策略后超出安全范围的可能性较大,是潜在的高风险断面,因

此本文将负载率超过80%的输电断面均纳入目标断面集。

需要指出的是,上述目标断面集并未涵盖所有断面,仍有可能出现目标断面集以外的其他断面在调整策略执行后负载率超过90%的情况,此时应将该断面也纳入目标断面集,具体处理方法见2.3节。

### 1.3 可调元件的选取

可调元件主要有机组、直流系统、用电负荷3种。由于调整负荷将造成供电中断,在实际调度运行中通常不会采用,本文仅考虑调整机组、直流功率的措施。需要指出的是,应从可调元件中去除无调节能力的机组,包括径流式水电厂、溢流满发水电机组、热电厂及风电、光伏发电场。

针对不同的目标断面按如下原则选取可调元件:通常省间断面的支路是一个完整割集,其功率由日内输电计划决定,省网内部断面与其他省网内部断面之间的耦合程度相对较低,故区域电网内的多断面控制问题可分解为各省电网内的多断面控制问题,省内目标断面优先选取该省网内可调元件进行调节,无法求解出可行策略时,可考虑选取跨省元件进行调节。

### 1.4 数学模型的建立

#### 1.4.1 目标函数

可调元件的有功调整将带来不利影响,如机组调整将带来机组磨损、辅机启停;直流功率调整将影响其他区域电网的有功平衡以及换流变分接头使用寿命。为使不利影响最小,本文将目标函数选取为各可调元件调整量的绝对值之和,目标是使目标函数数值最小,如式(1)所示。

$$\min \sum_{k=1}^N |\Delta P_k| \quad (1)$$

其中, $\Delta P_k$ 为可调元件 $k$ 的调整量(MW),向上调节其值为正,向下调节其值为负; $N$ 为可调元件数量。

#### 1.4.2 约束方程

本文问题的约束条件分为3类。

(1)有功平衡约束:各可调元件的调整量之和为0,如式(2)所示。

$$\sum_{k=1}^N \Delta P_k = 0 \quad (2)$$

(2)断面有功协同控制目标约束:要求各目标断面负载率控制在安全范围90%以下,如式(3)所示。

$$\alpha \bar{P}_{gmin} \leq \sum_{k=1}^N S_{gk} \Delta P_k + \bar{P}_{g0} \leq \beta \bar{P}_{gmax} \quad g=1, 2, \dots, G \quad (3)$$

(3)可调元件的调节范围约束:可调元件有功出力须在其可运行范围内,如式(4)所示。

$$P_{kmin} \leq \Delta P_k + P_{k0} \leq P_{kmax} \quad k=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

其中, $P_{k0}$ 、 $P_{kmax}$ 、 $P_{kmin}$ 分别为可调元件 $k$ 的当前功率和

调节上、下限(MW); $\bar{P}_{g0}$ 、 $\bar{P}_{g\max}$ 、 $\bar{P}_{g\min}$ 分别为断面 $g$ 的当前功率和上、下限额(MW)(限额由调度机构根据离线方式计算得到,通常在电网拓扑结构不变时限额为固定值); $\alpha$ 、 $\beta$ 分别为断面有功上、下限的系数(一般而言,上限为正数,下限为负数,此时 $\alpha$ 、 $\beta$ 均取为0.9); $G$ 为目标断面数量; $S_{gk}$ 为断面 $g$ 对可调元件 $k$ 的有功灵敏度,其计算方法见1.4.3节。

### 1.4.3 断面有功灵敏度的计算

本文采用直流潮流法计算断面有功灵敏度<sup>[18]</sup>,具体如下。

(1)断面对机组的有功灵敏度计算。

将断面有功灵敏度定义为机组单位有功调整引起的断面所有组成支路有功变化的总和<sup>[3,7,11]</sup>。

将机组 $k$ 的有功变化量记为 $dP_k$ ,支路 $i-j$ (支路起、止节点编号分别为 $i$ 、 $j$ ,有功以从节点 $i$ 送至节点 $j$ 为正方向)的有功变化量记为 $dP_{ij}$ ,则二者之间关系可用式(5)描述。

$$\frac{dP_{ij}}{dP_k} = -B_{0ij} \left( \frac{d\theta_i}{dP_k} - \frac{d\theta_j}{dP_k} \right) = -B_{0ij} (A_{ik} - A_{jk}) \quad (5)$$

其中, $\theta_i$ 、 $\theta_j$ 分别为节点 $i$ 、 $j$ 的电压相位; $B_{0ij}$ 为节点电纳矩阵 $B_0$ 的第 $i$ 行、第 $j$ 列元素; $A_{ik}$ 为矩阵 $A$ 的第 $i$ 行、第 $k$ 列元素,矩阵 $A$ 为节点电纳矩阵 $B_0$ 的逆矩阵。

设断面 $g$ 由 $M_g$ 条支路构成,各支路的起、止节点对记为 $i_{gm}-j_{gm}$ ( $m=1,2,\dots,M_g$ 表示断面 $g$ 的支路编号),则断面 $g$ 对机组 $k$ 的有功灵敏度计算公式为:

$$S_{gk} = \frac{d \sum_{m=1}^{M_g} P_{i_{gm}j_{gm}}}{dP_k} = - \sum_{m=1}^{M_g} B_{0i_{gm}j_{gm}} (A_{i_{gm}k} - A_{j_{gm}k}) \quad (6)$$

(2)平衡节点的选取。

节点电纳矩阵 $B_0$ 的计算中涉及平衡节点的选取。在实际调度中不存在平衡机的概念,调整策略需要在具体的调节元件上实施,且可调元件增减出力之和必须基本平衡。为了避免平衡机承担过多有功导致其越限问题,本文将平衡节点选取为不参与有功调节的节点,如没有连接机组或负荷的母线节点,或与本区域电网交流互联的其他区域电网中的节点。增减出力之和的平衡由有功平衡约束(式(2))来保证。

### 1.4.4 非线性规划模型向线性规划模型的转化

本文问题的数学模型可由式(1)~(4)描述,由于目标函数为非线性函数,该模型为非线性规划模型。但是由于非线性规划法收敛难度大、耗时长,难以进行在线应用<sup>[14]</sup>,为此利用辅助变量法<sup>[19]</sup>将该目标函数转化为线性函数。辅助变量法的核心思想是将规划变量及其绝对值用2个非负辅助变量线性表示,虽然变量数量增多了1倍,但消除了绝对值函数,原非线性问题转化为线性规划问题,具体如下:

$$\Delta P_k = u_k - v_k \quad (7)$$

$$|\Delta P_k| = u_k + v_k \quad (8)$$

$$u_k \geq 0 \quad (9)$$

$$v_k \geq 0 \quad (10)$$

其中, $k=1,2,\dots,N$ ;  $u_k$ 、 $v_k$ 为辅助变量,将式(7)、(8)代入式(1)~(4)即可得到关于变量 $u_k$ 、 $v_k$ 的线性规划模型。转化后的线性规划问题的最优解就是原问题的最优解,证明过程见文献<sup>[19]</sup>。得到 $u_k$ 、 $v_k$ 的最优解后,将其代入式(7)即可得到可调元件的调整量 $\Delta P_k$ 。

## 2 在线滚动计算流程

为了适用于实时调度运行,本文提出闭环的周期性滚动计算流程,包括计算启动、数学模型的建立及求解、安全校核3个步骤。

### 2.1 计算启动

程序进入后首次计算矩阵 $B_0$ 和 $A$ ,然后设置计时变量 $t=0$ ,当 $t$ 计时达到滚动计算周期(即每轮计算的时间间隔),则读取当前全网所有输电断面的实际功率及稳定限额,若存在至少1个断面的负载率大于90%,则启动计算进入下一步骤,否则不启动计算并将 $t$ 置零重新计时。

### 2.2 数学模型的建立及求解

读取当前电网络参数、网络拓扑和设备状态,根据网络拓扑的变化修正矩阵 $A$ ,修正方法见3.2节。

按上述方法选取目标断面集及可调元件后即可形成有功平衡等式约束方程(式(2))及可调范围不等式约束方程(式(4));计算各目标断面对各可调元件的灵敏度后,形成断面有功协同控制目标不等式约束方程(式(3))。利用辅助变量将目标函数转化为线性函数,并采用线性规划法求解。如果有解则输出调整策略,进入下一步骤安全校核,否则扩大可调元件范围至相邻省份重新生成约束方程再次求解。如果已调用完区域电网内所有资源仍然无解,则提示该问题无解。

### 2.3 安全校核

将调整策略导入在线安全分析系统中进行交流潮流计算,得出策略执行后的所有断面负载率,判断是否仍有负载率超过 $90\% + \varepsilon$ ( $\varepsilon$ 为容许误差,取为1%,由于直流潮流法存在一定的误差,为了避免该误差导致交流潮流安全校核不通过而反复重新求解,因而设置该参数)的断面,如果没有,则本轮计算结束。如果有,则分2种情况:①目标断面集以外的断面重载率超过 $90\% + \varepsilon$ ,则将该重载断面添加到目标断面集后重新建模求解;②部分目标断面负载率超过 $90\% + \varepsilon$ ,则将这些目标断面的控制目标不等式约束式(3)中对应的断面上(下)限系数缩小0.05,再重新求解。循环进行上述过程直至调整策略使所有

断面负载率小于  $90\% + \varepsilon$  或调用完区域电网内所有资源为止。本轮计算结束后再次将  $t$  置零重新等待下一轮计算。

### 3 算法的优化措施

#### 3.1 矩阵 $B_0$ 的修正方法

在线计算中耗时最长的是矩阵  $B_0$  的形成以及求逆。矩阵  $B_0$  仅与网络结构有关,如果发生开关变位引起网络结构变化,如机组启停、线路投切、变压器投切、母线并列/分列转换、线路出串/入串等,需要对矩阵  $B_0$  进行修正,针对以下几种常见的网络结构变化讨论其修正方法。

(1)在原网络节点增加1条接地支路。

实际调度中,为了控制无功、电压,变电站的低容、低抗及换流站交流滤波器的投切操作较频繁,由于直流法潮流计算忽略了对地支路,因此无需对矩阵  $B_0$  进行修正。

机组的启停操作也较频繁,但其对矩阵  $B_0$  没有影响,仅是在停机时该机组变为不可调节元件。

综上所述,在原网络节点增加1条接地支路无需修正矩阵  $B_0$ 。

(2)原网络节点  $i, j$  之间增加或断开1条支路。

线路投切操作属于较为常见的增加或断开支路的情形。以投入支路为例,此时矩阵  $B_0$  的修正方法如下:

$$B'_0 = B_0 + \frac{1}{x_{ij}} C^T C \quad (11)$$

其中,  $B'_0$  为对矩阵  $B_0$  进行修正后的矩阵;  $x_{ij}$  为新投入支路的串联电抗;  $C$  为第  $i$  个元素为1、第  $j$  个元素为-1、其他元素为0的  $n-1$  维行向量,  $n$  为网络节点数。若是切除支路,则将式(11)中等号右边的正号改为负号即可。

(3)从原网络引出1条新支路,同时该支路引出的节点为1个新节点。

若新节点是负荷节点或者发电机节点且参与调整,则需要修正矩阵  $B_0$ 。这仅出现在电厂出线(或负荷馈线)全停后恢复送电且机组(或负荷)恢复并网的情况。设新增节点  $j$  与原网络节点  $i$  之间存在连接关系,且互联电抗为  $x_{ij}$ ,将导纳矩阵增加1阶,第  $j$  行与第  $j$  列元素除  $B_{0ij}$ 、 $B_{0ji}$ 、 $B_{0jj}$  外均为0,则修正如下:

$$B'_{0ij} = B'_{0ji} = -1/x_{ij} \quad (12)$$

$$B'_{0ii} = B_{0ii} + 1/x_{ij} \quad (13)$$

$$B'_{0jj} = 1/x_{ij} \quad (14)$$

若新节点是空载节点,没有接负荷和机组,则矩阵  $B_0$  不需要修正。

#### 3.2 矩阵 $A$ 的求解

对于3.1节网络结构变化(2)中最普遍的网络拓扑变化给出一种便捷的矩阵  $A$  修正方法。不难证

明,矩阵  $B_0$  为非奇异矩阵。设节点  $i, j$  之间增加1条支路,则根据矩阵反演公式得<sup>[18]</sup>:

$$A' = (B'_0)^{-1} = A - (x_{ij} + CB_0^{-1}C^T)^{-1} AC^T CA \quad (15)$$

其中,矩阵  $A'$  为对矩阵  $A$  进行修正后的矩阵。利用式(15)可将矩阵求逆运算转化为求几次矩阵乘积运算,大幅减小了计算量,有效提高了计算速度。

#### 3.3 可调元件有功调节限值的修正

可调元件所带出力接近调节范围上(下)限时,其向上(向下)只有很小的调整空间,如果这些元件参与计算,则策略中可能会包含很多调整量很小的调节措施,使该策略的可执行性很低,其原因如下。

(1)调整措施增多,降低了断面控制的时效性。断面重载或越限属于紧急情况,实际调度中应保证控制的时效性,调整措施数量多将使执行工作量加大、时效性降低,且机组的自动发电控制(AGC)设置了调节步长死区,调节量太小,机组无法响应。

(2)调节效果有限。由于调节量小,这些调节措施对断面控制的效果十分有限。

(3)调节措施实际为无效措施。调节元件的有功出力存在波动,即使该元件已达到其调节极限,其当前出力与调节上(下)限也可能存在一定偏差,该偏差只是理论上的可调空间,此时再将该元件视为具有上(下)调节能力是不合适的。

因此,本文将向上(向下)可调空间在10 MW以内的元件的调节上(下)限直接置为当前出力。该做法的优点是:自动剔除调整量较小的措施,提高了调整策略的实用性;由于求解范围缩小,计算时间将缩短。

## 4 案例分析

2018年迎峰度夏期间,Y省网用电负荷屡创新高,持续多日均在高峰时段电力平衡紧张。通过组织跨区跨省电力经HY断面支援Y省,尽最大可能保障其电力可靠供应。由于对输电通道的充分利用,H省内断面2(由Q-D的3回500 kV线路组成)、断面3(由L-J的3回500 kV线路组成)重载;同时,H省电网西部水电大发(包括S一、S三大型水电厂处于溢流满发状态),该省网西电东送北通道断面1(由D-X及D-K这2回500 kV线路组成)重载。各关键断面如图1中所示。在夏季连续多日上述3个断面潮流均接近稳定极限,严重威胁电网安全稳定;同时度夏期间大部分机组都已带满,可调资源有限,断面控制难度较大。

取2018年7月20日19:50作为研究时刻,应用本文方法进行分析。H省电网内重载率超过80%的断面为上述3个断面,将其作为目标断面。该时刻各断面的实际潮流及负载率如表1所示。

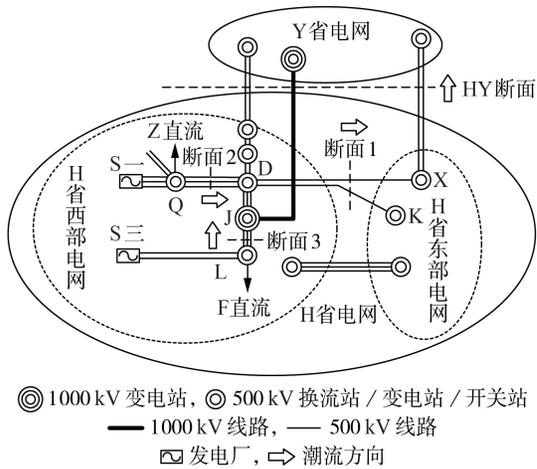


图1 重载断面潮流流向示意图

Fig.1 Schematic diagram of power flow direction for heavy-load sections

表1 调整前目标断面实际潮流及负载率

Table 1 Actual power flow and load ratio of target sections before adjustment

断面	断面潮流 / MW	断面限额 / MW	断面负载率 / %
1	2777	2800	99.18
2	3860	4000	96.50
3	1826	2200	83.00

3个断面送受端关系并不一致。例如:增加Z直流功率虽然会减轻断面1、2潮流,但会加重断面3潮流;增加F直流送出功率虽然会减轻断面1、3潮流,但会加重断面2潮流。其他机组的调整同样也会引起这3个目标断面的潮流变化不一致。因此,各可调元件的调整方向以及调整量并不容易确定,必须根据断面当前的重载程度以及各可调元件调整后引起的功率变化综合确定。

利用本文方法建立线性规划模型,按照优先选取省内调节资源的原则,H省内可调元件包含56台机组与5回直流,按3.3节所述方法共将16个限值进行修正。矩阵 $B_0$ 阶数为8815,利用本文方法得出各可调元件的调整策略如表2所示,表中未列出调整量为0的元件。单断面约束的调整策略如表3所示,

表2 多断面调整策略

Table 2 Adjustment strategy of multiple sections

调整元件	可调范围	调整前功率	调整量
白A4号机	150~300	167.1	105.5
阳A1号机	150~300	219.7	80.3
阳A2号机	150~300	218.1	81.9
阳A3号机	150~300	229.0	71.0
阳A4号机	150~300	227.9	72.1
阳A5号机	300~600	508.7	91.3
Z直流	-3000~-300	-1449.0	-502.1

注:Z直流由本电气岛送出,其功率为负值,同理,其调整量为-502.1 MW相当于增加Z直流送出功率502.1 MW。

可见断面1的调整策略与多断面的策略相同,说明主要制约断面为断面1。

表3 单断面调整策略

Table 3 Adjustment strategy of single section

断面	调整元件	可调范围 / MW	调整前功率 / MW	调整量 / MW
1	白A4号机	150~300	167.1	105.5
	阳A1号机	150~300	219.7	80.3
	阳A2号机	150~300	218.1	81.9
	阳A3号机	150~300	229.0	71.0
	阳A4号机	150~300	227.9	72.1
	阳A5号机	300~600	508.7	91.3
2	Z直流	-3000~-300	-1449.0	-502.1
	香A6号机	320~640	565.4	74.6
	潘A1号机	0~250	80.0	162.5
	龙A1号机	0~90	50.4	39.6
	Z直流	-3000~-300	-1449.0	-276.7

本案例在Thinkpad L440笔记本电脑(处理器为Intel i3-4000M双核2.4 GHz,内存4 GB)上完成计算,利用MATLAB软件生成矩阵 $A$ 耗时约70 s,利用LINGO软件求解线性规划问题耗时2 s。需要指出的是,本案例中矩阵 $A$ 是对矩阵 $B_0$ 直接求逆得到。由前文知,程序进入计时循环后不需重新生成矩阵 $A$ ,且仅在网络拓扑变化时进行少量修正(见3.1节与3.2节),因此程序在后续启动新一轮计算时耗时会更短。

将上述调整策略导入在线安全分析系统后进行交流潮流计算(耗时约15 s)发现未造成目标断面以外的其他断面负载率超过90%,目标断面调整后的功率如表4所示,可见负载率基本控制在90%以内(直流潮流法是一种近似算法,存在一定误差,导致断面1负载率为90.58%,但该误差在可接受的范围内),满足控制要求。

表4 调整后各目标断面的潮流计算结果

Table 4 Power flow calculation results of each target section after adjustment

断面	调整后功率 / MW	负载率 / %
1	2536.2	90.58
2	3322.9	83.07
3	1885.5	85.70

目标断面对调整策略中涉及的调节元件的灵敏度如表5所示。由表中可见,不同目标断面对同一调整元件的灵敏度符号并不一致,这意味着调整该元件在降低某些断面潮流的同时必然增大另一些断面潮流,但最优策略正是要调节这些元件。因此,文献[15-16]中将不同目标支路灵敏度符号相反的调节元件剔除的做法可能遗漏最优解。本文方法没有剔除可调元件,也未对可调元件的调整方向和调节次序进行限制,因此可保证策略的最优性。

表 5 目标断面对调整元件的灵敏度  
Table 5 Sensitivity of target sections to adjustment elements

元件名称	灵敏度		
	断面 1	断面 2	断面 3
白 A4 号机	-0.373 250	-0.532 990	0.045 157
阳 A1 号机	-0.412 740	-0.543 380	0.007 713
阳 A2 号机	-0.412 740	-0.543 380	0.007 713
阳 A3 号机	-0.413 510	-0.543 560	0.007 074
阳 A4 号机	-0.413 510	-0.543 560	0.007 074
阳 A5 号机	-0.409 350	-0.543 080	0.008 910
Z 直流	0.107 811	0.342 746	-0.203 198

## 5 结论

本文提出一种区域电网内多断面重载的协同控制策略在线生成方法,为实际调度中遇到的多断面协同控制难题提供了一种解决方案。实际案例验证表明本文方法有效。本文得到如下结论。

(1) 本文结合调度实际,以断面总功率不越限为控制目标,以调节量最小为优化目标,考虑调节元件调节范围约束,建立非线性规划模型,并利用辅助变量法将其转化为线性规划模型,保证了求解的收敛性和计算速度,其可适用于在线应用。

(2) 为了满足实时调度运行的快速计算要求,本文制定算法的优化措施。针对各类倒闸操作引起的电网拓扑结构变化,提出求解节点电纳矩阵及其逆矩阵的修正方法;提出可调元件调节限值修正策略,一方面剔除调整量较小的调整措施,提高了策略的实用性,另一方面缩小寻解范围,提高了计算速度。

(3) 本文提出完整的周期性滚动在线计算流程。利用状态估计数据和网络参数形成线性规划模型,并利用 LINGO 软件求解模型,计算完成后将策略代入在线安全分析系统进行交流潮流安全校核,实际电网验证表明每轮计算耗时在 2 min 以内,满足在线应用要求。

## 参考文献:

[1] 任建文,魏俊姣,谷雨峰. 基于多目标粒子群优化算法的连锁跳闸预防控制[J]. 电力自动化设备,2016,36(7):53-59.  
REN Jianwen,WEI Junjiao,GU Yufeng. Preventive control based on multi-objective particle swarm optimization algorithm for cascading trips[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(7):53-59.

[2] OUYANG J X,LI M Y,ZHANG Z, et al. Multi-timescale active and reactive power-coordinated control of large-scale wind integrated power system for severe wind speed fluctuation[J]. IEEE Access,2019,7:51201-51210.

[3] 郑延海,张小白,钱玉妹,等. 电力系统实时安全约束调度的混合算法[J]. 电力系统自动化,2005,29(12):49-52.  
ZHENG Yanhai,ZHANG Xiaobai,QIAN Yumei, et al. Hybrid algorithm for real-time security constrained dispatch of power system[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(12):49-52.

[4] 程临燕,郝治国,张保会,等. 基于内点法消除输电断面过载的

实时控制算法[J]. 电力系统自动化,2011,35(17):51-55.

CHENG Linyan,HAO Zhiguo,ZHANG Baohui, et al. Fast elimination of overload in transmission line section based on simplified primal-dual interior point method[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(17):51-55.

- [5] 徐岩,鄧静,樊世通. 基于功率灵敏度和经济补偿最小化的线路过负荷紧急控制方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):118-123.  
XU Yan,ZHI Jing,FAN Shitong. Line overload emergency control based on power sensitivity and minimized economic compensation[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(1):118-123.
- [6] 邓佑满,黎辉,张伯明,等. 电力系统有功安全校正策略的反向等量配对调整法[J]. 电力系统自动化,1999,23(18):5-8.  
DENG Youman,LI Hui,ZHANG Boming, et al. Adjustment of equal and opposite quantities in pairs for strategy of active power security correction of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,1999,23(18):5-8.
- [7] 邓佑满,张伯明,相年德,等. 联络线族的有功安全校正控制[J]. 电力系统自动化,1994,18(6):47-51.  
DENG Youman,ZHANG Boming,XIANG Niande, et al. Security corrective strategy for the alleviation of active power violations on tie-line-clusters[J]. Automation of Electric Power Systems,1994,18(6):47-51.
- [8] 姚峰,张保会,周德才,等. 输电断面有功安全性保护及其快速算法[J]. 中国电机工程学报,2006,26(13):31-36.  
YAO Feng,ZHANG Baohui,ZHOU Decai, et al. Active power security protection of transmission section and its fast algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(13):31-36.
- [9] 程临燕,张保会,郝治国,等. 基于综合灵敏度分析的快速控制算法研究[J]. 电力自动化设备,2009,29(4):46-49.  
CHENG Linyan,ZHANG Baohui,HAO Zhiguo, et al. Fast control algorithm based on integrative sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(4):46-49.
- [10] 徐岩,鄧静. 基于功率灵敏度的线路过载划区域紧急控制策略[J]. 电工技术学报,2015,30(15):60-72.  
XU Yan,ZHI Jing. A zone-divided emergency control strategy for overload lines based on power sensitivity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(15):60-72.
- [11] 牟颖,张保会,薄志谦. 防止输电断面连锁过载的快速控制算法[J]. 电力系统自动化,2017,41(3):39-45.  
MU Ying,ZHANG Baohui,BO Zhiqian. Fast control algorithm for preventing cascading overload on transmission section[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(3):39-45.
- [12] 刘文颖,徐鹏,梁才,等. 一种计及交叉权重的有功校正控制算法[J]. 电工技术学报,2014,29(8):281-288.  
LIU Wenying,XU Peng,LIANG Cai, et al. A new algorithm of active power correction control using cross-weight factor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(8):281-288.
- [13] 顾雪平,张尚,王涛,等. 安全域视角下的有功安全校正优化控制方法[J]. 电力系统自动化,2017,41(18):17-24.  
GU Xueping,ZHANG Shang,WANG Tao, et al. Optimization control strategy for active power correction from perspective of security region[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(18):17-24.
- [14] 吴际舜,侯志俭. 利用带上、下界变量的线性规划法求解有功安全校正问题[J]. 电力系统自动化,1985,9(1):12-20.  
WU Jishun,HOU Zhijian. Active power security control using linear programming with bounded variables[J]. Automation of Electric Power Systems,1985,9(1):12-20.

- [15] 朱文东,郝玉国,刘广一,等. 应用线性规划方法的安全约束调度[J]. 中国电机工程学报,1994,14(4):57-64.  
ZHU Wendong,HAO Yuguo,LIU Guangyi,et al. Security constrained dispatch using linear programming[J]. Proceedings of the CSEE,1994,14(4):57-64.
- [16] 赵晋泉,江晓东,张伯明. 一种基于连续线性规划技术的在线静态安全校正算法[J]. 电网技术,2005,29(5):25-30.  
ZHAO Jinquan,CHIANG Hsiaodong,ZHANG Boming. A successive linear programming based on-line static security corrective control approach[J]. Power System Technology,2005,29(5):25-30.
- [17] 侯志俭,吴际舜. 电力系统有功安全再安排的一种新算法[J]. 中国电机工程学报,1988,8(3):60-66.  
HOU Zhijian,WU Jishun. A novel algorithm for keal power rescheduling with security constraints[J]. Proceedings of the CSEE,1988,8(3):60-66.
- [18] 韩祯祥. 电力系统分析[M]. 5版. 杭州:浙江大学出版社,2011.

- [19] 徐伟宣,何建秋,邹庆云. 目标函数带绝对值号的特殊非线性规划问题[J]. 优选与管理科学,1987(3):9-13.

#### 作者简介:



刘 阳

刘 阳(1988—),男,湖北京山人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统调度运行控制技术、大电网在线安全分析及应用(E-mail:liuyangwuh520@sina.com);

夏 添(1990—),男,湖北武汉人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统调度运行控制技术(E-mail:1873397650@qq.com);

汪 旻(1981—),男,湖北武汉人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统调度运行与保护控制(E-mail:squall\_wy@sina.com)。

(编辑 王锦秀)

## On-line generation method of active power coordinated control strategy for multiple transmission sections in regional power grid

LIU Yang,XIA Tian,WANG Yang

(Central Branch of State Grid Corporation of China,Wuhan 430077,China)

**Abstract:** A nonlinear programming model based on the section active power sensitivity of DC power flow method is built to solve the active power coordinated strategy of multiple sections, which takes the power of multiple sections within the limit as its control objective and the minimum adjustment quantity as its optimal objective. In order to improve the reliability and speed of model-solving, the auxiliary variables are introduced to transfer the model into a linear programming model. The AC power flow method is used for security check to verify the validity of the strategy. The closed-loop on-line rolling calculation flowchart is designed from three aspects of calculation startup, modeling and solving, and security check. The rolling modification method of node admittance matrix and its inverse matrix suitable for various grid topology change conditions is proposed. The modification strategy of active power adjustment limit of adjustable elements is used to eliminate invalid adjustment measures. The case results verify the effectiveness of the proposed method. The calculation time of each round is within 2 min, which shows that the calculation speed of the proposed method satisfies the requirement of real-time dispatching.

**Key words:** multiple transmission sections; active power coordinated control; real-time dispatching; active power security correction; nonlinear programming; linear programming; section active power sensitivity