

## 基于可行空间并行的安全约束最优潮流

韦延宏<sup>1</sup>, 夏小琴<sup>2</sup>, 任先成<sup>2</sup>, 徐伟<sup>2</sup>

(1. 贵州万峰电力股份有限公司, 贵州 兴义 562400;

2. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106)

**摘要:**为了提高电网控制决策的实时性,文中将计及预想故障安全约束的经济性优化问题分解为以发电成本最小为目标的基态最优潮流主问题和预想故障安全校核子问题,并提出一种基于可调空间切片并行的分解协调算法进行求解,以避免交替迭代。首先,按不同比例对可调空间进行切片形成多个切片方案,并基于并行计算平台采用原始-对偶内点法对各切片方案进行基态最优潮流主问题求解;然后,对各优化后方式进行预想故障并行安全校核;接着从通过安全校核的切片方案中挑选出发电成本最小的方案;最后,以贵州省某市电网为算例分析验证了所提方法的有效性。

**关键词:**经济优化调度;安全约束;分解协调;切片并行方案;最优潮流;最小发电成本

中图分类号:TM734

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2021)06-0205-05

### 0 引言

能源是人类社会生存发展的重要物质基础,攸关国计民生和国家安全战略竞争力<sup>[1]</sup>。我国能源发展要求电网发挥不同电源之间的互补特性,提高风、光可再生能源的消纳能力,降低电网的运行成本,得到了电网调度运行的重点关注<sup>[2-8]</sup>。

电网安全、经济运行控制本质上属于安全约束最优潮流(security constrained optimal power flow, SCOPF)问题。SCOPF在最优潮流(optimal power flow, OPF)的基础上计及基态下的过载、电压和预想故障下的静态过载、静态电压等安全约束,是兼顾电网经济性与安全性的有效技术手段。由于电网预想故障集规模庞大,导致SCOPF问题联立求解时存在巨大困难<sup>[3,9-13]</sup>。目前常用的2种求解方法为:(1)采用并行计算技术的联立求解法。文献[11-12]采用基于多核中央处理器(central processing unit, CPU)的并行计算技术,但该技术已经成熟,算法性能提升空间不大。文献[13]采用图形处理器(graphics processing unit, GPU)并行计算技术,与传统多核CPU并行相比,GPU并行对编程有较高限制,已有研究成果不适用于在线系统的实时决策。(2)分解协调法。文献[14-15]将SCOPF问题分解为基态OPF主问题与预想故障集子问题。文献[16]将大电网SCOPF问题分解为无安全约束的优化主问题和网络潮流安全约束子问题。分解协调法计算时间较短,但所需迭代次数较多。

基态OPF优化结果中控制变量的调整量较大时易导致预想故障下出现安全稳定问题。常规分解协调法下,若预想故障安全校核不通过,需重新进行基态OPF主问题求解直至满足预想故障安全校核要求。若在主问题求解时预先考虑基于不同调整空间搜索出多个解,再对多个解进行预想故障安全校核,则可避免交替迭代。同时,可采用多核CPU的并行计算技术进行不同空间下的基态OPF优化及预想故障安全校核,从而进一步提高求解效率。

鉴于此,文中提出一种基于可调空间切片并行的电网经济性在线优化决策分解协调算法。将原问题分解为以发电成本最小为目标的基态OPF主问题和预想故障安全校核子问题。按不同比例对可调空间进行切片,基于并行计算平台,对各切片后的可调空间进行基态OPF主问题求解及预想故障安全校核子问题求解。从通过安全校核的切片方案中挑选出发电成本最小的解。为了保证算法的鲁棒性,采用原始-对偶内点法<sup>[17]</sup>对基态OPF主问题进行求解。为进一步提高计算效率,对待校核的预想故障集进行主导故障筛选。最后利用某实际电网在线算例验证该方法的有效性。

### 1 最优潮流模型

#### 1.1 目标函数

以发电成本最小作为优化目标,采用二次函数表示机组的发电成本。故优化目标 $F$ 为:

$$F = \min \sum_{i=1}^N (a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i) \quad (1)$$

式中: $N$ 为发电机组总数; $P_i$ 为第*i*个发电机组的有功出力; $a_i, b_i, c_i$ 为第*i*个发电机组的耗量特性系数。新能源机组中 $a_i, b_i$ 为0,因为新能源发电没有燃料成本,所以其发电成本与发电量无关<sup>[18]</sup>。

### 1.2 等式约束

基态和预想故障的功率平衡约束如下:

$$\begin{cases} V_i \sum_{j \in S_N} (V_j Y_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij})) + P_{Di} - P_{Gi} = 0 \\ V_i \sum_{j \in S_N} (V_j Y_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij})) + Q_{Di} - Q_{Ri} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $i \in S_N, S_N$ 为所有节点集合; $P_{Gi}, Q_{Ri}$ 分别为节点*i*的有功电源功率、无功电源功率; $P_{Di}, Q_{Di}$ 分别为节点*i*的有功负荷、无功负荷; $V_i, V_j$ 分别为节点*i, j*的电压幅值; $\theta_i, \theta_j$ 分别为节点*i, j*的电压相角; $Y_{ij}, \alpha_{ij}$ 分别为节点*i, j*之间的导纳幅值和相角。

### 1.3 不等式约束

不等式约束包含基态和预想故障状态设备的物理特性约束和系统安全约束。其中,火电和天然气机组的有功出力需满足爬坡约束<sup>[19-20]</sup>,水电机组的有功出力需满足水电转换约束和水量约束<sup>[2]</sup>,风、光机组的有功出力需不超过下一时刻的预测有功出力。为了保证系统的安全稳定性,需为系统预留充足的备用容量。

$$\begin{cases} \underline{P}_i \leq P_i \leq \bar{P}_i \\ \underline{Q}_r \leq Q_r \leq \bar{Q}_r \\ \underline{R} \leq R \leq \bar{R} \\ \underline{\eta}_\lambda \leq \eta_\lambda \leq \bar{\eta}_\lambda \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P_i$ 为第*i*个发电机组的有功出力; $\bar{P}_i, \underline{P}_i$ 分别为第*i*个机组的有功出力上、下限; $Q_r$ 为第*r*个无功源的无功出力; $\bar{Q}_r, \underline{Q}_r$ 分别为第*r*个无功源的无功出力上、下限; $R$ 为备用容量; $\bar{R}, \underline{R}$ 分别为备用容量的上、下限; $\eta_\lambda$ 为第*λ*类安全稳定问题的裕度,包括基态的过载裕度、电压安全裕度,预想故障下的静态过载裕度和静态电压安全裕度; $\bar{\eta}_\lambda, \underline{\eta}_\lambda$ 分别为第*λ*类安全稳定问题裕度的上、下限。

传统 OPF 是在系统的结构参数和负荷都已给定的情况下调节控制变量(如发电机功率),使潮流分布满足所有运行约束条件,并使系统的某一性能指标达到最优。OPF 能同时考虑多种影响因素,但存在计算维度高、计算量大的问题。SCOPF 考虑了多个预想故障下的安全约束,求解更加困难。

## 2 并行求解方法

基于全可调空间进行基态 OPF 优化的结果可能无法满足预想故障的安全校核要求。常规分解协调法在预想故障安全校核不通过时需重新进行基态 OPF 主问题求解,直至满足预想故障安全校核要求。文中提出的并行分解算法对候选措施的可调空间进行切片,形成多个切片方案,基于并行计算平台对各切片方案进行基态 OPF 主问题求解和预想故障安全校核,从中选取满足预想故障安全校核要求且发电成本最小的方案,可避免常规分解协调法的交替迭代,提高求解速度。

### 2.1 分解协调主问题和子问题

将原 SCOPF 问题分解为基态 OPF 主问题和预想故障安全校核子问题,如图 1 所示。由含基态过载及基态电压安全约束的优化模型构成基态 OPF 主问题。子问题检验主问题中得到的发电机调整后方式在每一个预想故障下系统的静态过载裕度和静态电压安全裕度是否满足要求。

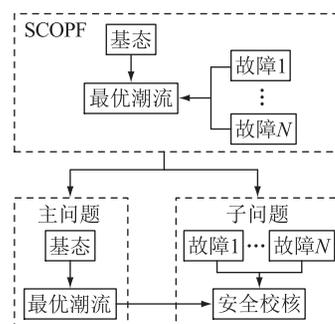


图 1 SCOPF 分解协调示意

Fig.1 Schematic diagram of SCOPF decomposition and coordination

### 2.2 可调空间切片

对可调空间进行切片,按不同切片比例同时减少发电机的可增可减空间,如式(4)所示,形成多个切片方案。

$$\begin{cases} \underline{P}_{i,m} = P_i - \rho_m (P_i - \underline{P}_i) \\ \bar{P}_{i,m} = P_i + \rho_m (\bar{P}_i - P_i) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\bar{P}_{i,m}, \underline{P}_{i,m}$ 分别为第*m*个切片方案下第*i*个机组的有功出力上、下限; $\rho_m$ 为第*m*个切片方案的切片比例; $\bar{P}_i, \underline{P}_i$ 分别为第*i*个发电机组的全可调空间的有功出力上、下限。

基于并行计算平台,根据各切片方案下的基态优化后方式进行故障筛选,并对有效故障进行静态安全稳定校核,从中选取满足安全校核要求且发电成本最小的方案。

### 2.3 基于可调空间切片的求解流程

基于可调空间切片并行的 SCOPF 求解流程如图 2 所示。基于采用分布式并行计算技术的集群计算系统<sup>[21]</sup>,采用可调空间切片并行的方式,将切片调整方案同时下发至计算节点,先进行基态 OPF 主问题计算,再基于优化后方式进行预想故障安全校核,最终在计算结果中选择满足要求的方案作为优化措施,以提高计算速度。

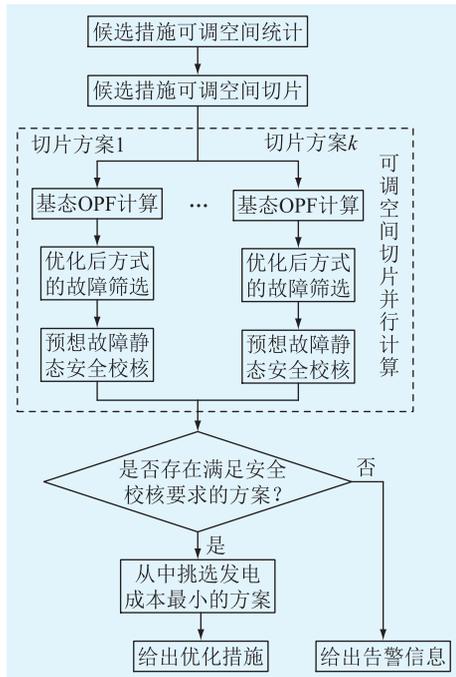


图 2 基于空间切片并行的求解流程  
Fig.2 Calculation flow chart based on parallel space slices

## 3 算例验证与结果分析

### 3.1 系统介绍

采用贵州省某市电网验证文中方法的有效性。某方式下有 6 台火电机组、1 个水电站和 1 个光伏电站投运,电网地理接线如图 3 所示。为构造基态过载不安全算例,将线路 1 和线路 2 的基态电流限值改为 200 A。为构造预想故障部分方案校核不安全算例,将线路 3 的事故电流限值改为 625 A。采用任意 8 个方式的计算耗时验证计算效率。

### 3.2 可调空间切片结果

火电机组 2 的当前有功出力、有功出力上、下限分别为 165.5 MW, 350 MW, 150 MW;水电机组的当前有功出力、有功出力上、下限分别为 38.82 MW, 50 MW, 28.82 MW;光伏机组的当前有功出力、预测出力分别为 18.93 MW, 19.88 MW。以这 3 台机组为例,可调空间切片结果如表 1 所示。火电机组 1 为平衡机,不进行切片,其余机组参照表 1 处理。

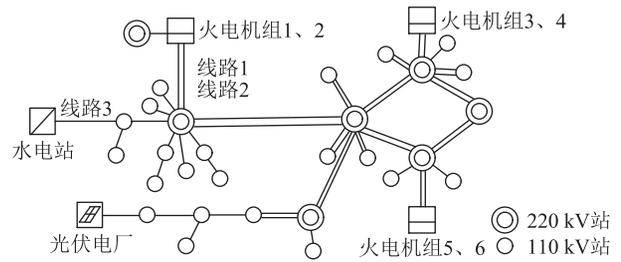


图 3 地理接线

Fig.3 Geographical wiring

表 1 机组可调空间切片结果

Table 1 Slicing results of units adjustable space

方案号	切片比例	火电机组 2 /MW	水电机组 /MW	光伏机组 /MW
1	0.2	[162.5, 202.4]	[36.82, 41.06]	[15.14, 19.12]
2	0.4	[159.4, 239.3]	[34.82, 43.29]	[11.36, 19.31]
3	0.6	[156.3, 276.2]	[32.82, 45.53]	[7.57, 19.50]
4	0.8	[153.2, 313.1]	[30.82, 47.76]	[3.79, 19.69]
5	1.0	[150.0, 350.0]	[28.82, 50.00]	[0, 19.88]

### 3.3 优化结果

火电机组 1 的当前有功出力为 183.2 MW,不同切片方案下的机组调整后出力如表 2 所示。在线路 1 和 2 的送端,发电成本较大的火电机组 1 和 2 的有功出力减少了;在线路 1 和 2 的受端,发电成本较小的水电和光伏机组的有功出力增加了,发电成本较大的其余火电机组未参与调整,结果合理。

表 2 各切片方案下机组调整后有功出力

Table 2 Units' adjusted output under the slicing schemes

调整机组	不同方案下调整后有功出力/MW				
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
水电机组	2.24	4.47	6.71	8.94	11.18
光伏机组	0.19	0.38	0.57	0.76	0.95
火电机组 1	182.0	180.8	179.6	178.4	177.1
火电机组 2	164.3	163.1	161.9	160.7	159.4

各切片方案下的安全校核结果及优化后发电成本如表 3 所示。从校核安全的方案 1 至方案 3 中选取发电成本最小的方案 3 作为最终方案。

表 3 各切片方案控制效果

Table 3 Control effect of the slicing schemes

方案号	基态裕度/%	预想故障裕度/%	优化后发电成本/万元
1	12.57	3.05	0.268
2	12.49	2.81	0.266
3	12.42	1.73	0.263
4	12.21	-1.92	0.260
5	11.95	-2.58	0.253

### 3.4 系统运行耗时

8个方式下的计算耗时如表4所示,平均耗时为5.52 s,满足实时控制的要求。

表4 运行耗时  
Table 4 Running time

序号	运行耗时/s	序号	运行耗时/s
1	5.52	5	5.51
2	5.51	6	5.52
3	5.53	7	5.53
4	5.51	8	5.53

常规分解协调算法在全可调空间下无法搜索到满足安全要求的结果时需交替迭代,迭代多次时所需的计算时间即为文中方法的多倍。

## 4 结语

针对计及安全约束的电网经济性难以实现在线优化的问题,文中提出了一种基于可调空间切片并行的分解协调算法,并以贵州省某市电网为例进行了验证。与传统的分解协调算法相比,文中所提基于可调空间切片并行计算方案的分解协调算法无需交替迭代,适用于电网在线优化决策。

本文得到贵州万峰电力股份有限公司科技项目“兴义地方电网节能经济运行优化控制技术与示范应用项目”资助,谨此致谢!

### 参考文献:

[1] 国家发展改革委. 国家能源局关于印发能源发展“十三五”规划的通知[EB/OL]. (2017-01-17)[2021-05-11]. [http://www.nea.gov.cn/2017-01/17/c\\_135989417.htm](http://www.nea.gov.cn/2017-01/17/c_135989417.htm).  
National Development and Reform Commission. Notice of the national energy administration on issuing the 13th five-year plan for energy development [EB/OL]. (2017-01-17)[2021-05-11]. [http://www.nea.gov.cn/2017-01/17/c\\_135989417.htm](http://www.nea.gov.cn/2017-01/17/c_135989417.htm).

[2] 侯文庭, 韦化. 考虑核电可调度性的风-光-核-水-火多源协调短期优化调度[J]. 电工技术学报, 2018, 33(12): 2873-2882.  
HOU Wenting, WEI Hua. A multi-source coordinated short-term dispatch model considering the dispatchability of nuclear power plants [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(12): 2873-2882.

[3] 竺如洁, 韦化, 白晓清. 多源动态最优潮流的分布鲁棒优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3489-3498.  
ZHU Rujie, WEI Hua, BAI Xiaoqing. Distributionally robust optimization of multi-energy dynamic optimal power flow [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3489-3498.

[4] 潘益, 梅飞, 郑建勇, 等. 计及静态安全因素与热电最优潮流的综合能源系统联合运行优化模型[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 50-59.

PAN Yi, MEI Fei, ZHENG Jianyong, et al. Operation optimization model for multi-integrated energy systems considering static security and optimal energy flow [J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 50-59.

[5] 崔杨, 姜涛, 仲悟之, 等. 考虑风电消纳的区域综合能源系统源荷协调经济调度[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2474-2483.  
CUI Yang, JIANG Tao, ZHONG Wuzhi, et al. Source-load coordination economic dispatch method for regional integrated energy system considering wind power accommodation [J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2474-2483.

[6] 冯麒铭, 刘继春, 杨阳方, 等. 含不同类型能源的多局域电网优化经济调度[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 452-461.  
FENG Qiming, LIU Jichun, YANG Yangfang, et al. Multi-local grid optimization economic dispatch with different types of energy [J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 452-461.

[7] 杨海柱, 李梦龙, 江昭阳, 等. 考虑需求侧电热气负荷响应的区域综合能源系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 30-37.  
YANG Haizhu, LI Menglong, JIANG Zhaoyang, et al. Optimal operation of regional integrated energy system considering demand side electricity heat and natural-gas loads response [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 30-37.

[8] 周星球, 郑凌蔚, 杨兰, 等. 考虑多重不确定性的综合能源系统日前优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2466-2473.  
ZHOU Xingqiu, ZHENG Lingwei, YANG Lan, et al. Day-ahead optimal dispatch of an integrated energy system considering multiple uncertainty [J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2466-2473.

[9] 郭瑞鹏, 边麟龙, 宋少群, 等. 安全约束最优潮流的实用模型及故障态约束缩减方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 161-168.  
GUO Ruipeng, BIAN Linlong, SONG Shaoqun, et al. Practical model of security constrained optimal power flow and reduction methods for contingency constraints [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 161-168.

[10] 李志伟, 赵书强, 刘金山. 基于机会约束目标规划的风-光-水-气-火-储联合优化调度[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 214-223.  
LI Zhiwei, ZHAO Shuqiang, LIU Jinshan. Coordinated optimal dispatch of wind-photovoltaic-hydro-gas-thermal-storage system based on chance-constrained goal programming [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 214-223.

[11] 阳育德, 陶琢, 刘辉, 等. 电力系统静态安全最优潮流并行计算方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 99-105.  
YANG Yude, TAO Zhuo, LIU Hui, et al. Parallel computation methods for static security-constrained optimal power flow of power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 99-105.

[12] 傅志生, 白晓清, 李佩杰, 等. 一种快速求解大规模安全约束最优潮流的多核并行方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 29-37.  
FU Zhisheng, BAI Xiaoqing, LI Peijie, et al. A high-speed

- multi-core parallel method for solving large-scale security constrained OPF[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(3):29-37.
- [13] GENG G C, JIANG Q Y, SUN Y X. Parallel transient stability-constrained optimal power flow using GPU as coprocessor[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(3):1436-1445.
- [14] 钟世民, 韩学山, 刘道伟, 等. 计及校正控制的安全约束最优潮流的奔德斯分解算法[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(1):65-71.  
ZHONG Shimin, HAN Xueshan, LIU Daowei, et al. Benders decomposition algorithm for corrective security-constrained optimal power flow[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(1):65-71.
- [15] 晏鸣宇, 张伊宁, 艾小猛, 等. 采用 Benders 分解含机组禁止运行区间的安全约束最优潮流[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(6):60-65.  
YAN Mingyu, ZHANG Yining, AI Xiaomeng, et al. Benders decomposition based security-constrained optimal power flow considering generator prohibited zones[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(6):60-65.
- [16] 丁强, 李锴, 朱泽磊, 等. 基于变量降维的大电网经济调度优化方法[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(18):130-136.  
DING Qiang, LI Kai, ZHU Zelei, et al. Economic dispatch optimization method for large-scale power grid based on variable dimension reduction[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(18):130-136.
- [17] WEI H, SASAKI H, KUBOKAWA J, et al. An interior point nonlinear programming for optimal power flow problems with a novel data structure[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1998, 13(3):870-877.
- [18] 计长安, 张浩, 吕志鹏, 等. B 型剩余电流保护在新能源发电和电动汽车中的应用[J]. *供用电*, 2019, 36(4):31-36.  
JI Changan, ZHANG Hao, LYU Zhipeng, et al. Applications of type B residual current protection in new energy power generation and electric vehicle[J]. *Distribution & Utilization*, 2018, 36(4):31-36.
- [19] 吴政球, 叶世顺, 匡文凯, 等. 电力市场日前  $N-1$  安全校正模型及算法[J]. *电力自动化设备*, 2008, 28(10):42-45.  
WU Zhengqiu, YE Shishun, KUANG Wenkai, et al. Day-ahead  $N-1$  security rescheduling model of power market and its algorithm[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2008, 28(10):42-45.
- [20] 夏小琴, 鲍颜红, 任先成, 等. 计及静态和暂态安全稳定约束的调度计划辅助决策[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(15):24-30.  
XIA Xiaoqin, BAO Yanhong, REN Xiancheng, et al. Auxiliary decision-making of dispatching plan considering static security and transient stability constrains[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(15):24-30.
- [21] 鲍颜红, 徐泰山, 许立雄, 等. 暂态稳定预防控制及极限功率集群计算[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(1):32-35.  
BAO Yanhong, XU Taishan, XU Lixiong, et al. Cluster computing mode for transient stability-constrained preventive control implementation and total transfer capability calculation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(1):32-35.

#### 作者简介:



韦延宏

韦延宏(1969),男,学士,高级工程师,从事电力系统自动化和多能互补相关工作(E-mail:wyh4819@163.com);

夏小琴(1988),女,硕士,高级工程师,从事电力系统稳定分析与控制相关工作;

任先成(1980),男,博士,高级工程师,从事电力系统稳定分析与控制相关工作。

## Security constrained optimal power flow based on parallel adjustment space

WEI Yanhong<sup>1</sup>, XIA Xiaoqin<sup>2</sup>, REN Xiancheng<sup>2</sup>, XU Wei<sup>2</sup>

(1. Guizhou Wanfeng Electric Power Co., Ltd., Xingyi 562400, China;

2. NARI Group (State Grid Electric Power Research Institute) Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

**Abstract:** In order to improve the real-time performance of power grid control decision-making, a scheme is proposed in the paper. This scheme decomposes the economic optimization problem that takes into account the expected fail-safe constraints into the main problem of the ground state optimal power flow with the goal of minimizing the power generation cost and the sub-problem of the expected fail-safe check. At the same time, a decomposition and coordination algorithm based on tunable space slice parallel is proposed to solve the problem without alternate iterations. First of all, the adjustable space is sliced to form multiple slicing schemes according to different proportions. Based on the parallel computing platform and the slicing schemes, the primal dual interior point method is used to solve the base-case optimal power flow master problem. Secondly, security check of contingencies is carried out by parallel computing for different optimized cases. Then, the solution with the minimum cost is chosen from the safe solutions. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by cases in the regional comprehensive energy system of a city in Guizhou province.

**Keywords:** economic optimization scheduling; security constraints; decomposition coordination; slicing parallel scheme; optimal power flow; the minimum power generation cost

(编辑 方晶)