

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230750

考虑断面耦合控制的特高压复杂大电网 最大供电能力优化方法

陈文哲¹, 黄牧涛^{2a}, 李群山¹, 曾令康¹, 朱可凡¹, 高素花^{2b}, 陈兴邦^{2a}

(1. 国家电网有限公司华中分部, 湖北 武汉 430077;

2. 华中科技大学 a. 电气与工程学院; b. 土木与水利工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 最大供电能力计算是特高压复杂大电网优化运行的重要问题, 随着高比例可再生能源大量接入电网, 电力电量平衡问题愈发突出。计及考虑稳定约束、耦合断面约束、机组调节能力约束后, 最大供电能力计算问题呈现高维特征, 难以对其建模及求解。对此, 首先根据传输断面限制和特高压复杂大电网分区运行的特点, 搭建了考虑断面耦合控制的特高压复杂大电网最大供电能力优化调度模型, 然后分别应用单纯形法(SM)、内点法(IP)、模拟退火算法(SA)、白鲸优化算法(BWO)和蜂群算法(ABC)求解模型, 计算大电网在日内未来 15 min 最大供电能力, 并提出各类型电源和备用的协调优化方案。最后以某省网为例进行模型及求解方法验证。仿真结果显示, 因为电力系统规模庞大和断面间耦合关系复杂, 启发式智能优化算法存在运行时间较长、收敛速度较慢、搜索精度不高的问题, 而内点法收敛迅速、鲁棒性强、对初值的选择不敏感, 具有更好的稳定性和计算效率, 可为复杂特高压电网电力保供和电力平衡提供有效实用支撑。

关键词: 特高压复杂大电网; 分区电网; 最大供电能力; 多电源和备用协调优化; 断面耦合控制; 内点法; 启发式智能优化算法

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)11-0217-05

1 引言

电网最大供电能力(TSC)是指在包括 N-1 安全规则等各种实际电力系统约束条件下, 电网最大的负荷供应能力^[1]。TSC 计算主要通过将 TSC 计算转化为一个考虑潮流方程、元件热稳定、节点电压、发电机、N-1 静态安全等约束条件的优化问题, 通过以单纯形法、内点法^[2]为代表的传统优化算法或以 NSGA-II 算法^[3]、自适应差分进化算法^[4]、粒子群算法^[5]为代表的智能优化算法求解该优化问题得到电网最大供电能力。传统优化算法收敛速度快、求解结果稳定, 但对求解问题要求较高。智能优化算法适用性较强但算法参数设置缺乏确切依据、求解结果不稳定、可信性相对较低。近年来, 随着电网规模不断增大, 电网分层分区运行成为大电网发展的必然趋势^[6],

极少研究基于分区运行的特高压复杂大电网最大供电能力问题, 其难点主要包括: ①电网内部直流落点增多, 直流功率的受入、疏散能力受电网架结构、机组开机方式、备用水平、负荷等多种因素影响^[7-8], 实际调度工作需满足直流稳定规定的要求; 高比例新能源并网后, 为适应新能源的波动和保证直流功率的正常受入, 评估省网的最大供电能力时需充分考虑系统旋转备用。②特高压复杂大电网源荷空间分布不平衡加剧, 进行跨区大功率输送时易产生断面卡口, 此外为潮流远距离输送产生的动态稳定问题而制定的断面耦合控制要求也对输送功率有限制。③互联电网规模的提高带来的维数灾问题。对此, 根据传输断面限制和特高压复杂大电网分区运行特点, 将同一分区电网内的所有火电、水电、抽蓄机组进行聚合, 搭建了计及电网安全稳定约束的特高压复杂大电网最大供电能力评估模型, 分别选择传统优化算法中

收稿日期: 2023-06-10, 修回日期: 2023-07-20

基金项目: 国家电网有限公司华中分部科技项目(5214DK220008)

作者简介: 陈文哲(1991-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统调度运行, E-mail: chenwenzhe_sgcc@126.com.cn

通讯作者: 黄牧涛(1973-), 女, 博士、研究员, 研究方向为能源博弈论、新型电力系统精准预测与优化调度、智慧综合能源系统规划与调控, E-mail: huangmutao@hust.edu.cn

的单纯形法、内点法和启发式智能优化算法中的模拟退火算法、白鲸优化算法、蜂群算法分别求解模型并比较性能。

2 特高压复杂大电网最大供电能力优化调度方法

2.1 场景定义

为了在更大范围内、更精细时间尺度内实现电力平衡,选择特高压复杂大电网所含省份中的一个省份作为目标省网,在不改变目标省网各片区机组的开机方式、假定目标省网内各分区的负荷按照当前时刻的负荷比例增长的情况下,依据目标省网内交直流联络线受电计划、光伏发电预测功率、常规机组的正负旋转备用,在满足电网安全约束前提下,综合计算某省在日内未来 15 min 的最大供电能力。

2.2 优化调度模型构建

2.2.1 目标函数

在目标省网不接受外援的情况下最大供电能力 F 主要通过上调目标省网内常规机组的发电量实现,因此选择目标函数为目标省网内各片区常规机组发电量上调最大作为目标函数,可表示为:

$$\max F = \sum_{i=1}^m \Delta P_i \quad (1)$$

式中, ΔP_i 为目标省网内第 i 个片区内的常规机组调增量,包括火电、水电和抽蓄; m 为目标省网内所包含的片区个数。

2.2.2 约束条件

(1) 功率平衡约束。在本场景中,目标省网内所有常规机组发电调整量、直流联络线的受电计划变化量之和与负荷变化量之和相等,可表示为:

$$\sum_{i=1}^m (\Delta P_i + \Delta P_{DC,i}) = \sum_{i=1}^m \Delta L_i \quad (2)$$

式中, $\Delta P_{DC,i}$ 为当片区 i 内有跨区域电网直流联络线落点时,落点在该片区的直流联络线的发电计划变化量; ΔL_i 为片区 i 负荷变化量。

(2) 常规机组旋转备用容量约束。在不考虑需求侧响应等负荷侧控制措施的情况下,为不改变发电机组开机方式,常规机组发电功率调整量不得超过常规机组实时正负备用容量,即:

$$N_{NRC_i} \leq \Delta P_i \leq P_{PRC_i} \quad (3)$$

式中, N_{NRC_i} 为常规机组旋转负备用; P_{PRC_i} 为常规机组旋转正备用。

常规机组包括水电、火电和抽蓄。

(3) 潮流断面约束。调度后断面功率采用断面灵敏度近似计算,为降低建模难度,各片区对某

一断面的断面灵敏度采用该片区容量最大的发电机对同一断面的灵敏度代替。假定某一重点关注潮流断面 q 由 M_g 条线路组成,各线路两端的起、止编号分别为 i_{qm} 、 j_{qm} ($m=1,2,\dots,M_g$ 表示线路编号),那么机组 k 对断面 q 的灵敏度 $S_{k,q}$ ^[8] 为:

$$S_{k,q} = \frac{d \sum_{m=1}^{M_g} P_{i_{qm}j_{qm}}}{dP_k} = - \sum_{m=1}^{M_g} B_{0i_{qm}j_{qm}} (A_{i_{qm}k} - A_{j_{qm}k}) \quad (4)$$

式中, $dP_{i_{qm}j_{qm}}$ 为线路 m 的单位有功变化量; dP_k 为机组 k 的单位有功变化; $B_{0i_{qm}j_{qm}}$ 为线路 m 对断面 q 的节点纳矩阵的第 i 行、第 j 列位置元素; $A_{i_{qm}k}$ 为节点纳矩阵的逆矩阵 \mathbf{A} 的第 i 行、第 k 列位置元素。

调度后断面功率需满足断面潮流约束为:

$$\begin{cases} P_q - \sum_{i=1}^m S_{i,q} \Delta P_i - \sum_{i=1}^m S_{DC,i} \Delta P_{DC,i} - L \leq P_{q\max} \\ P_{q\min} \leq P_q - \sum_{i=1}^m S_{i,q} \Delta P_i - \sum_{i=1}^m S_{DC,i} \Delta P_{DC,i} - L \end{cases} \quad (5)$$

$$L = \sum_{i=1}^m \left(S_{i,q} \frac{L_i}{\sum_{i=1}^m L_i} \sum_{i=1}^m \Delta L_i \right) \quad (6)$$

式中, P_q 为断面 q 当前时刻的功率; $P_{q\max}$ 、 $P_{q\min}$ 分别为按规定正方向当前潮流断面 q 的输送功率上、下限额; $S_{i,q}$ 为片区 i 对潮流断面 q 的灵敏度; $S_{DC,i}$ 为落点在片区 i 的直流联络线对潮流断面 q 的灵敏度; L 为负荷变化引起的潮流断面有功变化量。

(4) 省间交流断面受电计划约束。本场景中不考虑省间计划外的功率输送,省间交流断面功率应控制在交流断面受电计划周围,其计算式为:

$$\left| \sum_{i=1}^k (P_{AC} + \Delta P_{AC}) - \sum_{i=1}^k P_{plan} \right| \leq \epsilon \quad (7)$$

式中, P_{AC} 为交流联络线当前时刻功率; ΔP_{AC} 为交流联络线的功率变化量; P_{plan} 为交流联络线的受电计划; k 为省间交流断面所含联络线数量; ϵ 为常数。

(5) 省间交流断面耦合约束。省间交流断面耦合约束主要有两类,可表示为:

$$G(P_j + \Delta P_j, P_{coup} + \Delta P_{coup}) \leq 0 \quad \forall j \in M_C \quad (8)$$

式中, $G(P_j + \Delta P_j, P_{coup} + \Delta P_{coup})$ 为省间交流断面 j 与其耦合断面之间的耦合关系; $P_j + \Delta P_j$ 为调度后断面 j 的功率; $P_{coup} + \Delta P_{coup}$ 为断面 $coup$ 的调度后功率; M_C 为需要满足断面耦合约束的

断面集合。

以“EG+EY”省间交流断面为例说明第一类省间断面耦合的控制要求的形式与特点。“EG+EY”省间交流断面存在 7 档耦合关系,见表 1,表 1 中数值均为标么值。

表 1 EG、EY 断面耦合控制要求

Tab.1 EX and EY section coupling control requirements

			p. u.		
档位	EG	EY	档位	EG	EY
1	≥ -1.8	≥ 2.3	5	≥ -0.7	≥ -3.4
2	≥ -1.5	≥ 0.4	6	≥ 0	≥ -5.0
3	≥ -1.2	≥ -1.3	7	≥ 0.5	≥ -5.6
4	≥ -1.0	≥ -2.2			

表 1 的含义是当 EY 断面功率位于某一档位时,如第 1 档,则 EG 断面功率不应超过档位 1 对 EG 断面的要求,即 EG 断面功率不能低于 -1.8。

数学表达式为:

$$G(P_{EG} + \Delta P_{EG}, P_{EY} + \Delta P_{EY}) = \begin{cases} -P_{EG} - \Delta P_{EG} - 1.8, P_{EY} + \Delta P_{EY} \geq 2.3 \\ -P_{EG} - \Delta P_{EG} - 1.5, P_{EY} + \Delta P_{EY} \geq 0.4 \\ -P_{EG} - \Delta P_{EG} - 1.2, P_{EY} + \Delta P_{EY} \geq -1.3 \\ -P_{EG} - \Delta P_{EG} - 1.0, P_{EY} + \Delta P_{EY} \geq -2.2 \\ -P_{EG} - \Delta P_{EG} - 0.7, P_{EY} + \Delta P_{EY} \geq -3.4 \\ -P_{EG} - \Delta P_{EG}, P_{EY} + \Delta P_{EY} \geq -5.0 \\ -P_{EG} - \Delta P_{EG} + 0.5, P_{EY} + \Delta P_{EY} \geq -5.6 \end{cases} \quad (9)$$

第二种断面耦合控制要求以 EX、XG 断面为例进行说明,表达式为:

$$G(P_{EX} + \Delta P_{EX}, P_{XG} + \Delta P_{XG}) = |P_{EX} + \Delta P_{EX} + P_{XG} + \Delta P_{XG}| - 320 \quad (10)$$

式(10)的含义是当 EX 断面送 E、XG 断面送 G 时,两断面的功率之和不得超过 320 MW。

2.2.3 求解方法

采用单纯形法^[7]、内点法^[8]、模拟退火算法^[9]、蜂群算法^[10]、白鲸优化算法^[11]分别求解模型,并比较性能。各算法参数按表 2 设置。

表 2 算法参数

Tab.2 Algorithm parameters

算法名称	算法参数
SM	科学计算开源库 Scipy
IP	科学计算开源库 Scipy
SA	温度衰减系数:0.99,初始高温:1 000,内循环迭代次数:5 000
BWO	种群数量:50,最大迭代次数:2 000
ABC	种群数量:100,迭代次数:2 000

2.2.4 计算流程

最大供电能力优化调度模型可概括为:

$$\max F(x) \quad (11)$$

$$s. t. \begin{cases} g(x) = 0 \\ h(x) \leq 0 \end{cases}$$

式中, F 为目标函数; g 为等式约束; h 为不等式约束。

光伏发电消纳能力优化调度模型的计算步骤如下。

步骤 1 生成常规机组信息矩阵。确定目标省网,筛选目标省网所含片区,提取目标省网各片区的常规机组信息,生成 $3 \times 3m$ 的常规机组信息矩阵为:

$$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & \cdots & a_i & b_i & c_i & \cdots & a_m & b_m & c_m \\ a_1^{up} & b_1^{up} & c_1^{up} & \cdots & a_i^{up} & b_i^{up} & c_i^{up} & \cdots & a_m^{up} & b_m^{up} & c_m^{up} \\ a_1^{low} & b_1^{low} & c_1^{low} & \cdots & a_i^{low} & b_i^{low} & c_i^{low} & \cdots & a_m^{low} & b_m^{low} & c_m^{low} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, a_i 、 b_i 、 c_i 分别为水电、火电和抽蓄的当前时刻发电功率; a_i^{up} 、 b_i^{up} 、 c_i^{up} 分别为三类电源的旋转正备用; a_i^{low} 、 b_i^{low} 、 c_i^{low} 分别为三类电源的旋转负备用。

步骤 2 生成潮流断面信息矩阵,生成方式与步骤 1 类似。

步骤 3 生成断面灵敏度矩阵。包括断面一片区灵敏度矩阵、断面一直流联络线灵敏度矩阵、断面一负荷灵敏度矩阵。

步骤 4 根据式(11)构建等式约束矩阵和不等式约束矩阵。

步骤 5 根据表 2 设置算法参数并求解模型。

步骤 6 计算最大供电能力,计算公式为:

$$F = \sum_{i=1}^m (\Delta P_i + L_i) \quad (13)$$

最大供电能力场景计算流程见图 1。

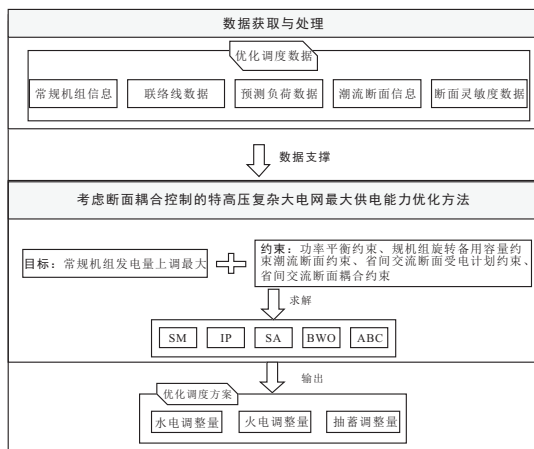


图 1 最大供电能力场景计算流程

Fig.1 Flowchart for calculating the maximum power supply

3 算例分析

3.1 优化调度模型数据获取与处理

某区域电网调度运行范围涉及 4 省,包含 42 个分区,48 个重要潮流断面,12 条跨区域直流联络线,14 条省间交流联络线。从 D5000 系统导出各片区各机组实时运行数据和备用数据;各断面实时功率和断面功率上、下限额;交直流联络线实时功率、联络线计划和限额。当前时刻,48 个重要潮流断面中存在一个越限断面,选择 A 省作为目标省网,综合评估 A 省 10 个分区在日内未来 15 min 所能达到最大供电能力。所要生成的信息矩阵与灵敏度矩阵维度见表 3。

表 3 信息矩阵和灵敏度矩阵维度

Tab. 3 Information matrix and sensitivity matrix dimensions

矩阵	维度	矩阵	维度
目标省网常规机组信息	3×30	断面一直流联络线正反灵敏度矩阵	96×12
断面信息矩阵	3×48	断面一光伏发电正反灵敏度	96×10
断面一分区正反灵敏度矩阵	96×30	断面一负荷灵敏度矩阵	96×10

3.2 最大供电能力场景优化调度

图 2 为最大供电能力场景下,五种算法求解后的潮流断面功率,可以看到五种算法均将在调度前已经重载越限的潮流断面(编号为 34)的功率控制在断面安全限额范围内,除模拟退火算法外,其余算法调整后无断面重载越限。

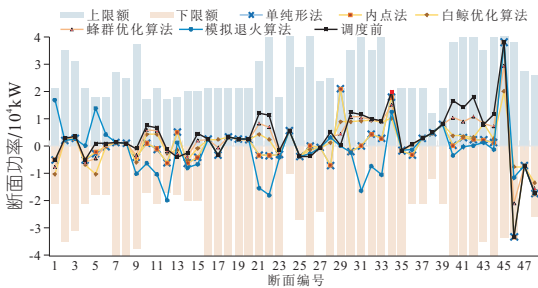


图 2 单纯型、内点法、模拟退火算法、白鲸优化算法与蜂群算法调度后断面功率对比

Fig. 2 Comparison of section power after scheduling by SM, IP, SA, BWO and ABC

图 3 为各算法计算出的 A 省各分区的发电调整量,对其中各分区的发电调整量求和,可得单纯形法与内点法得到的调度方案最大消纳量为 11 831.26 MW,模拟退火算法为 11 293.71 MW, BWO 方案为 7 094 MW,蜂群算法为

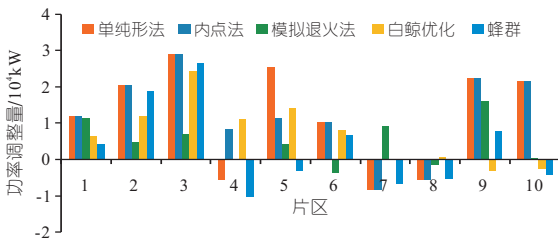


图 3 最大供电能力场景各分区发电调整量

Fig. 3 Maximum power supply capacity scenarios for each area of power generation adjustment

3 419.027 MW。单纯形法与内点法计算结果最大,均为 33 551.25 MW。

五种算法求解时间见表 4,内点法计算时间最短,白鲸优化算法计算速度最慢。同时结合图 3 与表 4,五种算法中内点法性能最好,单纯形法与内点法的差异主要在求解时间方面,但相差不大,实际工程中认为二者性能基本相同。

表 4 五种算法求解时间对比

Tab. 4 Comparison of solution time of five algorithms

算法	计算时间/s	算法	计算时间/s
单纯形法	0.602	白鲸优化算法	9 523.00
内点法	0.518	蜂群算法	9.480
模拟退火算法	13.260		

图 4 为内点法得到的各类型常规机组调度方案和各片区调度方案汇总图。由图 4(a)可知,内点法得到的调度方案中,大部分常规机组的发电功率上调,以保证目标省网供电。由图 4(b)可知,除片区 4、5、7、8 外其余片区水电正备用均全部调用,片区 4、5 分别调用了 30.0%、41.0%,片区 7、8 则调用了全部的负备用。由图 4(c)可知,火电备用调用情况与水电类似,片区 4、5 分别调用 49.6%、50.7%的正备用,片区 7、8 调用全部负备用,片区 9 火电备用未调用,其他片区均调用全部正备用。由图 4(d)可知,片区 1、9、10 可调出全部正备用,片区 4、5 分别调用 15.8%、47.4%的正备用,片区 8 抽蓄发电量不做调整。

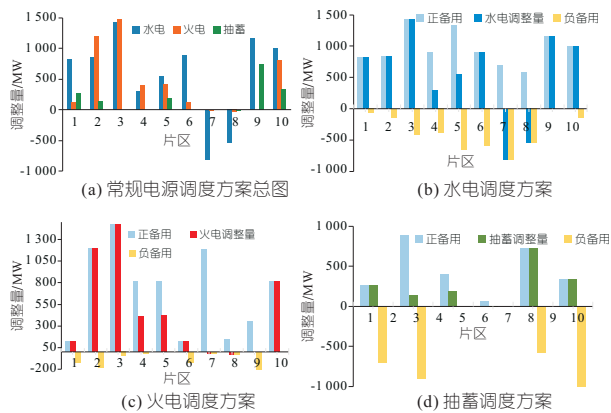


图 4 内点法最大供电能力调度方案

Fig. 4 IP maximum power supply capacity scheduling scheme

综上所述,只有片区 7、8 所有类型电源功率调减,其原因是片区 7、8 对潮流断面 29 的断面灵敏度高于其他片区对断面 29 的断面灵敏度。表 5 为各片区对断面 29 的灵敏度。可以看出,片区 7、8 对断面 29 的灵敏度分别为 0.16、0.12,为某省 10 个片区中对断面 29 灵敏度最高的两个片区。由前面调整后断面功率可知,经 IP 方案调整后,断面 29 的功率达到了断面上限额。当对断面 29 灵敏度为正的片区发电量上调导致断面 29 功

表 5 各片区对断面 29 灵敏度
Tab. 5 Sensitivity of each area to section 29

片区	灵敏度	片区	灵敏度	片区	灵敏度
1	-0.08	5	0.03	8	0.12
2	0.06	6	0.11	9	0.01
3	-0.06	7	0.16	10	0.13
4	-0.03				

率上升趋近断面上限额时,通过对断面 29 灵敏度高的片区 7、8 的水电和火电发电功率向下调整可让出更多断面上调空间,让出的可调空间使得其余片区的正备用得到充分调用,提高省网供电能力。

在内点法得到的调度方案中,当各片区挤占潮流断面可调空间时,内点法方案能够根据各片区对断面的灵敏度关系,合理分配断面空间以保证目标省网最大供电。

4 结论

a. 本文深度挖掘多资源多时空的调节灵活互补特性,基于特高压复杂大电网分区运行特点,建立了考虑断面耦合的最大供电能力优化方法模型。

b. 分别采用单纯性法、内点法、模拟退火算法、白鲸优化算法与蜂群算法进行模型求解,得到优化调度方案并比较了不同算法在求解本文模型时的性能差异。

c. 利用某特高压复杂大电网实际运行数据进行仿真计算,发现本文提出的最大供电能力优化模型及其求解方法能够在保证电网稳定性的前提下充分调度大电网的备用资源,准确计算电网最大供电能力。

Optimization Method for Maximum Power Supply Capacity of UHV Complex Large Power Grid Considering Section Coupling Control

CHEN Wen-zhe¹, HUANG Mu-tao^{2a}, LI Qun-shan¹, ZENG Ling-kang¹,
ZHU Ke-fan¹, GAO Su-hua^{2b}, CHEN Xing-bang^{2a}

(1. Central China Branch of State Grid Corporation of China, Wuhan 430077, China; 2a. School of Electrical and Electronic Engineering; 2b. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The calculation of maximum power supply capacity is an important issue in optimal operation of UHV complex large power grid. With the large-scale access of high-proportion renewable energy to the power grid, the problem of power and energy balance is becoming more and more prominent. Considering the stability spinning constraint, coupling section constraint and unit regulation capacity constraint, the calculation problem of maximum power supply capacity presents high-dimensional characteristics, which is difficult to model and solve. According to the limitation of transmission section and the characteristics of partition operation of UHV complex large power grid, an optimal dispatching model of maximum power supply capacity of UHV complex large power grid considering section coupling control was established. Then, the Simplex method (SM), Interior Point method (IP), Simulated Annealing (SA), Beluga Whale Optimization (BWO) and Artificial bee colony algorithm (ABC) were applied to solve the model respectively, and the maximum power supply capacity of the large power grid in the next 15 minutes was calculated. The coordinated optimization scheme of various types of power supply and reserve was proposed. Finally, a regional power grid was taken as an example to verify the model and the solution method. The simulation results show that because of the large scale of the power system and the complex coupling relationship between the sections, the heuristic intelligent optimization algorithm has a long running time, slow convergence speed and low search accuracy. The interior point method converges rapidly, has strong robustness, is insensitive to the selection of initial values, has better stability and computational efficiency, which can provide effective and practical support for power supply and power balance of complex UHV power.

Key words: UHV complex large power grid; divisional grid; maximum power supply capacity; coordinated optimization of multiple power sources and reserve capacity; cross section coupling control; interior-point method; heuristic intelligent optimization algorithm

参考文献:

- [1] XIAO J, LI F, GU W Z, et al. Total supply capability and its extended indices for distribution systems: Definition, model calculation and applications [J]. IET generation, transmission & distribution, 2011, 5(8): 869-876.
- [2] 刘盛松, 秦旭东, 汪志成. 基于最优潮流分区电网最大供电能力研究及其应用[J]. 电力与能源, 2015, 36(4): 470-475.
- [3] 荆朝霞, 王宏益, 江昌旭. 考虑负荷均衡的 220 kV 电网供电能力多目标优化[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1619-1628.
- [4] 荆朝霞, 江昌旭, 王宏益. 考虑 N-1 安全约束的 220 kV 片区电网最大供电能力计算[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(19): 145-152.
- [5] 朱嘉麒, 董树锋, 徐成司, 等. 考虑多次转供的配电网最大供电能力评估方法[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2275-2282.
- [6] 窦飞, 汪惟源, 杨林, 等. 基于多端柔性直流的电网供电能力提升研究[J]. 电力与能源, 2017, 38(1): 12-15.
- [7] 管恩齐, 何晋, 骆通. 适用于双极直流电网最优潮流控制的双鱼群算法[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(10): 35-43, 50.
- [8] 钟世霞, 袁荣湘. 内点法在电力系统中的应用述评[J]. 高电压技术, 2005, 31(12): 76-79.
- [9] 庞峰. 模拟退火算法的原理及算法在优化问题上的应用[D]. 吉林: 吉林大学, 2006.
- [10] 秦全德, 程适, 李丽, 等. 人工蜂群算法研究综述[J]. 智能系统学报, 2014, 9(2): 127-135.
- [11] ZHONG C, LI G, MENG Z. Beluga whale optimization: A novel nature-inspired metaheuristic algorithm[J]. Knowledge-based systems, 2022, 251: 109215.