

DOI: 10.7667/PSPC160539

基于最大受电公平性指标的跨区直流消纳模型

侯依昕¹, 丁坚勇¹, 杨东俊²

(1. 武汉大学, 湖北 武汉 430072; 2. 国网湖北省电力公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430063)

摘要: 大电网平台的建立为实现能源资源跨区域跨省(市)的优化配置提供了条件。在受端实际分电方案制定过程中, 往往将各条跨区输电线路分别考虑。在此背景下, 首先, 建立了跨区直流消纳模型。然后, 提出了最大受电公平性指标用以评判消纳方案的优劣, 该指标由消纳区外直流电力最大的跨区直流电力分配函数和受端区域各省之间火电替代容量偏差比变化量标准差最小的火电利益公平性函数共同组成。最后, 提出基于图论最短路问题的改进分电路径确定方法, 并结合半正定规划进行求解。通过实际算例说明所提出模型方法的有效性和可行性。

关键词: 区域电网; 分电; 最大受电公平性指标; 最短路问题; 半正定规划

Model for cross-region DC power consumption based on the index of fairness for maximum receiving electric power

HOU Yixin¹, DING Jianyong¹, YANG Dongjun²

(1. Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. HBEPC Economic & Technology Research Institute, Wuhan 430063, China)

Abstract: The establishment of the bulk power grid platform is the foundation for achieving the optimization of generation resources. In the actual process of generation allocation plan, it tends to think of each cross-region transmission line separately. Given this background, first, a model for cross-region DC power consumption is built. Then, an index of fairness for maximum receiving electric power is put forward to evaluate the power consumption plan. The index consists of a cross-region DC generation allocation function with the goal of maximum receiving cross-region generation resources and a fairness for thermal power benefits function with the goal of minimizing the standard deviation of thermal power substitution capacity bias ratio variation for each province of receiving end. Finally, a method of determining generation allocation path based on the shortest path problem in graph theory is put forward, which is combined with the semi-definite programming (SDP) to determine the generation allocation plan. A practical example is employed to demonstrate the feasibility and efficiency of the developed model and method.

Key words: regional power network; generation allocation; index of fairness for maximum receiving electric power; shortest path problem; semi-definite programming

0 引言

近年来, 中国大力发展建设西北地区风电和光伏发电等清洁能源, 在其快速发展的同时, 新能源与负荷中心呈逆向分布的问题也愈发突出。依托于中国不断取得突破的特高压输电技术, 其远距离、大容量和低损耗的输电特点, 大大提升了电网功能; 而相应的省(市)、区域、国家 3 级电力交易市场化进程不断加快, 以电力资源优化与公平配置相协调的跨区跨省交易基本架构逐步建立; 从技术和制度两个方面为构建多区域、多资源的优化配置平台提

供了支持和保障^[1-3]。

目前, 发展大区电网互联特别是特高压直流远距离输电以实现新能源的充分利用及消纳已成为国内外的研究热点之一, 优化目标也在囊括了传统的经济调度成本最低/效益最高^[4-6]的情况下涉及更多领域不同角度的考量。文献[7]以间歇式清洁能源出力和负荷的模糊隶属度函数为基础, 建立考虑运行费用、SO₂和CO₂排放量的多目标模糊机会约束动态经济模型。文献[8]以电网余荷和负荷排序为基准, 考虑受端不同省级电网负荷、受电量等因素的差异, 解决电力系统网间出力分配问题。同样以电

力交易和资源配置的协同优化为目标, 文献[9-10]则从联络线计划的编制角度, 进行全网统筹和供需协调。文献[11]对风电接入将导致系统维持稳定运行的成本增加风险加以考虑, 构建计及风力发电风险的电力系统多目标优化调度模型, 在实现经济性和环保性协调优化的同时减少风电并网风险。但在当前清洁能源接入规模不断扩大和由于经济增长放缓带来的电力新常态的背景下, 清洁能源送端跨区输电线路利用率偏低, 而受端则由于区外电力对于本区火电利益的损害影响了其交易意愿, 为促进远距离跨区电能的消纳并提高受端电网的交易积极性, 在提高跨区输电容量的同时还应充分考虑受端电网各省的具体差异和利益公平。

本文以对受端电网进行需求预测和电网运行约束分析, 即以省间互联电网在联络线传输容量不越限的情况下满足个体负荷需求为基础, 建立跨区直流电力分配模型, 并提出由最大受电函数和火电利益公平性函数组成的最大受电公平性指标, 用以评价分电方案的优劣。结合采用基于图论最短路径问题的改进分电路径确定方法和半正定规划方法进行模型的求解。实例结果表明, 本文提出的模型及指标能够有效地实现跨区电能消纳和省(市)间公平性双方面兼顾的目标。

1 跨区直流消纳模型

随着国家电力战略“西电东送”和“北电南送”的实施, 大量跨区特(超)高压直流输电线路已经投运或进入了建设日程, 国家电网将在原有的相对独立的几大区电网基础上实现大区电网经特(超)高压线路的互联。

对于几个大区电网中间出现区外来电参与区内电力平衡的情形, 跨区直流线路的“背靠背”特性和直流线路的输送功率按调度编制的日功率计划曲线运行^[12]的运行模式, 在输电交易计划确定后能够维持输电稳定, 可视作稳定电源。因此在跨区电网层次将跨区线路做等效电源处理, 视作第一个层次; 而对于受端区域电网内部的省部级电网做均一化处理, 视作第二个层次。以此建立跨区直流消纳模型, 如图 1 所示。

其中跨区直流线路 m 落点受端大区电网中省份 $n = lp_m$, lp_m 表示与跨区线路 m 对应的落点省份编号, 受端区域内共 N 个省份组成互联区域电网。 $P_{Go, n=1, 2, \dots, (lp_m-1)}$ 和 $P_{Go, n=(lp_m+1), \dots, N}$ 分别表示除落点外其他省份的所有电源, $P_{load, n=1, 2, \dots, (lp_m-1)}$ 和 $P_{load, n=(lp_m+1), \dots, N}$ 表示对应的负荷。

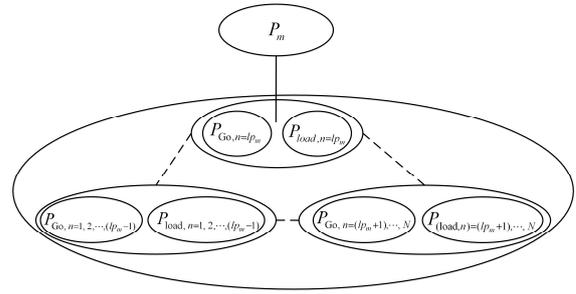


图 1 跨区直流消纳模型

Fig. 1 Model for cross-region DC power consumption

区域电网内各个省(市)发电侧在机组出力上下限约束范围内应满足对应省的负荷以及备用需求, 同时考虑到接受区外电力和区域内部各省的互联特性, 目标省份与跨区线路和其他省份之间的电力交换使得该省机组出力应相应变化。

同时, 跨区直流交易包括既定交易和未定交易, 在优化建模过程中既定交易作为已知的边界条件, 等值于各省的负荷需求并在联络线约束中扣除既定交易中的省间电力流, 以未定交易作为优化目标。

1.1 模型的组成

因为跨区电能除了填补受端区域的电力缺口外, 主要用来替代本区火电机组, 所以以火电替代而非所有电源来进行受电平衡分析。

$$P_{load, n} + P_{load-eq, n} = P_{To, n} + \sum_{m=1}^M P_{m, n} \quad (1)$$

$$P_{load-eq, n} = P_{Ro, n} + P_{given, n} \quad (2)$$

式中: $P_{load, n}$ 为负荷需求; $P_{load-eq, n}$ 为等值负荷需求, 由除火电外其他机组的出力 $P_{Ro, n}$ 和既定交易分电省份 n 的总电力 $P_{given, n}$ 共同组成; $P_{To, n}$ 为火电出力;

$\sum_{m=1}^M P_{m, n}$ 为省份 n 接受未定交易中跨区线路电力的总和。

1.2 约束条件

1) 跨区直流线路出力平衡约束

$$\sum_{n=1}^N P_{m, n} = P_m \quad (3)$$

式中: $P_{m, n}$ 为未定交易中跨区线路 m 分配至省电网 n 的电力; N 为受端区域所属省总数; P_m 为线路 m 的输电总和, $1 \leq m \leq M$, M 为需要进行优化的跨区直流线路总数。

2) 跨区直流运行约束

$$\underline{P}_m \leq P_m \leq \overline{P}_m \quad (4)$$

式中, \overline{P}_m 和 \underline{P}_m 为给定跨区直流线路传输功率的上

下限。

3) 联络线约束

联络线的调整对象为交易成分, 因此同样需要对既定交易成分和未定交易成分进行区分, 取任意两个区域内的互联省份 $n=i$ 和 $n=j$, 以 $P_{tie_{i,j}}$ 表示联络线上从省份 i 到省份 j 方向上的电力流。

$$\underline{P_{tie_{i,j}}} \leq P_{tie_{i,j}} \leq \overline{P_{tie_{i,j}}} \quad (5)$$

式中, $\underline{P_{tie_{i,j}}}$ 和 $\overline{P_{tie_{i,j}}}$ 为给定联络线断面扣除既定交易省间电力流后的上下限。

4) 直流耦合约束

对于跨区直流线路 m 及其落点省份 lp_m 在某些典型方式下, 跨区直流线路与下网点省份与相邻省份之间的省间联络线可能存在耦合关系。

$$P_m + \sum_{k=1}^{Tied} P_{tie_{lp_m,k}} \leq P_{m,cou} \quad (6)$$

式中: $P_{tie_{lp_m,k}}$ 表示与落点省 lp_m 相连的联络线 k 上的电力流, 其总数为 $Tied$; $P_{m,cou}$ 则为跨区直流线路 m 的耦合约束。

2 基于最大受电公平性指标的分电方案评估

基于上述跨区直流消纳模型, 提出用于评估分电方案优劣的最大受电公平性指标, 该指标由两个目标函数即跨区直流电力分配目标函数 f_1 和火电利益公平性目标函数 f_2 共同组成。

$$\max F = \frac{f_1}{f_2} \quad (7)$$

式中: f_1 代表在满足系统安全约束的情况下区域电网接受区外直流电力的最大值; f_2 代表由于区外电力替代受端区域火电造成的区域内各省基于火电最小平均出力的偏差值的变化量的标准差; F 取值最大时对应的方案即为最优消纳方案。

针对当前大电网平台下大规模特高压直流同时向多个省网送电的实际情况, 受端区域内资源配置主要以由电力交易叠加形成的联络线计划的形式体现, 并将其作为已知值与系统负荷预测叠加形成区域内机组出力总需求^[9-10]; 同时, 依据区外电力替代受端电网火电的原则将各省火电等效为单一机组, 除火电外的受端省份内其他各类电源则与系统负荷预测叠加。

2.1 跨区直流电力分配函数

因联络线的调整对象为电力交易成分, 而优化目标和相关约束大多是针对联络线总计划, 将受端电网抽象为图论^[13]模型可描述为: 给定有向赋权图

$G=(V,E,W)$, $V=\{v_1,v_2,\dots,v_N\}$ 为 G 的顶点集, 对应受端区域各省; $E=\{(v_i,v_j)|v_i,v_j \in V\}$ 为 G 的边集, 对应区域内省间联络线; $W=\{(P_{tie_{i,j}})|v_i,v_j \in V\}$ 表示联络线 (v_i,v_j) 上的功率值, 流向为从 i 到 j 时 $P_{tie_{i,j}}$ 取值为正, 相反方向取值为负, 建立联络线功率值约束矩阵: $W=[P_{tie_{i,j}}]_{n \times n}$ 。

以未定交易中各线路输电功率作为元素建立矩阵 $P_{dc}=[P_1,P_2,\dots,P_m,\dots,P_M]$; 因受端区域各省份消纳跨区直流电力是由线路落点省向其他相连省份疏散, 不同线路因其落点的不同造成分电方案制定的差异, 因此建立线路落点矩阵 $P_{Loc}=[lp_1,lp_2,\dots,lp_m,\dots,lp_M]$; 相应的各省分电矩阵 $P_{dis}=[P_{m,n}]_{M \times N}$, 同时, 考虑到落点省份对于跨区电力的消纳能力上限往往超过传输容量限值, 因此默认各跨区线路在落点省分电为 0。依据上述条件将分电问题抽象为从固定点到其他所有点的最短路问题。即以 lp_m 为始点, $\{P_{m,n}\}$ 集合中各不同的下标 n 代表终点, 在满足各项约束的情况下, 以区外清洁能源消纳最大为目标求得代表跨区直流电力分配的有向赋权图。

$$\max \sum_{m=1}^M P_m \quad (8)$$

该值表示各线路在落点省份分电为 0 的前提下, 满足联络线传输约束和转送限制的最大消纳容量。

2.2 火电利益公平性目标函数

传统的“三公”调度要求以公平为原则使系统负荷在电厂间均衡分配, 各发电机组按照机组容量平均分配发电利用小时数以保证发电商的经济利益, 即以各个火电主体装机利用小时数相等为目标进行优化^[14]。在当前火电利用小时数不断创新低, 凸显装机过剩的背景下, 以省为主体进行火电机组等效时, 在以公平为原则的同时还应兼顾各省由于不同的电源结构造成的火电利用情况的差异。

参照式(2)受电省份系统平衡约束, 在未接受区外电力时系统平衡约束如式(9)。

$$P_{load,n} + P_{load-eq,n} = P'_{To,n} \quad (9)$$

即跨区直流电力替代受端省份火电机组出力如式(10)。

$$\sum_{m=1}^M P_{m,n} = P'_{To,n} - P_{To,n} \quad (10)$$

根据火电装机容量与出力的关系, 得式(11)。

$$P_{Tc,n} \times T_{min,n} = P_{Toave,n} \times T_{annum} \quad (11)$$

式中: $P_{Tc,n}$ 表示各省火电装机容量; $T_{\min,n}$ 表示受限于各省电源机构和发电商经济效益的火电利用小时数的最小值; $P'_{To,n}$ 表示未接受区外电力时火电出力; $P_{To,n}$ 为已知接受区外电力后火电出力; $P_{Toave,n}$ 表示各省火电最小平均出力; T_{annum} 表示全年小时数。

以 $P_{Toave,n}$ 为基准计算在未接受区外电力时各省火电出力偏差比:

$$\xi'_n = \frac{P'_{To,n} - P_{Toave,n}}{P_{Toave,n}} \quad (12)$$

接受区外电力后各省火电出力偏差比:

$$\xi_n = \frac{P_{To,n} - P_{Toave,n}}{P_{Toave,n}} \quad (13)$$

以各省火电出力偏差比的变化量表征接受区外电力数量对各省的火电替代情况:

$$\Delta\xi_n = \xi'_n - \xi_n \quad (14)$$

以各省火电出力偏差比的变化量的标准差最小为目标求得公平性最优时各省的火电替代容量:

$$\min s = \min \left\{ \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (\Delta\xi_n - \Delta\xi_{\text{ave}})^2 \right\}^{1/2} \quad (15)$$

式中, $\Delta\xi_{\text{ave}}$ 表示各省火电出力偏差比的变化量的平均值。

3 模型求解

3.1 总体求解思路

跨区直流消纳问题的最终目的是求得各条跨区线路在受端区域不同省份的分电方案。以最大受电公平性指标进行消纳方案优劣的评判, 涉及复杂的目标函数与约束条件, 在优化过程中将其分解为两个相互关联的子问题。求解思路是: 根据相关约束条件, 将最终求解目标即分电方案作为未知量, 参与构造两个子问题——跨区直流电力分配问题和火电利益公平问题的表示形式, 首先结合采用基于图论的最短路问题和半正定规划的方法, 求得消纳区外直流电力的最大值。然后将其作为最大受电公平性指标的取样参考, 在其邻域范围内计算最大受电公平性指标, 取值最大时对应的消纳方案即为所求解。

3.2 基于最短路问题的改进分电路径确定

传统的跨区电网问题的解决常常采用图论及网络流算法, 可以方便地处理分区间的联络线容量约束。文献[15]提出将电力系统网络图转换为网络流图的方法, 将分区备用问题转化为最小费用流问题。文献[16]结合图论原理, 使用基于地理分区的分区简化图的邻接矩阵和路径矩阵进行输电断面的辨

识, 根据传输容量裕度筛选出系统的关键断面。图论及网络流理论在电力系统应用中, 不仅把握了电源负荷分布, 而且把握了网络拓扑和支路输电容量。

但是在针对跨区分电问题时, 其缺陷在于不能直观地得出特高压线路与受端电网各省级电网之间的分电关系。针对本文所提出的电力分配问题, 在网络流理论的基础上进行直流落点即电源点到受电区域的最短路问题分析, 实现分电路径的寻优。

给定有向赋权图 $G(V, E, w)$, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 为 G 的顶点集, 表示受端区域内各省份; $E = \{(v_i, v_j) | v_i, v_j \in V\}$ 为 G 的边集, 表示区域内省间联络线。以邻接矩阵 A 代表受端电网的网络结构:

$$A_{n \times n} = \{a_{ij}\} \quad (16)$$

(当 v_i 与 v_j 相邻时, 取值1, 否则取值0)

将区外电力作为最短路问题的始点, 编号为1, 落点省份编号为2, 受端电网的其他省份进行循环平移编号得到新的邻接矩阵 B :

$$B_{(n+1) \times (n+1)} = \{a_{ij}\} \quad (17)$$

(当 v_i 与 v_j 相邻时, 取值1, 否则取值0)

采用 Floyd 算法进行网络顶点的分层。令 $U_{i^*} = \{i=2, \dots, n+1 | \text{表示始点 } v_1 \text{ 到其他点 } v_i \text{ 的最短距离}\}$ 。考虑区外电力在受端电网分电的实际情况, 设定允许最多进行一次转送, 则

$$\begin{cases} 1 & i \text{ 为落点} \\ 2 & i \text{ 为与落点直接相连的点} \\ 3 & i \text{ 为转送一次的点, 并求得中间点 } mid \\ \text{其他} & \text{通过将 } i \text{ 点的行及列邻接矩阵置零将该点孤立} \end{cases} \quad (18)$$

3.3 半正定规划算法

半正定规划^[17](SDP)是一种将线性规划(LP)中的向量变量替换为矩阵变量并且将约束条件也替换为半正定矩阵的凸优化方法。半正定规划的标准形式如式(19)。

$$\begin{cases} \min \langle A_0, X \rangle \\ \text{s.t. } \langle A_i, X \rangle = b_i, \quad i = 1, \dots, m \\ X \succeq 0 \end{cases} \quad (19)$$

其对偶形式为

$$\begin{cases} \max \langle b, y \rangle \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^m y_i A_i \leq A_0, y \in R^m \end{cases} \quad (20)$$

式中: b_i 为实数, $\langle A, B \rangle$ 表示 Frobenius 内积, 即当

$A, B \in R^{n \times n}$, $R^{n \times n}$ 为 n 阶实方阵的全体, $\langle A, B \rangle = \text{trace}(AB)$ 。 X 是决策向量, $X \in S^n$, S^n 为 $n \times n$ 实对称矩阵的全体, $X \succeq 0$ 表示 X 为半正定矩阵。

假设一个最小化问题:

$$f^* = \min_{x \in X} f(x) \quad (21)$$

出于对最优解的可行域的评估和推测, 将 X 扩大为 X' ($X \subset X'$)。 则上述问题转化为

$$f_* = \min_{x \in X'} f(x) \quad (22)$$

而且 $f_* < f^*$ 。 将式(21)转化为式(22)的形式即为半正定松弛的基本意义。 本质来说, 半正定松弛是将优化问题的线性等式约束转化为不等式约束。

本文根据上述分电路径确定方法, 以各省分电矩阵 $P_{\text{dis}} = [P_{m,n}]_{M \times N}$ 作为实型变量 sdpvar , 其中 $P_{m,n}$ 的下标 m 代表最短路问题中的始点, n 代表终点, 求得 U_{mn} 的数值即可根据式(18)判定是否可送达, 并得出相应路径和联络线的占用情况。 然后以 $\max f_1$ 作为优化目标, $W = [P_{\text{tie}}]_{n \times n}$ 作为约束条件进行半正定规划求得分电方案的取样参考。

4 算例及其分析

以 HZ 区域电网内 6 个省级电网为受端, 3 条

跨区直流线路的未定交易为优化目标, 在某一典型方式情境下进行分电方案的制定。 考虑跨区联络线路的区域电网受电网络结构图如图 2 所示, 其中虚线框表示省间联络线, 实线框表示跨区直流线路。

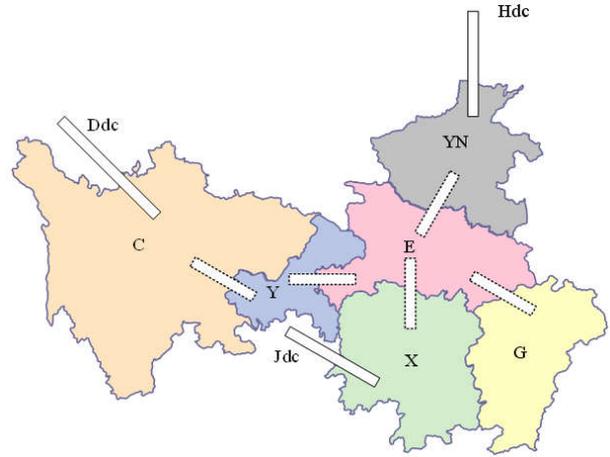


图 2 区域电网受电网络结构图

Fig. 2 Network structure of regional network for receiving end

图 2 中受端区域各省级电网及省间联络线情况见表 1。 受端区域在未接受区外电力的情况下各省的火电出力情况及基准值见表 2。

跨区直流线路的落点及运行约束见表 3。

表 1 受端区域省级电网及省间联络线

Table 1 Provincial power grids and tie lines constraints of receiving region

受端区域省级电网 (N)			联络线情况		
落点省份的 初始索引 (n)	名称	联络线 序号	连接省份 (名称 1-名称 2)	扣除既定交易后的传输约束 $[P_{\text{tie}} \quad \overline{P_{\text{tie}}}]$ (MW)	
1	Y	1	YN-E	[0 3000]	
2	E	2	X-E	[0 2600]	
3	X	3	E-G	[0 2500]	
4	G	4	Y-E	[0 3000]	
5	Q	5	C-Y	[0 4300]	
6	C				

表 2 初始火电出力及基准值

Table 2 Original output of thermal power of provinces

名称	初始火电出力 $P'_{\text{To},n}$ / MW	火电最小平均出力 $P_{\text{Toave},n}$ / MW
Y	52 559	35 063
E	12 320	11 030
X	17 360	11 232
G	17 160	13 680
Q	11 065	8584
C	6460	4560

参照图 2 得出代表受端电网网络结构的邻接矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

表 3 跨区直流线路的落点及运行约束

Table 3 Landing points and operating constraints of cross-region DC transmission lines

跨区直流序号	名称	落点省份索引 l_{p_m}	运行约束
			$[P_m \bar{P}_m]/MW$
1	Hdc	1	[2000 8000]
2	Ddc	6	[300 3000]
3	Jdc	3	[1000 4000]

采用基于图论最短路问题的改进的分电方法求得 4 条线路在受端电网的分电路径见表 4。

表 4 跨区直流线路的分电路径

Table 4 Generation allocation path of cross-region DC transmission lines

名称	落点 ($U_{li}=1$)	直接相连的点 ($U_{li}=2$)	转送一次的点 ($U_{li}=3$)
	索引	索引	索引
Hdc	1	2	3,4,5
Ddc	6	5	2
Jdc	3	2	1,4,5

采用跨区分电模型求得区外清洁能源消纳功率最大情况下的分电矩阵:

$$P_{dis} = \begin{bmatrix} 0 & 1377.3 & 0 & 1339.45 & 283.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3000.00 & 0 \\ 0 & 1176.83 & 0 & 1160.55 & 262.62 & 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

在默认线路落点省份消纳该线路跨区电力为 0 的情况下相应各省的分电情况见表 5。在分电矩阵中初始条件默认线路落点省份消纳跨区电力为 0。在以 P_{dic} 的取值为基准值, 在保证省间联络线不越限的情况下, 主要通过调整各条线路在落点省份的分电容量来实现寻优。相应的跨区及省间联络线占用情况见表 6。

由表 5 及表 6 所示, 省份 Y、X 和 C 作为跨区线路落点省份, 初始设定分电容量为 0, 省份 E 和省份 G 的分电容量相近, 而与其相连的省间联络线中 Y-E、X-E 及 E-G 已达到约束峰值, 因此设定省份 E 和省份 G 为 N_r 作为已知值, 则未知量包括 Hdc 分电 Y 容量 $P_{1,1}$ 、Ddc 分电 Q 和 C 容量 $P_{2,5}$ 及 $P_{2,6}$ 、

Jdc 分电 X 容量 $P_{3,3}$ 。代入最大受电公平性指标 F 后, 针对各未知量在已知约束条件式(26)下求偏导数:

$$\frac{\partial F}{\partial P} = \left(\frac{\partial F}{\partial P_{1,1}}, \frac{\partial F}{\partial P_{3,3}}, \frac{\partial F}{\partial P_{2,5}} \right) \quad (25)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} P_{1,1} \leq 5000 \\ P_{3,3} \leq 1400 \\ P_{2,5} + P_{2,6} = 3000 \end{cases} \quad (26)$$

求得:

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial P_{1,1}} \geq 0 \\ \frac{\partial F}{\partial P_{3,3}} \geq 0 \end{cases} \quad (27)$$

当 $P_{1,1} = 5000, P_{3,3} = 1400, P_{2,5} = 1884$ 时

$$\frac{\partial F}{\partial P_{2,5}} = 0 \quad (28)$$

F 取得最大值, 最终求得分电方案见表 7。

表 5 各省分电情况

Table 5 Generation allocation situation of provinces

省份名称	分电量	偏差比的变化量
		$\Delta \xi_n = \xi'_n - \xi_n$
Y	0	0
E	2554	0.2316
X	0	0
G	2500	0.1827
Q	3546	0.4131
C	0	0

表 6 跨区及省间联络线占用情况

Table 6 Occupation of cross-region transmission lines and tie lines

名称	占用/约束	名称	占用/约束	输电方向
	$(P_m / \bar{P}_m)/MW$		$(P_{tie} / \bar{P}_{tie})/MW$	
Hdc	3000/8000	Y-E	3000/3000	Y→E
Ddc	3000/3000	X-E	2600/2600	X→E
Jdc	2600/4000	E-G	2500/2500	E→G
		Q-E	546/3000	E→Q
		C-Y	3000/4300	C→Q

表 7 跨区电力分电方案

Table 7 Generation allocation plan of cross-region power

跨区线路	分省受电容量/MW						输送容量总和
	Y	E	X	G	Q	C	
Hdc	5000	1377	0	1340	283	0	8000
Ddc	0	0	0	0	1884	1116	3000
Jdc	0	1177	1400	1160	263	0	4000
分省受电总和	5000	2554	1400	2500	2430	1116	

5 结论

在跨区电网逐步建立的背景下, 区域之间的多线路电力传输愈发频繁, 跨区域、跨省市之间电网联系也愈发紧密。本文提出了跨区直流消纳模型对消纳问题进行系统阐述和分析, 并提出了综合跨区消纳区外直流电力最大和受端火电利益公平性的最大受电公平性指标用以对消纳方案进行评价。采用基于图论最短路问题的改进分电路径确定方法, 根据跨区线路的落点判断分电路径, 根据半正定规划(SDP)原理求解跨区传输电力的最大值, 在此基础上兼顾受电公平性, 最大受电公平性指标取得最大值时对应的消纳方案即为所求。以某区域消纳多条跨区线路的未定交易为例验证了方法的有效性, 结果表明, 该方法能够实现跨区输电效益和受端利益公平的协同优化, 可为决策者提供跨区线路规划及分电方案制定的参考。

参考文献

- [1] 赵庆波, 张正陵, 白建华, 等. 基于特高压输电技术的电力规划理论创新及实践[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2523-2532.
ZHAO Qingbo, ZHANG Zhengling, BAI Jianhua, et al. Theory innovation and practice of electric power system planning based on ultra high voltage transmission technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2523-2532.
- [2] 尚金成. 跨区跨省电力交易机制与风险控制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 53-58.
SHANG Jincheng. Mechanism and risk control strategies for trans-regional and trans-provincial power exchange[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 53-58.
- [3] 罗剑波, 陈永华, 刘强. 大规模间歇性新能源并网控制技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 140-146.
LUO Jianbo, CHEN Yonghua, LIU Qiang. Overview of large-scale intermittent new energy grid-connected control technology[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 140-146.
- [4] KAHL M, FREYE C, LEIBFRIED T. A cooperative multi-area optimization with renewable generation and storage devices[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2386-2395.
- [5] 郭小璇, 龚仁喜, 鲍海波, 等. 含新能源电力系统机会约束经济调度的二阶锥规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 85-91.
GUO Xiaoxuan, GONG Renxi, BAO Haibo, et al. Second-order cone programming method of chance constrained economic dispatch considering renewable energy sources[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 85-91.
- [6] 周斌, 宋艳, 李金茗, 等. 基于多群组均衡协同搜索的多目标优化发电调度[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 181-189.
ZHOU Bin, SONG Yan, LI Jinming, et al. Multiobjective optimal generation dispatch using equilibria-based multi-group synergistic searching algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 181-189.
- [7] 刘文学, 梁军, 负志皓, 等. 考虑节能减排的多目标模糊机会约束动态经济调度[J]. 电工技术学报, 2015, 39(16): 138-143.
LIU Wenxue, LIANG Jun, YUN Zhihao, et al. Multi-objective fuzzy chance constrained dynamic economic dispatch considering energy saving and emission reduction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 39(16): 138-143.
- [8] 申建建, 程春田, 李卫东, 等. 多电网调峰的水火核电力系统王建出力分配方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1041-1050.
SHEN Jianjian, CHENG Chuntian, LI Weidong, et al. Solutions to power generation allocation among multiple power grids in peak operation of hydro, thermal and nuclear plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1041-1050.
- [9] 许丹, 李晓磊, 丁强, 等. 基于全网统筹的联络西分层优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2): 122-126.
XU Dan, LI Xiaolei, DING Qiang, et al. Optimization of tie-line hierarchical schedule based on network-wide coordination[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2): 122-126.
- [10] 许丹, 丁强, 黄国栋, 等. 考虑安全约束的联络线供需协调计划模型[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2591-2596.
XU Dan, DING Qiang, HUANG Guodong, et al. Modeling for tie-line scheduling plan based on security constraints and supply-demand coordination[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2591-2596.
- [11] 杨家然, 王兴成, 蒋程, 等. 计及风力发电风险的电力系统多目标动态优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 25-31.
YANG Jiaran, WANG Xingcheng, JIANG Cheng, et al. Multi-objective dynamic optimal scheduling of power

- system considering wind power risk[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 25-31.
- [12] 靳玮玮, 杨兴超, 余存, 等. 功率计划在特高压直流输电工程中的传输和实现[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 143-147.
JIN Weiwei, YANG Xingchao, YU Cun, et al. Transmission and realization of the power plan in UHVDC transmission project[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 143-147.
- [13] 吴开亚. 图论及其算法[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003.
- [14] 朱泽磊, 周京阳, 潘毅, 等. 考虑电力电量平衡的安全约束经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 168-176.
ZHU Zelei, ZHOU Jingyang, PAN Yi, et al. Security constrained economic dispatch considering balance of electric power and energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 168-176.
- [15] 王建学, 王锡凡, 王秀丽. 采用网络流理论的分区备用模型[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 51-55.
WANG Jianxue, WANG Xifan, WANG Xiuli. Regional reserve model based on network flow theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 51-55.
- [16] 王涛, 李渝, 顾雪平, 等. 考虑地理分区边界优化的电网关键输电断面辨识[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 220-229.
WANG Tao, LI Yu, GU Xueping, et al. Identification of the key transmission sections considering optimization of geographical partition boundary for power grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 220-229.
- [17] JUBRIL M, KOMOLAFE A. Solving multi-objective economic dispatch problem via semi-definite programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2056-2064.
-
- 收稿日期: 2016-04-16; 修回日期: 2016-07-14
- 作者简介:
- 侯依昕(1990-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行分析、电力系统规划; E-mail: yeson_houce@aliyun.com
- 丁坚勇(1957-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统规划与可靠性, 电力系统运行与控制; E-mail: jyding@whu.edu.cn
- 杨东俊(1975-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电网规划, 电力系统运行与控制。E-mail: agcdydj@126.com

(编辑 魏小丽)