

基于电力计量大数据的电源规划研究

蔡高雷¹, 刘桂龙²

(1. 上海两吉新能源投资有限公司, 上海 200245; 2. 中国海诚工程科技股份有限公司, 上海 200031)

摘要: 传统的电源规划方法已经难以满足大型风电并网系统对安全稳定性的要求。针对这一问题, 运用大数据技术对风电出力信息充分挖掘, 实现对并网风电波动风险的定量分析。在此基础上, 建立以风电穿透功率最大和并网风险最小为目标的大型风电基地电源规划数学模型, 并应用讨价还价博弈理论算法对该双目标模型进行求解。最后以某含风电地区电力系统为算例, 验证提出的基于电力计量大数据的电源规划方法的正确性。

关键词: 电力计量; 大数据; 风电; 电源规划

中图分类号: TM933 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)05-0017-07

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.05.004

Research on Generation Planning Based on Big Data of Electricity Metering

Cai Gaolei¹, Liu Guilong²

(1. Shanghai Liangji New Energy Investment Co., Ltd., Shanghai 200245, China;

2. China Haisum Engineering Technology Co., Ltd., Shanghai 200031, China)

Abstract: It has been difficult for the traditional power grid planning to meet the requirements of the safety for large-scale wind power system. To solve this problem, the information of wind power output is fully exploited using big data technology, and the quantitative analysis of wind power fluctuation risk is achieved. On this basis, the source-network-load coordinated planning model is established taking maximum wind power penetration and minimum grid-connected risk as the object and game theory is applied to the twin goals of bargaining to solve it. Finally, taking a power system with wind power in the north-west region for example, the correctness of the proposed coordinated generation planning method based on big data of electricity metering is verified.

Key words: electricity metering; big data; wind power; generation planning

0 引言

风电在成为人类破解能源危机和环境污染难题的一项必然选择的同时, 其出力波动性、间歇性和反调峰特性也给电力系统安全经济运行带来了诸多挑战^[1-7]。切实保障含风电场电力系统安全运行, 提升风电消纳能力成为亟待解决的问题。供电关口计量数据类型多、体量大, 含有巨大的隐性信息可供挖掘^[8]。对上述数据进行深度挖掘并在此基础上开展大规模风电基地电源规划, 对提升电网风电消纳能力, 破解风电长久“绿色”发展瓶颈具有重要而深远的意义。

文献[1]将协调规划期划分为多个阶段, 分场

景模拟未来负荷需求、发输电成本等变量的变化趋势, 建立多阶段电源与电网协调规划模型。文献[2]在进行了电源规划, 确定调节机组配置基础上, 将调节机组选址问题与电网规划问题相结合, 建立了针对风电并网问题的电源电网协调规划模型。文献[3]提出了考虑需求侧响应的含风电场的输电系统两层规划模型, 并采用粒子群算法和原对偶内点法相结合的混合算法对所构造的优化模型进行了求解。文献[4]分别将电力需求侧的能效电厂也纳入电力规划统筹考虑, 提出了源网荷协同规划的概念与模型。但是上述研究未对电力计量大数据这一重要条件加以充分重视, 且对于风电穿透功率的关注明显不足。

下面借助电力计量大数据, 对风电带来的波动

风险进行初步定量分析,建立了双目标的电源规划模型并借助博弈算法求解。

1 基于电力计量大数据的风险评估

风资源具有间歇性和波动性,直接导致风电出力具有波动特性。风电上述特性显著增加了电网调峰难度和调频压力,威胁电网安全稳定运行。判据如表1所示。

表1 风电场有功功率变化限值 单位: MW

| 风电场装机容量 | 10 min 最大有功功率变化限值 | 1 min 最大有功功率变化限值 |
|----------|-------------------|------------------|
| < 30 | 10 | 3 |
| 30 ~ 150 | 装机容量/3 | 装机容量/10 |
| > 150 | 50 | 15 |

对于给定装机容量的风电场或集群(如99 MW),借助数字动态实时仿真软件(digital dynamic real-time simulator,DDRTS)等分析软件可以采集到给定时间尺度(如10 min)内逐渐递增(或递减)加入不同的出力波动量 ΔP_1 、 ΔP_2 、 $\Delta P_i \dots \Delta P_n$ (如10 MW、30 MW...70 MW)下电网各监测点的电压波动曲线和系统频率波动曲线,并可从波动曲线中看出当风电波动量大于等于 ΔP_i 时,系统频率波动大于某个要求的频率变化幅值 Δf ,则可以确定该时间尺度下对应风电的波动限值为

$$\lambda_{\max} = \Delta P_i \quad (1)$$

电力计量大数据是指电力计量设备收集得到的系统内各环节各类型的参数集合,具备电力大数据的“3V3E”特征。为获取某特定地区最大风电波动系数,需尽可能多地获取该地分钟级别风电出力情况。

以新疆某地区为例,结合前面明确的风电波动风险定义可获取该地区最大风电波动系数为0.31,记为 δ 。

2 大规模风电基地电源规划建模

2.1 电源规划体系构建

如图1所示,通过本地负荷消耗、建立特高压直流外送通道及寻求、扩大平衡区域等手段,规划多元电源联运系统,其目的在于保证电力系统安全稳定运行,并兼顾最大限度的提升风、光等新能源极限穿

透功率,以此降低传统的以消耗化石能源为代价的火电等机组的出力,从网侧减少弃风,提升风光的环境效益价值。其中,源端联运系统应该在通盘考虑本地风速资源、本地负荷状况、本地现有电源结构、特高压直流外送受端情况等因素的前提下,统筹规划多元电源的装机容量、特高压直流外送容量及联络线传输容量;而受端系统及平衡区域2在保证本地电力系统安全稳定运行的前提下,应尽可能多地消纳源端电力。

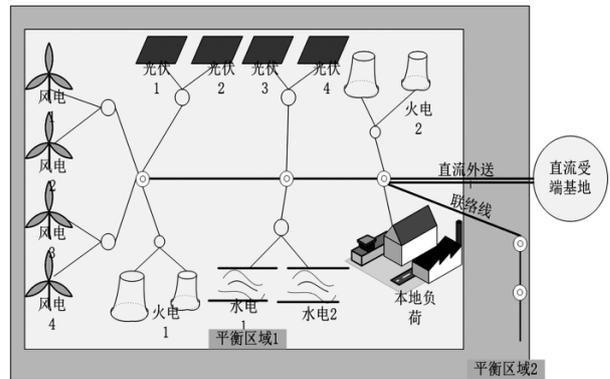


图1 风-火-水多元电源联运系统

图2为大型新能源基地电源规划体系三维空间耦合关系。总体思路为尽可能大地提高风电极限穿透功率并消除因风电并网带来的风险(风电消纳品质)。在这个体系下,提高风电消纳品质的途径包括建立特高压直流外送通道、本地可中断负荷及本地负荷等。按照这个总体思路,综合考虑不同的消纳途径对提高新能源消纳品质的影响和不同空间尺度广域互联风光电系统对提高风电消纳品质的影响。

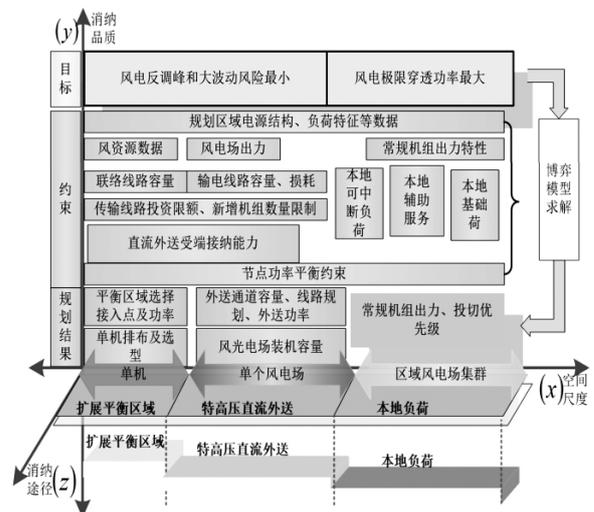


图2 提高风电消纳品质的风电基地电源规划体系

这里提出的电源规划体系空间是由空间尺度 - 消纳途径类型 - 消纳品质 3 个维度构成,在这个空间里,提升风电消纳品质的广域尺度大规模电源规划体系包括:

1) 风电消纳品质是指风电极限穿透功率和风电并网风险。构建的提升风电消纳品质的广域尺度大规模电源规划体系,以风电并网风险最小并兼顾风电极限穿透功率最大为目标,以规划区域现有电源结构和负荷特征、特高压直流输电线路电压和功率、联络线路、规划区域节点功率平衡等为约束。根据博弈论思想,寻找“风电极限穿透功率”和“风电并网风险”两参与人的纳什均衡区域对该体系模型进行求解,最终的规划结果为风电场风机排布方式、风电场装机容量、常规机组(水电、火电)出力优先级、联络线功率以及特高压直流外送线路容量。

2) 扩展平衡区域、特高压直流外送与单机至风电场集群交叉区域:经预处理的风速等数据资源确定风电场单机排布、选型,进而根据风出力特性确定基于尾流效应的单个风电场的有功出力 P_w 。然而,风电场的大规模并网势必会造成其并网系统电压和频率的波动或畸变。一方面可以通过具有电压灵活调节能力的特高压直流输电来消弭前面所述电压的波动风险;另一方面可以通过扩大、寻找新的平衡区域或特高压直流输电等消纳途径实现电能的空间转移。当然,扩大、寻找新的平衡区域或建设特高压直流输电通道要受制于送端电网配套电源状况、电压水平以及受端电网负荷情况。特别说明的是用于提升风电消纳品质的手段要满足但不限于保持现有电网坚强程度。

3) 本地负荷与单个风电场至风电场集群交叉区域:区域内,新能源电源与本地常规机组协调出力,传统火电、水电机组在保证本地基荷需求的前提下,与区域风电场集群联运、互济,在常规机组出力特性、本地负荷等约束条件下,最大化提高风电极限穿透功率。考虑到中国负荷能源分布不对称的现状,即风电等新能源在“三北”地区极为丰富,而负荷多集中于中东部地区,一方面造成了大量的弃风限电;另一方面却要以牺牲环境成本为代价依赖常规化石燃料机组,造成极为矛盾局面。为从根本上缓解这种局面,有效提高资源丰富地区风能的消纳能力,将区域资源优势转化为经济优势,开发大规模电力外送输电走廊尤为必要。

2.2 目标函数

在保证系统安全的前提下提升风电消纳能力是所提源-网-荷协调规划的目的所在,以系统运行风险最低和风电穿透功率最大为目标建立多目标优化模型。

1) 风电并网系统风险最小

$$\min R = \frac{\delta P_W - P_A}{\lambda_Z P_Z + \lambda_F P_F} \quad (2)$$

式中: R 表示系统风电波动风险, R 越小表示系统风险越小; P_W 为风电装机总容量, $P_W = P_{W0} + P_{WN}$, P_{W0} 为已存在风电装机容量, P_{WN} 为计划新建风电装机容量; λ_Z 为直流外送通道的可调节系数, MW/min; λ_F 为火电机组爬坡率; P_Z 为直流外送通道基准容量; P_F 为火电机组基准容量, $P_F = P_{F0} + P_{FN}$, P_{F0} 为已存在火电机组容量, P_{FN} 为新建设火电机组容量; δ 为风电分钟级波动系数,由大数据分析获得; P_A 为风电 1 min 允许最大波动量, MW。

2) 风电穿透功率最大

风电极限穿透功率定义尚存在一定的争议,此处定义为系统能够接受的最大风电装机容量与系统总装机容量之比。

$$\max F = \frac{P_W}{P_W + P_F} \quad (3)$$

2.3 约束条件

风电的随机性等特性决定了在大规模风电并网规划中必须考虑负荷约束、外送通道容量约束、常规机组约束(常规机组容量约束及爬坡速率约束)、风力装机约束、安全运行约束。

1) 负荷约束

$$\alpha(P_{W0} + P_{WN}) + \beta(P_{F0} + P_{FN}) \geq P_{Zmax} + P_{Lmax} \quad (4)$$

2) 外送通道容量约束

$$P_{Zmin} < P_Z < P_{Zmax} \quad (5)$$

3) 常规机组约束

$$P_{Fmin} < P_F < P_{Fmax} \quad (6)$$

$$-\lambda_{FDOWN} < \lambda < \lambda_{FUP} \quad (7)$$

4) 风电装机容量约束:

$$P_{Wmin} < P_W < P_{Wmax} \quad (8)$$

5) 安全性约束

$$\lambda_Z P_Z + \lambda_F P_F \geq 2(\delta P_W - P_A) \quad (9)$$

式中: α 为风电容量可信度; β 为火电机组常规运行时占额定容量比例; P_Z 为外送通道输送容量; P_{Zmin}

和 $P_{Z_{max}}$ 分别为外送通道输送容量的下限和上限; $P_{L_{max}}$ 为本地负荷最大值; $P_{F_{max}}$ 和 $P_{F_{min}}$ 分别为火电出力上限和下限; $-\lambda_{F_{DOWN}}$ 为火电机组降出力速率最大值; $\lambda_{F_{UP}}$ 为火电机组爬坡速率最大值; $P_{W_{max}}$ 和 $P_{W_{min}}$ 分别为风电出力上限和下限。

3 基于 NBI 的博弈论求解

3.1 算法简介

博弈论以收益最大化为目的,主要研究对象是已经公式化了的激励结构间存在的相互作用。多目标优化和博弈论本质都属于一个大的优化领域,二者存在结合可能性。

对于风电穿透功率和系统安全性这两个目标,采用讨价还价问题模型求解纳什均衡解。而针对此类讨价还价问题,纳什提出了4条公理,即帕累托有效性、对称性、等价收益不变性及无关选择独立性用以获得博弈双方的均衡解。由其中的帕累托有效性可知均衡点一定存在于双目标优化问题的帕累托前沿上。至此,迫切的任务是获得该双目标优化问题的帕累托前沿。

3.2 求解过程

为简化操作突出思路,选择利用基于几何投影的NBI法获取问题的若干非劣解,再通过置换度指标的优劣来甄选出解集内最优解。NBI获取非劣解分3步进行:

1) 坐标变换,以实现2个不同量纲目标的规范化,便于后续计算。

以单目标求解出2个极限值,用直线把这2个端点进行连接,将此直线称为乌托邦线。作为目标的风电穿透功率和系统运行风险显然具有不同量纲,采用文献[9]的方法对帕累托前沿的各点进行量纲规范化:

$$\begin{cases} f_{1b}(P_w) = \frac{f_1(P_w) - f_1(P_{w,1})}{f_1(P_{w,2}) - f_1(P_{w,1})} \\ f_{2b}(P_w) = \frac{f_2(P_w) - f_2(P_{w,1})}{f_2(P_{w,2}) - f_2(P_{w,1})} \end{cases} \quad (10)$$

明显地,对于此处帕累托曲线的2个端点,经过上述方法规范化后的坐标分别为(0,0)、(1,1),且此问题乌托邦线的斜率等于1。

2) 法向量投影

乌托邦线上的点同相应帕累托曲面上的点一一

对应,所以可对乌托邦线进行等分,再把每一个等分点通过乌托邦线的垂线映射到帕累托曲面上,如图3所示。

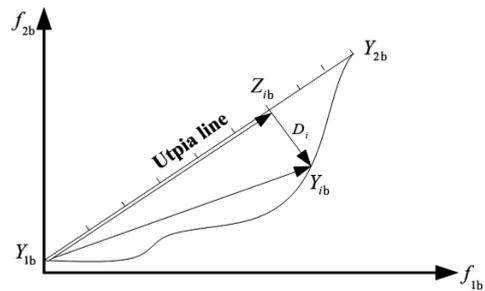


图3 NBI法求解

假设以 n 为乌托邦曲线的等分点数,在建立的单位坐标系下, Y_{ib} 的坐标可表示为

$$[f_{1b}(P_w) \quad f_{2b}(P_w)] = \left(\frac{i}{n}, \frac{i}{n} \right) + \left(\frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2} \right) D_i \quad (11)$$

式中: $(i/n, i/n)$ 为第 i 个等分点的坐标; $(\sqrt{2}/2, \sqrt{2}/2)$ 为乌托邦线垂线方向的单位矢量坐标; D_i 为垂线在乌托邦线与帕累托曲面之间的截距。求解乌托邦线上每一个等分点在帕累托曲线上的投影,即可均匀地生成帕累托前沿解集。

3) 截距优化

根据帕累托最优性条件可以证明,若 Y_{ib} 为帕累托前沿上的点,则 D_i 必然最大。因此,在给定的等分点 i 下,风电穿透功率和系统风险的多目标优化问题可转换为下面的单目标问题并进行求解:

$$\begin{cases} \max D_i \\ d_1(\lambda, D_i) = 0 \\ d_2(P_w, D_i) = 0 \\ \text{s. t. (4) ~ (9)} \end{cases} \quad (12)$$

式中:

$$d_1(\lambda, D_i) = \frac{\lambda - f_2(P_{w,1})}{f_2(P_{w,2}) - f_2(P_{w,1})} - \frac{i}{n} - \frac{\sqrt{2}}{2} D_i \quad (13)$$

$$d_2(P_w, D_i) = \frac{c^T P_w - f_1(P_{w,1})}{f_1(P_{w,2}) - f_1(P_{w,1})} - \frac{i}{n} + \frac{\sqrt{2}}{2} D_i \quad (14)$$

$$\max(R = \lambda) \quad (15)$$

$$\max(F = C^T P_w) \quad (16)$$

获得若干非劣解后,还需要结合置换度指标来对解集内各解进行考察。置换度体现的是牺牲一个

单位的 A 可以换回多少单位 B,是评价一个方案合理与否的重要依据。

4 算例验证

4.1 算例简介

为了对上述建立的计算模型和求解算法进行检验,选取中国西北某含风电场的地区进行计算及分析。该地区 2017—2020 年的负荷结果如表 2 所示。

表 2 西北某地 4 年负荷情况

| 年份 | 负荷/MW | 年增长率/% |
|------|--------|--------|
| 2017 | 9900 | 14.30 |
| 2018 | 11 200 | 14.30 |
| 2019 | 12 500 | 14.30 |
| 2020 | 13 850 | 14.30 |

采取目标年的方式对该区域 2017 年进行规划。2017 年本地负荷需求为 9900 MW,且到时已建成 ±1100 kV 特高压直流输电工程,容量为 12 000 MW,可迅速从额定功率进行调节系数为 0.8~1.0 的功率调节(此处考虑向上或向下调节的空间问题,故将调节能力取一个中间值为 0.1)。系统中原有风电装机容量 887.5 MW,火电装机容量 10 880 MW。

4.2 算例计算

通过上面计算可知该地区风电波动风险系数为 0.31,容量可信度为 40%^[10]。将这 2 个参数带入,并集合原有风电、火电装机情况作为已知条件带入到前面约束式中。经数据带入化简后,原约束条件可以整理为

$$\begin{cases} 0.4P_W + 0.95P_F \geq 14280 \\ 0 \leq P_W \leq 5000 \\ 0 \leq P_F \leq 13200 \\ 3940 + 0.03P_F \geq 0.35P_W \end{cases} \quad (17)$$

首先,以风电穿透功率最大为单目标进行新增风电装机和火电装机的定容计算。

借助 Lingo 进行计算,风电最大穿透功率为 0.239,此时的新增风电装机容量为 4485 MW,新增火电机组容量为 11 668 MW。以同样约束,求取风电穿透功率最小的情况为 0.07,此时新增风电装机容量为 805 MW,新增火电装机容量则为 13 200 MW;

再对系统风险最小进行求解,方法同上。求取的结果刚好与上述结果相吻合,即新增风电装机容量

量为 4485 MW、新增火电机组容量为 11 668 MW 时风险最大,此时的风险系数 $(\delta P_W - P_A) / (\alpha P_Z + \beta P_F)$ 为 0.504,而当新增风电装机容量只有 805 MW、新增火电装机容量为 13 200 MW 时风险降到最低水平,风险系数仅为 0.156。通过上述结果可以确定乌托邦线如图 4 所示。

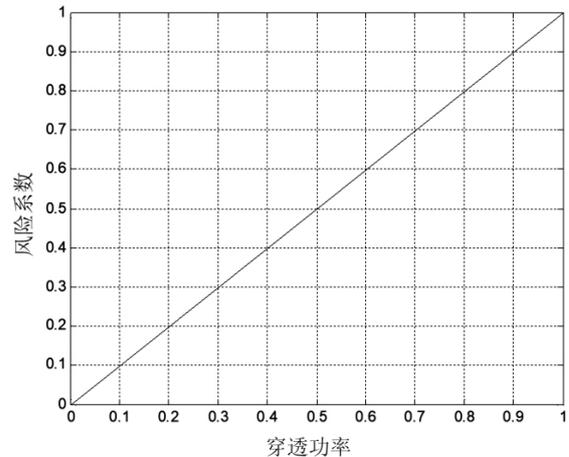


图 4 穿透功率-风险相关性乌托邦直线

获取乌托邦线后,通过前面所述步骤采取等 NBI 方法,插入 20 个等分点,获取等间隔的帕累托前沿上一系列非劣解,如图 5 所示。

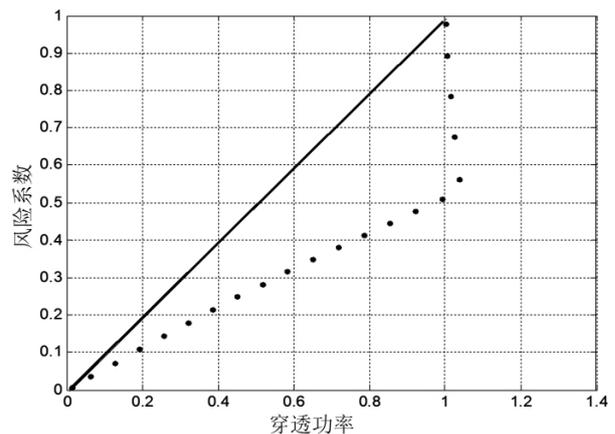


图 5 帕累托前沿

但仅凭此仍不足以确定哪一个才是规划最优点,此时需要辅以置换度指标作为决策依据。将置换度定义为每增加一个单位的风电穿透功率需要付出的风险代价。采用文献[9]提出的方法,求出每个帕累托最优点对应的置换度散点分布如图 6 所示。

结合定义,置换度最低点为最优规划点。需要说明的是,图像椭圆区域内 4 个点已经出现置换度为负数的情况,其物理含义为随着风电穿透功率的增加,风险反而下降,已经超出合理范围,故不加以考虑。该问题的最优解存在于该区域内,进一步将

该区域放大进行寻优,其图像如图7所示。

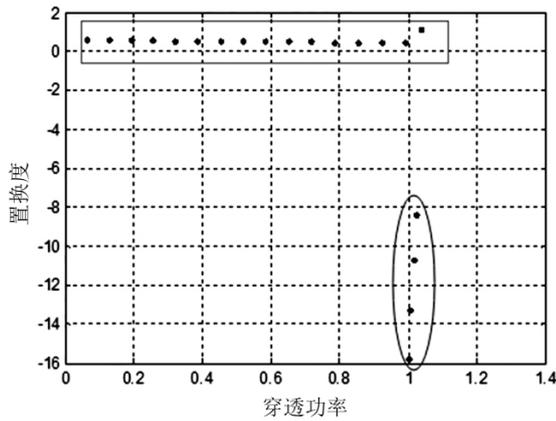


图6 置换度分布

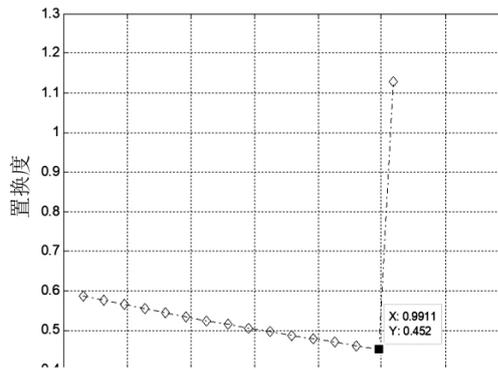


图7 最佳置换度

通过对比可以确定最佳置换度为0.45195,其对应的帕累托前沿曲线上的点即为博弈解的最优解,为新增风电4385 MW、新增火电13200 MW。最优解对应的风电穿透功率为0.220,风险系数为0.486。将此双目标协调规划结果与单目标优化结果进行对比,具体结果见表3。

表3 单/双目标规划结果对比

| 目标函数 | 新增风电量/MW | 新增火电量/MW | 风电穿透功率 | 风险系数 |
|--------|----------|----------|--------|-------|
| 并网风险最低 | 805 | 13200 | 0.07 | 0.156 |
| 穿透功率最高 | 4485 | 11668 | 0.239 | 0.504 |
| 双目标 | 4385 | 13200 | 0.220 | 0.486 |

由上面结果对比可知,与单目标规划方法比较,所获得的结果在提升风电穿透功率和确保较低风险方面均取得了较好的效果。

4.3 敏感性分析

1) 风电装机容量随新能源极限穿透功率及其并网风险的敏感性

基于上述理论,固定新增火电装机容量12618.7 MW和特高压直流输电容量12000 MW的数值不变,改变风电装机容量,计算新能源极限穿透功率和新能源并网风险的敏感性。由图8可知,新能源极限穿透功率和新能源并网风险随着风电装机容量的增加而增大,一定程度上说明了在规划新增风电场时应兼顾新能源风险等因素对电网安全稳定性的影响。

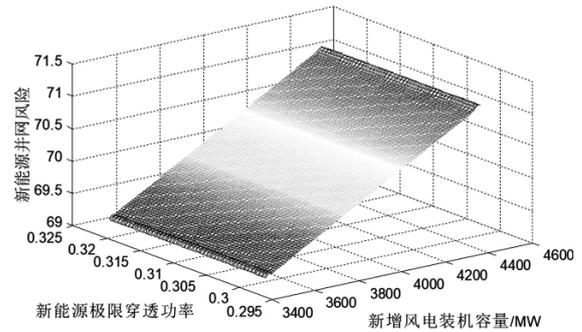


图8 风电装机容量随风电极限穿透功率/并网风险的敏感性

2) 火电装机容量随新能源极限穿透功率及其并网风险的敏感性

同理,此时固定新增风电装机容量4167.6 MW和特高压直流输电容量12000 MW的数值不变,改变新增火电装机容量,计算新能源极限穿透功率和新能源并网风险的敏感性。由图9可知:新能源极限穿透功率和新能源并网风险随着火电装机容量的增加而减小,而且风险比穿透功率以较快的速度减小,一定程度上说明了在规划新增或者扩容火电站时,不能只看到其对生态环境的破坏性,更多的要兼顾其对电力系统安全稳定性的重要作用。

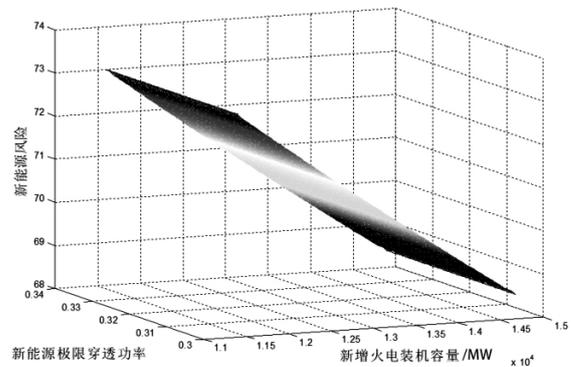


图9 火电装机容量随新能源极限穿透功率/并网风险的敏感性

3) 特高压直流输电通道容量随新能源极限穿

透功率和并网风险的敏感性。

同理,此时固定新增风电装机容量4 167.6 MW、新增火电装机容量12 618.7 MW的数值不变,改变特高压直流外送通道的实际输送容量,计算新能源极限穿透功率和新能源并网风险的敏感性。由图10可知,考虑到准东—皖南±1100 kV特高压直流输电实际输送能力,设定其变化范围为(9600 MW, 12 000 MW),随着特高压直流外送输电通道实际输送能力的增大,新能源风险逐渐减小,而与此同时,新能源极限穿透功率却不断增大,这说明由于特高压直流外送通道的建设,使得送端基地在增加新能源消纳水平的同时兼顾了由于新能源并网对系统安全稳定性的影响,这一结论也一定程度上说明了建设UHVDC的正确性、必要性和重要性。

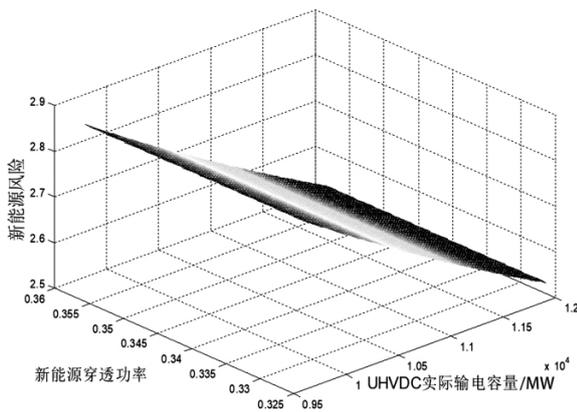


图10 特高压直流输电容量随风电极限穿透功率/并网风险的敏感性

5 结 语

迫于环境压力及传统化石能源的日益枯竭以及随着技术的逐步进步与成熟,以风、光为代表的大规模新能源开发与并网成为必然趋势。对电力计量大数据进行充分数据挖掘,实现了对风电出力波动风险的评估分析。以此为基础,建立了大型新能源电源规划模型。算例表明,所提出的规划模型能够确保电源建设和电网线路建设的协调匹配,在全局角度制定最优方案,实现在较低系统风险的前提下尽可能多地消纳风电。

迄今为止,特高压直流外送是突破源—荷地理位置限制的有效方法之一。然而,查阅相关研究的公开报道,国内外对±1100 kV及以上的特高压直流输电的研究较少,对特高压直流输电对送、受端电

网的影响研究鲜见,因此特高压直流输电任重而道远。前面主要对耦合特高压直流输电通道的大型新能源基地电源体系规划展开了研究,还存在一下问题需要进一步研究:

- 1) 考虑电网平衡区域扩展的UHVDC配套电源体系规划;
- 2) 计及成本约束的UHVDC配套电源体系规划模型。

参考文献

- [1] 高赐威,吴天婴,何叶,等. 考虑风电接入的电源电网协调规划[J]. 电力系统自动化,2012,36(22):30-35.
- [2] 张运洲,白建华,辛颂旭. 我国风电开发及消纳相关重大问题研究[J]. 能源技术经济,2010,22(1):1-6.
- [3] 魏磊,张琳,姜宁,等. 包含风电的电力系统调峰能力计算方法探讨[J]. 电网与清洁能源,2010,26(8):59-63.
- [4] Nguyen D, Pham T, Bacha S et al. Optimal Operation for A Wind - hydro Power Plant to Participate to System - services [C]//IEEE International Conference on Industrial Technology, IEEE, 2009.
- [5] 李建林. 大规模储能技术对风电规模化发展举足轻重[J]. 变频器世界,2010(6):65-68.
- [6] 张立军. 风电场建模及电源扩展规划研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2006.
- [7] 高赐威,何叶. 考虑风力发电接入的电网规划[J]. 电力科学与技术学报,2009,24(4):19-24.
- [8] Billinton R, Wangdee W. Reliability - Based Transmission Reinforcement Planning Associated with Large - Scale Wind Farms [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1):0-41.
- [9] 熊宁,程浩忠,马则良,等. 发电机出力成本与负荷裕度置换度指标的NBI求解方法[J]. 电力系统自动化,2010,34(5):34-38.
- [10] 王海超,鲁宗相,周双喜. 风电场发电容量可信度研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(10):103-106.

作者简介:

蔡高雷(1989),硕士,从事电力系统安全稳定运行与控制研究;

刘桂龙(1979),硕士,工程师,从事电力系统配电设计研究。

(收稿日期:2019-07-19)