

兼顾新能源穿透功率和风险的风光火打捆外送电源规划

张恒¹, 袁铁江^{2,1}, 车勇³, 蔡高雷⁴, 马万成¹, 刘兆霆¹

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830008;

2. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁省大连市 116024;

3. 国网新疆电力有限公司, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830000; 4. 上海电力股份有限公司, 上海市 200010)

摘要: 随着特高压直流输电的发展,科学规划风光火打捆外送电源是充分发挥输电工程可靠性及其经济效能的前提。文中构建了兼顾新能源穿透功率极限和新能源出力反调峰及大波动风险的多目标优化配置模型,以保证输电工程的安全运行。为解决相互矛盾的优化目标,采用权系数法将所构建的多目标优化问题转化为单目标优化问题,通过引入博弈论思想确定权重系数以弥补权系数法主观性强的缺点,并设计嵌套的遗传算法对模型进行求解。对某地区电力系统进行实例规划,以验证上述多目标优化方法的有效性,结果表明所提规划模型能兼顾新能源穿透功率极限要求和新能源出力风险问题。

关键词: 电源规划; 博弈论; 穿透功率极限; 出力风险

0 引言

按规划目标要求,“十三五”期间将建立两条±1 100 kV 特高压直流输电工程,缓解中国中东部地区与西部地区能源供需分布极度不对称状况,同时贯彻落实“西电东送”战略。特高压直流输电工程势必造成送端电网电源需求增加,而中国西部蕴含丰富风能和太阳能等新能源,因此利用风光等新能源来合理规划配套电源显得尤为重要^[1]。但风能和太阳能自身有非常强的随机性、波动性和间歇性,使得风电、太阳能发电给电力系统稳定运行带来了巨大挑战,不仅会加剧弃风、弃光现象,而且无法直接利用其进行直流输电,因此,规划中利用火电来平抑风光出力劣势,构建以风光火混合电源方式进行直流输电能够保证输电工程安全、可靠运行^[2]。

科学规划风电、太阳能发电和火电等容量是保证能源高效利用不可或缺的前提。迄今为止,对于风光火混合电力系统规划问题方面的研究已有很多并且取得了重大进展。文献[2]考虑风光等各类电能的年发电小时数和年输电量,提出基于风光出力曲线进行配套电源规划,但该方法需要假设不同的

风光出力对比得到最优方案。文献[3]提出了在优先输送风电前提下合理输送火电容量的规划方法;文献[4]以提高电网节能减排效益为目标,提出了基于时序仿真的风光容量优化配置方法。但是该类规划模型都是利用单一目标来进行容量规划,没有考虑多个目标间的相互影响与制约,由于目标单一使得规划结果存在局限性,无法满足系统对大规模新能源接入的要求。实际上,已有部分学者提出多目标规划模型,文献[5]以混合电力系统技术经济特性为出发点,基于博弈论建立了风光储混合电力系统规划模型,并以迭代搜索法求解;文献[6-8]构建涉及投资者收益和供电可靠性等方面的多目标优化配置模型,利用改进微分进化算法进行求解。

本文在已有研究的基础上^[2-9],针对风光电源特性建立风光火打捆外送电源多目标规划模型,并提出基于博弈策略的权系数求解方法。该求解方法利用 Nash 协商确定各优化目标的权重,进一步采用遗传算法(genetic algorithm,GA)进行求解。最后,通过实际算例验证规划模型和求解方法。

1 兼顾穿透功率和风险的风光火打捆外送电源规划建模

1.1 问题阐述

目前,在风电和太阳能发电规划中通常以新能源穿透功率极限最大为目标函数,从而保证系统最大化接纳新能源。然而,新能源出力本身存在不可

收稿日期: 2017-07-14; 修回日期: 2018-02-21。

上网日期: 2018-08-27。

国家重点研发计划资助项目(2017YFB0903500); 国家自然科学基金资助项目(51577163); 国家电网公司科技项目(5230HQ16016U)。

控、不可调特性,新能源并网可能会对系统的稳定运行造成困扰。一味追求新能源穿透功率极限势必造成风光电出力不可控、不可调特性突出风险增加,相反,降低风光电出力会使风险减小,但系统不得不增加火电机组,必将造成新能源穿透功率极限下降。因此,为了兼顾新能源穿透功率极限最大和出力风险最小,本文在考虑新能源穿透功率极限的基础上构建新能源出力的两个风险评估模型。

1.2 风光火打捆外送电源规划模型

1.2.1 目标函数

新能源穿透功率极限(指系统内新能源总装机容量与系统内所有电源装机容量的比值)水平反映了系统接纳新能源的水平和能力,为了保证能够最大程度地接纳新能源并消纳,因此以新能源穿透功率极限 F 最大为优化目标,有

$$\max F = \frac{P_{Zw}^o + P_{Zw}^n + P_{Zpv}^o + P_{Zpv}^n}{P_{Zw}^o + P_{Zw}^n + P_{Zpv}^o + P_{Zpv}^n + P_{Zf}^o + P_{Zf}^n} \tag{1}$$

式中: P_{Zw}^o 和 P_{Zw}^n 分别为风电规划时已存在有效装机容量和规划新增有效装机容量; P_{Zpv}^o 和 P_{Zpv}^n 分别为太阳能发电规划时已存在有效装机容量和规划新增有效装机容量; P_{Zf}^o 和 P_{Zf}^n 分别为常规火电规划时已存在有效装机容量和规划新增有效装机容量。

新能源出力风险主要是由其不可控、不可调特性决定,而新能源的随机性和波动性导致其不可控、不可调。利用反调峰风险来映射新能源随机性,大波动风险来映射新能源波动性,但两者本质上存在明显差异,简单叠加势必影响出力准确性,因此本文分别以新能源反调峰风险 R_f 最小和大波动风险 R_b 最小为优化目标,有

$$\min R_f = \frac{\xi_{Zw}(P_{Zw}^o + P_{Zw}^n) + \xi_{Zpv}(P_{Zpv}^o + P_{Zpv}^n)}{\lambda_{Zf}(P_{Zf}^o + P_{Zf}^n) + \lambda_{ws}P_{ws}} \tag{2}$$

$$\min R_b = \frac{\epsilon_{Zw}(P_{Zw}^o + P_{Zw}^n) + \epsilon_{Zpv}(P_{Zpv}^o + P_{Zpv}^n)}{\lambda_{Zf}(P_{Zf}^o + P_{Zf}^n) + \lambda_{ws}P_{ws}} \tag{3}$$

式中: ξ_{Zw} 和 ϵ_{Zw} 分别为风电反调峰风险系数和大波动风险系数; ξ_{Zpv} 和 ϵ_{Zpv} 分别为太阳能发电反调峰风险系数和大波动风险系数; λ_{Zf} 为常规火电机组旋转备用率; λ_{ws} 为外送容量可控系数; P_{ws} 为规划外送容量。其中,反调峰风险系数指风/光的最大反调峰功率与其装机容量的比值;波动风险系数指风/光的最大功率波动量与其装机容量的比值;外送容量可控系数指外送容量调节上下限的差值。

1.2.2 约束条件

电力供需平衡约束:

$$P_{Zw}^o + P_{Zw}^n + P_{Zpv}^o + P_{Zpv}^n + P_{Zf}^o + P_{Zf}^n = (1 + \eta_{b,mar})(P_{L,total} + P_{ws}) \tag{4}$$

式中: $P_{L,total}$ 为预计可达到的总负荷量; $\eta_{b,mar}$ 为系统备用裕度系数(指系统备用容量和最大需求容量的比值), $0 \leq \eta_{b,mar} \leq 1$ 。

系统新能源出力约束:

$$E_{Zw,min}^n \leq P_{Zw}^n \leq E_{Zw,max}^n \tag{5}$$

$$E_{Zpv,min}^n \leq P_{Zpv}^n \leq E_{Zpv,max}^n \tag{6}$$

式中: $E_{Zw,min}^n$ 和 $E_{Zpv,min}^n$ 分别为新增风电和太阳能发电预计最小出力; $E_{Zw,max}^n$ 和 $E_{Zpv,max}^n$ 分别为新增风电和太阳能发电预计最大出力。

新能源规划装机总量约束:

$$E_{Zw,max}^n \leq E_{Zw}^n \tag{7}$$

$$E_{Zpv,max}^n \leq E_{Zpv}^n \tag{8}$$

式中: E_{Zw}^n 和 E_{Zpv}^n 分别为风电和太阳能发电新增规划装机容量。

外送容量约束:

$$\mu_d P_{ws}' \leq P_{ws} \leq \mu_u P_{ws}' \tag{9}$$

式中: μ_d 和 μ_u 分别为外送容量调节下限和上限; P_{ws}' 为外送容量极限。

风光火公平性约束:

$$|\mu_{Zw,t}^n - \mu_{Zw,t}^o| \leq \mu_{Zw,max} \tag{10}$$

$$|\mu_{Zpv,t}^n - \mu_{Zpv,t}^o| \leq \mu_{Zpv,max} \tag{11}$$

$$|\mu_{Zf,t}^n - \mu_{Zf,t}^o| \leq \mu_{Zf,max} \tag{12}$$

式中: $\mu_{Zw,t}^n$ 和 $\mu_{Zw,t}^o$ 分别为新增和已有风电 t 时段平均出力率, $\mu_{Zw,t}^n = P_{Zw,t}^n / E_{Zw}^n$, $\mu_{Zw,t}^o = P_{Zw,t}^o / E_{Zw}^o$, 其中 $P_{Zw,t}^n$, $P_{Zw,t}^o$, E_{Zw}^n 分别为 t 时段新增风电平均出力、已有风电平均出力和已有风电装机容量; $\mu_{Zpv,t}^n$ 和 $\mu_{Zpv,t}^o$ 分别为新增和已有太阳能发电站 t 时段平均出力率; $\mu_{Zf,t}^n$ 和 $\mu_{Zf,t}^o$ 分别为新增和已有火电 t 时段平均出力率; $\mu_{Zw,max}$, $\mu_{Zpv,max}$, $\mu_{Zf,max}$ 分别为不同风电场之间、太阳能发电站之间和火电厂之间在同一时期平均出力率所能达到的最大差值。

2 基于博弈策略与遗传算法相结合的模型求解

上述模型中,对于每个目标都是一个独立优化问题模型,但各目标之间又相互影响,构成多目标优化问题;因此,如何同时保证最大化新能源穿透功率极限和最小化新能源出力(反调峰、大波动)风险意义十分重大。目前,多目标优化求解方法有很多,权重系数法^[10-11]是将多目标优化问题的各目标通过附加权重的方式进行线性组合,达到将多目标优化问题转化为单目标求解,其中权重系数决定了各目标的重要性并影响最终优化结果,所以如何准确设定权重系数是研究使用该方法的一个重要方面。

为克服现有权系数法在确定权重系数方面受限于决策者主观性的缺点,本文提出利用博弈论思想,

借助 Nash 协商策略确定权重系数,最终通过权系数法得到优化结果,求解流程如图 1 所示。

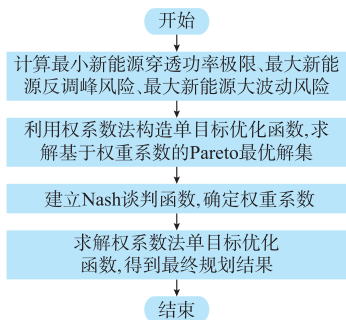


图 1 基于博弈策略的权系数法求解流程
Fig.1 Solving process of weight coefficient method based on game theory

2.1 基于博弈策略的权系数法

根据权系数法的基本思路,将式(1)一式(3)通过线性组合方式转化为单目标函数模型:

$$\min G(F, R_f, R_b) = \lambda_1 \frac{1}{F} + \lambda_2 R_f + \lambda_3 R_b \quad (13)$$

式中: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 分别为新能源穿透率极限 F 、反调峰风险 R_f 和大波动风险 R_b 的权重系数, $\lambda_i \in [0, 1]$, $\sum_{i=1}^3 \lambda_i = 1$ 。由于 R_f 和 R_b 在优化中寻求最小值,而 F 则是寻求最大值,因此,为保证目标函数的寻优一致性,在式中将 F 改写为 $1/F$ 。

在求解式(13)多元函数 $G(F, R_f, R_b)$ 的最小值时,多元函数最值在其极值点或者边界取得,而极值点是在函数对自变量偏导数为零处取得,即

$$\frac{\partial G}{\partial P_{Zw}^n} = \frac{\partial G}{\partial P_{Zpv}^n} = \frac{\partial G}{\partial P_{Zf}^n} = \frac{\partial G}{\partial P_{ws}} = 0 \quad (14)$$

由式(14)可以求得 $P_{Zw}^n, P_{Zpv}^n, P_{Zf}^n, P_{ws}$ 关于权重系数 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 的表达式,即多目标优化 Pareto 最优解集;进而,可以将式(1)一式(3)改写为关于 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 的函数,即 $F(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3), R_f(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3), R_b(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ 这 3 个目标函数表达式。这 3 个目标之间存在竞争关系,因此该问题属于博弈论中一类典型的“讨价还价”问题,有望采用博弈理论及方法加以解决^[12-13]。

根据 Nash 公理,博弈论问题存在满足下述要求的唯一合理解^[14]:

$$f(x) = \operatorname{argmax}_x (f_1(x) - d_1)(f_2(x) - d_2) \quad (15)$$

式中: $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 为参与者支付函数; d_1 和 d_2 为参与者最劣支付。

基于上述 Nash 公理确定的博弈问题合理解要求,将 $F(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3), R_f(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3), R_b(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$

这 3 个目标函数作为 3 个支付函数。通过博弈策略协商目标函数中 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 的合理值,从而确定单目标函数模型 $G(F, R_f, R_b)$ 的最终表达式。

2.2 基于遗传算法的外送电源规划模型求解

要求解式(1)一式(3)所示的多目标问题,关键在于 3 个目标函数最劣支付及基于博弈策略构建 Nash 谈判函数中各目标间权重系数的确定。而在求解过程中,涉及 4 次单目标、多约束复杂寻优,此 4 次寻优过程是求解该多目标优化问题的重中之重。而遗传算法是一种求解复杂寻优问题较为新型并且十分有效的方法^[15-17]。本文在传统遗传算法的基础上改进得到一种针对求解上述基于博弈策略多目标优化问题的遗传算法,求解流程如图 2 所示。

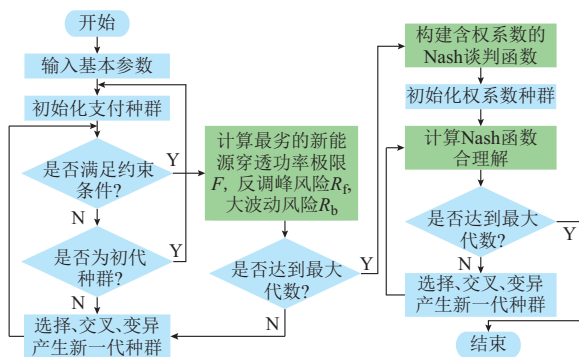


图 2 基于遗传算法计算权重系数的流程
Fig.2 Calculating process of weight coefficient based on genetic algorithm

在图 2 中利用遗传算法进行复杂寻优过程中,首先,必须确定支付函数初始种群,由于支付函数具有与式(4)一式(12)等相同的约束条件并且三者之间存在相对制约与影响关系,因此三者之间必须保证初始种群相同。然后,在该种群下进行选择、交叉以及变异并通过“优胜劣汰”收敛到最终结果。进而,根据此结果以及由权重系数表示的 Pareto 最优解集构建出基于 Nash 谈判的博弈策略函数。最后,通过遗传算法确定出各目标权重系数。

为了保证规划结果的准确性,将通过 Nash 谈判所确定的权重系数代入式(13)中,进而构建出以 $G(F, R_f, R_b)$ 为目标函数,以式(4)一式(12)为约束条件的模型。该模型同样是单目标、多约束复杂寻优求解模型,鉴于该模型是传统单目标优化问题,因此本文采用基本遗传算法进行求解。

3 算例分析

3.1 算例介绍

中国西北以风电场、光伏电站及常规火电机组为主要供电电源,本文拟通过规划某地区电力系统

风光火混合打捆外送来提高新能源消纳水平,并以此来验证上述模型的合理性及求解方法的准确性。算例采用该地区截至 2016 年底的实际数据,其中风电 790.5 MW、太阳能发电 337 MW、火电 7 540 MW,规划 2020 年电源配套结果。

根据拟规划地区风、光资源特性,并结合该地区电源和负荷现状进行分析,预计至 2020 年底,该地区能够达到风电、太阳能发电极限以及相应所需最大火电的基本状况分别为:风电装机容量 6 000 MW、有效利用小时数 2 578 h;太阳能发电装机容量 5 000 MW、有效利用小时数 1 671 h;火电装机容量 30 000 MW、有效利用小时数 3 000 h。该地区负荷预计达到 13 850 MW,外送额定容量为 12 000 MW。

在求解中,设火电机组备用率为 5%,系统备用裕度为 15%。外送容量可控系数取 0.2,调节下限和上限分别取 80%和 100%。由于同一地区的风光资源关联性很强,因此对于该地区风电、太阳能等新能源反调峰和大波动风险系数,本文采用统计学原理,计算出最恶劣情况下风险系数并以此进行算例求解,其中风电最大反调峰系数和最大波动系数均为 1.0;太阳能发电最大反调峰系数和最大波动系数分别为 0.899 和 0.692。公平性约束式(10)一式(12)中的 $\mu_{Zw,max}$ 、 $\mu_{Zpv,max}$ 、 $\mu_{Zf,max}$ 都设为 10%。

3.2 算例求解

为了建立 $G(F,R_f,R_b)$,必须首先确定与其相关的式(1)一式(3)这 3 个目标函数的权重系数,而

在计算权重系数时必须先行计算 3 个参与者最劣支付,即新能源穿透功率极限 F 理论最小值、新能源的反调峰风险 R_f 理论最大值和大波动风险 R_b 理论最大值。基于前文理论,分别对新能源穿透功率极限最小、新能源的反调峰风险最大和大波动风险最大进行单目标优化,结果如下:新能源穿透功率极限 F 最劣支付为 3.793%,新能源反调峰风险 R_f 最劣支付为 3.86,新能源反调峰风险 R_b 最劣支付为 3.48。

根据式(15)中关于博弈策略 Nash 谈判求解唯一合理解的要求,构造含 3 个参与者的博弈策略,并将利用式(14)计算的多目标优化 Pareto 最优解集代入博弈策略,从而求解并确定 3 个参与者权重系数如下:新能源穿透功率极限 F 的权重系数 λ_1 为 0.443;新能源反调峰风险 R_f 的权重系数 λ_2 为 0.271;新能源反调峰风险 R_b 的权重系数 λ_3 为 0.286。

利用权系数法将多目标优化问题转化为式(13)所示的单目标优化问题,并以此规划出该地区风光火容量配置与可外送容量。同时,分别以新能源穿透功率极限 F 最大、完全消弭(风险为 1)新能源大波动风险的前提下新能源反调峰风险 R_f 最小和完全消弭(风险为 1)新能源反调峰风险的前提下新能源大波动风险 R_b 最小的单目标优化计算出相应的光火容量配置与可外送容量。规划配置结果如表 1 所示。

表 1 不同方法计算结果对比
Table 1 Comparison of calculating results between different methods

方法	决策变量				目标函数		
	规划风电容量/MW	规划光伏发电容量/MW	规划火电容量/MW	规划外送容量/MW	新能源穿透功率极限/%	新能源的反调峰风险	新能源的大波动风险
博弈策略的权系数法	4 167.600	4 079.555	1 2812.845	12 000.000	31.535	2.612	2.345
单目标优化 (穿透功率极限 F 最大)	5 209.500	4 663.000	8 427.500	9 600.000	40.790	3.860	3.480
单目标优化 (反调峰风险 R_f 最小)	2 566.557	22.790	18 048.256	11 632.699	12.683	1.021	1
单目标优化 (大波动风险 R_b 最小)	30.554	2 757.688	17 876.094	11 655.945	13.350	1.000	1(实际 0.822)

3.3 权重系数分析

由于权系数法求解多目标优化问题对权重系数要求很重要,不同权重系数优化结果会有很大差异。前述权重系数虽然使用博弈论思想使各目标自行协商求解,但由于采用遗传算法进行协商求解,而遗传算法对初始种群的依赖性很强,从而造成协商结果差异。因此,本文对协商的权重结果进行分析,以保

证协商结果准确合理。

因为规划模型为相互制衡的三目标优化问题,而其权重系数之和为 1,所以采用固定某一权重系数逐步改变另一权重系数来进行规划,观察目标函数变化规律以及 NBI (normal boundary intersection)求解的置换度指标^[18]。固定新能源反调峰风险权重系数 λ_2 为 0.271 时,新能源穿透功率

极限 F 的权重系数 λ_1 变化对 F 的影响以及 F 与 R_b 的置换度如图 3 所示。固定新能源大波动风险权重系数 λ_3 为 0.286 时,新能源穿透率极限 F 的权重系数 λ_1 变化对 F 的影响以及 F 与 R_f 的置换度如图 4 所示。

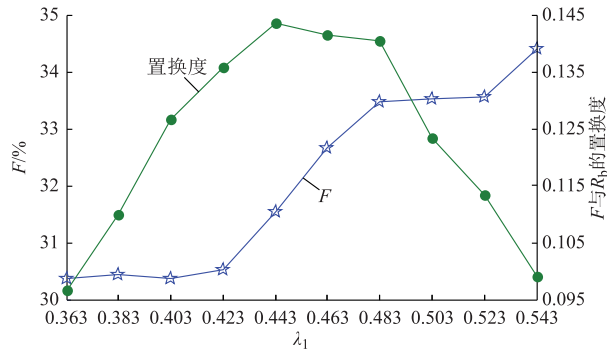


图 3 权重系数变化对 F 的影响以及 F 与 R_b 的置换度 ($\lambda_2=0.271$)

Fig.3 Effect of varied weight coefficient on F and replacement degree of F and R_b ($\lambda_2=0.271$)

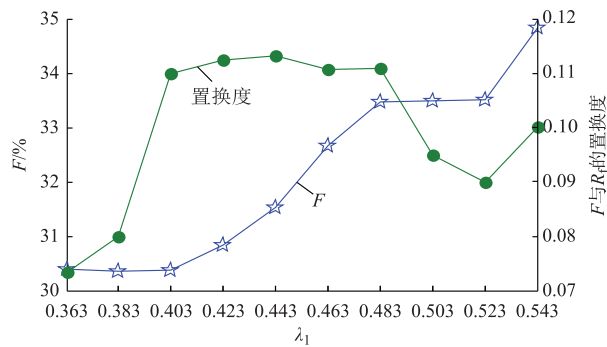


图 4 权重系数变化对 F 的影响以及 F 与 R_f 的置换度 ($\lambda_3=0.286$)

Fig.4 Influence of varied weight coefficient on F and replacement degree of F and R_f ($\lambda_3=0.286$)

由图 3 和图 4 可以看出,随着权重增加,新能源穿透率极限 F 呈上升趋势,而穿透率极限与风险的置换度呈现先升后降的变化趋势。在权重系数设置为 0.443 时,图 3、图 4 中置换度均达到最大值。若权重系数小于该值,置换度均急剧上升,大于该值时,开始下降,因此,将权重系数设置为 0.443 相对比较合理。该结果与上述计算结果是一致的,表明通过本文提出的多目标求解算法计算得到的权重系数的准确性。

3.4 方法对比分析

由表 1 可以看出,在单目标优化中,如果单纯追求新能源穿透率极限,虽然能够使其达到最大,但是相应的新能源风险也均达到最大,从而在很大程度上影响了电力系统的正常运行;如果仅仅为了追求风险最小,虽然看似完全消弭风险,但是新能源穿

透率极限大大减小。而本文提出的基于博弈策略的权系数法规划结果,综合考虑了新能源穿透率极限、新能源反调峰风险和大波动风险,既能够保证新能源穿透率极限所要求,同时又可以兼顾新能源风险问题以达到保证电力系统安全稳定运行的要求。

不同规划方法中,一方面,对于风电容量、光伏发电容量和火电容量,本文提出的基于博弈策略的权系数法由于考虑多方面的因素影响,使规划结果相较于单目标优化较为合理。而单目标优化的结果均存在约束条件边界情况,尤其是对于风险最小时,出现风电容量或者光伏发电容量近似为零。另一方面,对于外送容量,除穿透率极限最大时规划结果为外送容量调节的下限外,基本上均为外送上限,即能够满足外送额定容量要求。

通过上述分析能够看出,本文所提的博弈策略权系数混合电源规划模型,可以兼顾穿透率极限、反调峰和大波动风险。规划结果可根据实际情况进行调节,具有一定指导性。

4 结语

本文建立了风光火打捆外送电源规划模型,综合考虑新能源穿透率极限、新能源反调峰和大波动风险等多个优化目标,在此基础上,通过 Nash 协商确定各目标权重系数,将多目标优化问题转换为单目标求解,该模型具有工程实用性,对电源规划建设有一定的指导意义。针对该模型构建了基于 Nash 协商博弈策略的权系数求解方法,该方法弥补了传统权系数法中确定权重系数主观性强的不足,降低了传统权系数法求解多目标优化问题的难度,为利用权系数法求解多目标优化问题确定权重系数提供了便利。

本文所提电源规划方法重点考虑新能源并网的技术约束,经济性约束考虑较少,在后续工作中还需要在该方面深入研究。

参考文献

[1] 许丹,王斌,张加力,等.特高压直流外送风光火电力一体化调度计划模型[J].电力系统自动化,2016,40(6):25-29. DOI: 10.7500/AEPS20150727003.
XU Dan, WANG Bin, ZHANG Jiali, et al. Integrated transmission scheduling model for wind-photovoltaic-thermal power by ultra-high voltage direct current system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(6): 25-29. DOI: 10.7500/AEPS20150727003.
[2] 刘振亚,张启平,董存,等.通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究[J].中国电机工程学

报,2014,34(16):2513-2522.

LIU Zhenya, ZHANG Qiping, DONG Cun, et al. Efficient and security transmission of wind, photovoltaic and thermal power of large-scale energy resource bases through UHVDC projects [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2513-2522.

[3] 侯婷婷,娄素华,张滋华,等.协调大规模风电汇集外送的火电容量优化[J].电工技术学报,2012,27(10):255-261.

HOU Tingting, LOU Suhua, ZHANG Zihua, et al. Capacity optimization of corollary thermal sources transmitted with large-scale clustering wind power [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 255-261.

[4] 曹阳,黄越辉,袁越,等.基于时序仿真的风光容量配比分层优化算法[J].中国电机工程学报,2015,35(5):1072-1078.

CAO Yang, HUANG Yuehui, YUAN Yue, et al. Stratified optimization algorithm for optimal proportion of wind and solar capacity based on time sequence simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1072-1078.

[5] 梅生伟,王莹莹,刘锋.风-光-储混合电力系统的博弈论规划模型与分析[J].电力系统自动化,2011,35(20):13-19.

MEI Shengwei, WANG Yingying, LIU Feng. A game theory based planning model and analysis for hybrid power system with wind generators-photovoltaic panels-storage batteries [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 13-19.

[6] WANG L, SINGH C. PSO-based multi-criteria optimum design of a grid-connected hybrid power system with multiple renewable sources of energy[C]// IEEE Swarm Intelligence Symposium (SIS 2007), April 1-5, 2007, Honolulu, USA: 250-257.

[7] 杨琦,张建华,刘自发,等.风光互补混合供电系统多目标优化设计[J].电力系统自动化,2009,33(17):86-90.

YANG Qi, ZHANG Jianhua, LIU Zifa, et al. Multi-objective optimization of hybrid PV/wind power supply system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 86-90.

[8] YANG Hongxing, LU Lin, ZHOU Wei. A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system[J]. Solar Energy, 2007, 81(1): 76-84.

[9] 陈启鑫,康重庆,夏清,等.电力行业低碳化的关键要素分析及其对电源规划的影响[J].电力系统自动化,2009,33(15):18-23.

CHEN Qixin, KANG Chongqing, XIA Qing, et al. Key low-carbon factors in the evolution of power decarbonisation and their impacts on generation expansion planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15): 18-23.

[10] 张程飞,刘纯,王跃峰,等.基于模糊多目标优化的电网日前风电接纳能力评估模型[J].电网技术,2015,39(2):426-431.

ZHANG Chengfei, LIU Chun, WANG Yuefeng, et al. A fuzzy multi-objective optimization based evaluation model of wind power accommodation capability [J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 426-431.

[11] 张新松,袁越,陈哲,等.考虑电能质量约束的含风电场电网规划[J].电网技术,2012,36(6):195-199.

ZHANG Xinsong, YUAN Yue, CHEN Zhe, et al. Planning of power grid containing wind farm considering power quality constraint [J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 195-199.

[12] 黄涛.博弈论教程——理论·应用[M].北京:首都经济贸易大学出版社,2004.

HUANG Tao. Game theory tutorial—theory and application [M]. Beijing: Capital University of Economics and Business Press, 2004.

[13] 施锡铨,陆秋君,钟明.博弈入门[M].上海:上海财经大学出版社,2010.

SHI Xiquan, LU Qiujun, ZHONG Ming. Game introduction [M]. Shanghai: Shanghai University of Finance and Economics Press, 2010.

[14] 王一,龚媛,王程,等.基于讨价还价博弈的中长期购电计划制定方法[J].电力系统及其自动化学报,2013,25(2):136-142.

WANG Yi, GONG Yuan, WANG Cheng, et al. Medium and long-term power purchase plan based on bargaining game[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(2): 136-142.

[15] 丁明,石雪梅.基于遗传算法的电力市场环境电源规划的研究[J].中国电机工程学报,2006,26(21):43-49.

DING Ming, SHI Xuemei. Study of generation expansion planning based on genetic algorithms in the environment of electricity market [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 43-49.

[16] 袁铁江,蒋平,孙谊嫔,等.风储一体化电站容量双层优化规划研究[J].高电压技术,2015,41(10):3204-3212.

YUAN Tiejiang, JIANG Ping, SUN Yiqian, et al. Research on bi-level capacity programming optimization for the integration of wind farm energy storage power station[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3204-3212.

[17] 于建平,杜纲.一类双层规划问题的遗传算法求解[J].重庆理工大学学报(自然科学版),2014,28(4):93-98.

YU Jianping, DU Gang. Genetic algorithm for solving a class of bi-level programming problems[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2014, 28(4): 93-98.

[18] 熊宇,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):34-37.

XIONG Ning, CHENG Haozhong, MA Zeliang, et al. The determination of substitute degree between generation cost and loading margin based on NBI method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 34-37.

张 恒(1989—),男,硕士研究生,主要研究方向:新能源发电及其并网技术、新能源电源规划。E-mail: 25287748@qq.com

袁铁江(1975—),男,通信作者,博士,教授,主要研究方向:新能源发电及其并网技术、风电-氢储能与煤化工多能耦合技术、新能源电源规划。E-mail: xjuytj@163.com

车 勇(1965—),男,高级工程师,主要研究方向:电力系统及其自动化。E-mail: cheyong001@163.com

(编辑 蔡静雯)

(下转第 132 页 continued on page 132)

Power Supply Planning for Wind-Photovoltaic-Thermal Bundled Transmission Considering Both Power Penetration and Risk of New Energy

ZHANG Heng¹, YUAN Tiejia^{2,1}, CHE Yong³, CAI Gaolei⁴, MA Wancheng¹, LIU Zhaoting¹

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830008, China;

2. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3. State Grid Xinjiang Electric Power Co. Ltd., Urumqi 830000, China;

4. Shanghai Electric Power Co. Ltd., Shanghai 200010, China)

Abstract: With the development of ultra-high voltage direct current (UHVDC) transmission, the scientific power supply planning for wind-photovoltaic-thermal bundled transmission is the premise of full realization of reliability and economic efficiency of the transmission project. This paper develops a multi-objective optimal allocation model considering both the penetration power limit of new energy and the anti-peak-shaving risk and large fluctuation risk of new energy output, to ensure the safe operation of the transmission project. In order to solve the optimization goal contradictory, the weight coefficient method is adopted to transform the developed multi-objective optimization problem into a single-objective optimization problem. The weight coefficients are determined by introducing the game theory, which can make up for the disadvantage of strong subjectivity of weight coefficient method. And the nested genetic algorithm (GA) is designed for solving the model. The example of power system planning in a certain area has verified the effectiveness of the proposed multi-objective optimization method, and the results show that the proposed programming model can take both the new energy penetration power limit and new energy output risk into account.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2017YFB0903500), National Natural Science Foundation of China (No. 51577163) and State Grid Corporation of China (No. 5230HQ16016U).

Key words: power planning; game theory; penetration power limit; output risk