

高比例可再生能源的多点容量规划方法

赵书强,索 璋,马燕峰

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,河北 保定 071003)

摘要:针对多能源多点布局规划问题,综合分析由风力发电、光伏发电、水力发电和传统火电组成的多能源电力系统的技术经济特性,提出一种基于复杂适应系统理论的电源规划模型。该模型以各个电源节点为主体,通过经验的积累不断变化其行为规则,调整各种类型电源的装机容量以适应环境,并求得各个节点下各类电源容量的最优配置方案。同时提出了一种基于简单规则涌现出复杂现象的主体建模方法,揭示了复杂适应系统理论的核心思想:适应性造就复杂性。通过对某地区实际电网的分析,验证了所提方法对于提高新能源的消纳有显著效果,并且基于该地区目前电源容量布局及未来的网架结构给出了未来电源优化配置方案,对实际的工程建设有一定的指导意义。

关键词:多能源电力系统;复杂适应系统;主体建模;源网协调;电源规划

中图分类号:TM 715

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202005007

0 引言

电源规划是电力系统规划的重要组成部分,其主要任务是依据负荷预测,并且在考虑各类电源之间相互协调的基础上,寻求满足规划区域内的多目标电源建设方案^[1]。近年来,可再生能源得到了越来越广泛的关注,发电装机容量保持快速增长^[2-3],而电力行业低碳化是应对全球气候变暖、实现我国社会经济可持续发展的关键,采用合理有效的电源规划方案将是保证电力系统在安全稳定运行前提下实现高效碳减排的有力手段^[4-5],这也对电源规划提出了新的要求。

同时,高比例可再生能源接入将是未来电网发展的重要方向之一。为此,国内外学者对新能源电源的规划已有较多研究。文献[1]将可再生资源纳入电源规划,对电力系统可靠性、经济性、长期运行等方面的协调规划进行了研究。文献[6]在综合分析由风力发电、光伏发电和储能电池组成的混合电力系统技术经济特性的基础上,提出一种基于博弈论的混合电力系统规划模型。以上研究虽然从单一电源种类规划过渡到多电源种类的全面综合规划,推进了电力系统的可持续化发展,但是并没有考虑电网网架结构的约束,只是求得电源的最佳容量。事实上,可再生能源的接入对系统的调频、调峰能力提出了更高的要求,这种仅从电源单方面进行考虑的规划方法本身存在着局限性。

为确保电力系统在未来的安全、可靠、经济和高效率运行,有必要考虑电源和电网规划方案的相互作用和影响,从而进行协同规划。近年来我国在清洁能源基地大规模建设与发展的过程中,配套网架规划和建设相对脱节和滞后,局部地区弃风、弃光、弃水限电问题严重^[7],进一步凸显了电源规划和电网规划协同的紧迫性^[8]。在源网协同规划方面,已有研究进行了初步探索。文献[9]提出了电源电网协调规划模型,着重考虑了调节型电源的装机规划与输电线路选址问题。文献[10]考虑了含大规模风电的电网规划的特点,从可靠性均衡角度提出一种利用虚拟机组进行源网协调规划的方法。文献[11]通过限制线路容量修正电源规划方案以寻求电源与电网规划的协调。

目前电力系统的源网协调规划大多基于集中建模的思想,即以全局的经济性、可靠性等特性为目标建立优化模型。而对于多能源电力系统,多种电源的容量布局配置与自然资源分布情况、断面约束情况相关。基于此,本文基于复杂适应系统CAS(Complex Adaptive System)理论,在分析新能源时空出力特性的基础之上,建立以独立电源节点为主体的规划模型,并以我国某地区实际电力系统为算例对本文所提模型的有效性进行验证。

1 适应性主体建模

复杂适应系统是指2个以上按照一定规则或模式进行相互作用的行为主体所组成的复杂动态系统^[12],其具有以下的特点。

(1)复杂适应系统强调主体的主动性,即主体有各自的规则及目标收益等属性,由于属性不同,在相同的环境下不同的主体可能表现出不同的行为方式^[13]。

收稿日期:2019-09-12;修回日期:2020-03-08

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0902200);国家电网公司科技项目(5228001700CW)

Project supported by the National Key R&D Program of China(2017YFB0902200) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5228001700CW)

(2)适应性主体能够与环境随机进行交互作用,自动调整自身状态以适应环境,争取生存和延续自身利益的最大化。主体在面临损失时会考虑调整方向、改变策略以避免发生损失。这种主动性及其与环境的反复、相互作用,造就了系统的复杂性,这是系统发展和进化的基本动力。

(3)复杂适应系统存在涌现现象。主体通过感应器从外部环境获取信息,从行为规则库中选出所对应的规则,并与目标效益进行比较,以获得最大收益为目标,通过效应器改变自身行为,并反馈到外部环境中。涌现是在微观主体的规则和规律进化的基础上,宏观系统在性能和结构上的突变。这个突变产生各部分或部分简单相加所不具备的特性即“整体大于部分之和”,称其为涌现^[14]。虽然组成系统的主体及其属性往往是简单的,但是由于主体具备适应和学习的能力,所引起的涌现现象却是综合的。由此可看出涌现现象是在没有一个中心执行者进行控制的情况发生的,其本质就是由小生大,由简入繁^[15]。

多能源的多点布局就是要解决何种电源在系统中哪一节点装配多少容量的问题。由于系统中各个节点的自然资源分布、电网中的位置、潮流分布情况等不尽相同,每个节点都具有只属于自己的“外界环境”,即可通过调整每个节点的容量配置使资源的利用效率最大,并且在与“环境”的反复、相互作用的过程中,使各个节点的电源容量配置达到稳定状态,最终使得电力系统实现高效稳定运行,即实现涌现现象。这与将复杂适应系统理论思想引入到电力系统中,应用于解决多能源的多点布局问题非常切合。

本文将每个系统节点视为具有独立行为决策能力的适应性主体,其他节点主体构成的系统为其外界环境。各节点主体通过相连线路从外界环境获取调峰调频、断面约束等信息,相连线路即为感应器。节点主体以目标效益函数最大的方向建立并修改自身行为规则,调整电源容量,达到对风电、光伏、水电、火电多种类型电源优化布局的目的。适应性节点主体的行为机理如图1所示。

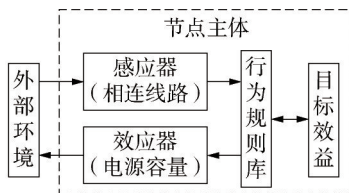


图1 适应性节点主体行为机理图

Fig.1 Subject behavior mechanism diagram of adaptive nodes

1.1 电源节点主体的目标效益函数

1.1.1 电源出力模型

风机的输出功率与风速有密切的关系,风速一

般遵循Weibull分布,其概率密度函数 $f(v)$ 表示为:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

其中, v 为实时风速; k 、 c 分别为形状参数和尺度参数。风机的输出功率 P_w 与风速 v 的关系如式(2)所示^[16]。

$$P_w = \begin{cases} 0 & v \leq v_{ci}, v > v_{co} \\ \frac{v - v_{ci}}{v_N - v_{ci}} P_{w,N} & v_{ci} < v \leq v_N \\ P_{w,N} & v_N < v \leq v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $P_{w,N}$ 为风机的额定功率; v_{ci} 、 v_{co} 、 v_N 分别为风机的切入风速、切出风速和额定风速。

光伏的输出功率 P_{PV} 与光照强度 γ 的关系如下^[16]:

$$P_{PV} = \begin{cases} P_{PV,N} & \gamma > \gamma_N \\ P_{PV,N} \frac{\gamma}{\gamma_N} & \gamma \leq \gamma_N \end{cases} \quad (3)$$

其中, $P_{PV,N}$ 、 γ_N 分别为光伏额定功率和额定光照强度。

水电输出功率 P_{hyd} 满足约束如下:

$$\begin{cases} P_{hyd,min} \leq P_{hyd} \leq P_{hyd,max} \\ P_{hyd,down} \leq P_{hyd,downmax} \\ P_{hyd,up} \leq P_{hyd,upmax} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $P_{hyd,min}$ 、 $P_{hyd,max}$ 分别为水电厂的最小、最大输出功率; $P_{hyd,up}$ 、 $P_{hyd,down}$ 分别为水电厂的爬坡、下坡功率; $P_{hyd,upmax}$ 、 $P_{hyd,downmax}$ 分别为水电厂的最大爬坡、最大下坡功率。

火电输出功率 P_{the} 满足约束如下:

$$\begin{cases} P_{the,min} \leq P_{the} \leq P_{the,max} \\ P_{the,down} \leq P_{the,downmax} \\ P_{the,up} \leq P_{the,upmax} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $P_{the,min}$ 、 $P_{the,max}$ 分别为火电厂的最小、最大输出功率; $P_{the,up}$ 、 $P_{the,down}$ 分别为火电厂的爬坡、下坡功率; $P_{the,upmax}$ 、 $P_{the,downmax}$ 分别为火电厂的最大爬坡、最大下坡功率。

1.1.2 时序性多场景模型

计及时序特性和季节性差异,选取一年中多个典型日,将每个典型日分为24个时段,建立节点主体出力时序性多场景模型。主体的等效日出力为:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i \eta_i \quad (6)$$

其中, n 为典型日总个数; P_i 为第 i 个典型日的出力,且 $P_i = P_{w,i} + P_{PV,i} + P_{hyd,i} + P_{the,i}$, $P_{w,i}$ 、 $P_{PV,i}$ 、 $P_{hyd,i}$ 、 $P_{the,i}$ 分别为第 i 个典型日的风电、光伏、水电及火电出力; η_i 为第 i 个典型日出现的概率。

1.1.3 目标效益函数

目标效益函数为日综合收益 C 最大,包括售电

收入 C_S 、设备回收收入 C_D 、投资费用 C_V 和运维费用 C_M ，具体如下：

$$C = \max(C_S + C_D - C_V - C_M) \quad (7)$$

(1) 售电收入 C_S 。

$$C_S = (1 + \alpha - \beta)RP \quad (8)$$

其中, R 为电价; α 为政策补贴系数; β 为环境污染系数。

(2) 设备回收收入 $C_D^{[17]}$ 。

$$C_D = C_{w,D} + C_{PV,D} + C_{hyd,D} + C_{the,D} \quad (9)$$

以风电为例, 其回收收入为:

$$C_{w,D} = \frac{G_w D_w r}{(1+r)^{L_w} - 1} \quad (10)$$

其中, G_w 为风电的装机容量; D_w 为风电的单位容量回收收入; L_w 为风电的使用寿命; r 为贴现率。

(3) 投资费用 $C_V^{[17]}$ 。

$$C_V = C_{w,V} + C_{PV,V} + C_{hyd,V} + C_{the,V} \quad (11)$$

以风电为例, 其风电投资费用为:

$$C_{w,V} = \frac{G_w V_w r (1+r)^{L_w}}{(1+r)^{L_w} - 1} \quad (12)$$

其中, V_w 为风电的单位容量投资费用。

(4) 运维费用 $C_M^{[17]}$ 。

$$C_M = C_{w,M} + C_{PV,M} + C_{hyd,M} + C_{the,M} \quad (13)$$

以风电为例, 其运维费用为:

$$C_{w,M} = G_w M_w \quad (14)$$

其中, M_w 为风电的单位容量运维费用。

1.2 电源节点主体的约束条件

(1) 潮流约束。

为简化规划过程中的计算量, 采用直流潮流计算方法:

$$P = B'\theta \quad (15)$$

其中, P 为节点注入有功功率列向量; B' 的构成与采用 PQ 解耦法有功迭代方程的系数矩阵相同; θ 为节点电压相角列向量。

(2) 爬坡约束。

$$\Delta P_{i,up}^t \leq P_{i,the,maxup}^t + P_{i,hyd,maxup}^t \quad (16)$$

其中, $\Delta P_{i,up}^t$ 为节点 i 在时刻 t 的爬坡功率; $P_{i,the,maxup}^t$ 、 $P_{i,hyd,maxup}^t$ 分别为节点 i 在时刻 t 的火电、水电最大爬坡功率。

(3) 下坡约束。

$$\Delta P_{i,down}^t \leq P_{i,the,maxdown}^t + P_{i,hyd,maxdown}^t \quad (17)$$

其中, $\Delta P_{i,down}^t$ 为节点 i 在时刻 t 的下坡功率; $P_{i,the,maxdown}^t$ 、 $P_{i,hyd,maxdown}^t$ 分别为节点 i 在时刻 t 的火电、水电最大下坡功率。

(4) 装机容量约束。

$$\begin{cases} 0 \leq G_{i,w} \leq G_{i,w,max} \\ 0 \leq G_{i,PV} \leq G_{i,PV,max} \\ 0 \leq G_{i,hyd} \leq G_{i,hyd,max} \\ 0 \leq G_{i,the} \leq G_{i,the,max} \end{cases} \quad (18)$$

其中, $G_{i,w}$ 、 $G_{i,PV}$ 、 $G_{i,hyd}$ 、 $G_{i,the}$ 分别为节点 i 的风电、光伏、水电、火电的装机容量; $G_{i,w,max}$ 、 $G_{i,PV,max}$ 、 $G_{i,hyd,max}$ 、 $G_{i,the,max}$ 分别为节点 i 的风电、光伏、水电、火电的最大装机容量。

(5) 断面约束。

$$\sum_{l=1}^n P_{i,l} \leq P_{i,section,max} \quad (19)$$

其中, $P_{i,l}$ 为节点 i 断面中线路 l 传输功率; $P_{i,section,max}$ 为节点 i 断面最大传输功率。

(6) 负荷波动约束。

$$\Delta P_{up}^{t+1} \leq P_{the,maxup}^{t+1} + P_{hyd,maxup}^{t+1} \quad (20)$$

其中, ΔP_{up}^{t+1} 为 $t+1$ 时刻系统总爬坡功率需求; $P_{the,maxup}^{t+1}$ 、 $P_{hyd,maxup}^{t+1}$ 分别为 $t+1$ 时刻系统中火电、水电的最大爬坡功率。若不满足式 (20), 则应在时刻 t 提前弃风、弃光。

$$\Delta P_{down}^{t+1} > P_{the,maxdown}^{t+1} + P_{hyd,maxdown}^{t+1} \quad (21)$$

其中, ΔP_{down}^{t+1} 为 $t+1$ 时刻系统总下坡功率需求; $P_{the,maxdown}^{t+1}$ 、 $P_{hyd,maxdown}^{t+1}$ 分别为 $t+1$ 时刻系统中火电、水电的最大下坡功率。若不满足式 (21), 则应在时刻 t 提前增加火电和水电出力。

1.3 电源节点主体的行为规则

适应性主体的每一条行为规则均由以下 3 个要素组成: 环境影响因素 E 、反应集合 S 以及执行概率 δ 。规则结构示意图如图 2 所示。图中, 影响因素为主体从外界环境可能接收到的信息集合; 反应集合为主体依据获取的外部信息对自身属性的调整; 执行概率为主体获取了相应信息, 采取对应行为措施的概率, 其直接反映了该规则的信用强度。

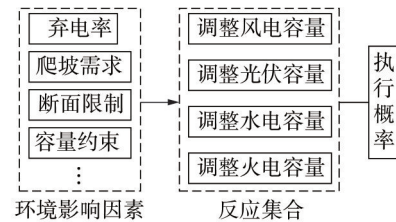


图2 规则结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of rule structure

对于电源节点主体而言, 其各种类型电源的装机容量不仅受到自然环境条件的制约, 而且与节点所处电网中的位置相关, 由此可知影响因素应包括风光资源、最大容量限制、调峰需求、断面约束等。电源节点针对获取到的环境因素实时地对该节点各类型电源的装机容量进行调整。规则的执行概率由信用分派产生, 若主体遵循该条规则对电源容量结构进行调整后, 使得目标效益函数降低, 则该条规则

的选择概率也会随之降低。当电源节点主体下一次检测到同一环境时,会有较大的概率选择其他的调整方案,反之亦然。由此可以看出,在信用分派的机制下,通过改变各条规则的选择概率使得电源节点的适应性逐渐增强,同时也具备了自我调整以及自我学习能力,使该节点电源结构得到优化,并且该节点的容量配置也会影响到其他电源节点容量分配。随着各个电源节点主体与环境及其他主体间的交互作用,使得整个系统呈现出高效稳定的运行状态。

2 基于复杂适应系统理论的模型求解

依据复杂适应系统理论,将电源节点视为由规则描述的、相互间作用的主体。主体随着经验的积累,依靠不断变化其规则来适应环境,最终达到动态平衡,采用以下步骤对模型进行求解。

(1)对环境影响因素 E 编码:形如 $E=[e_1, e_2, \dots, e_i, \dots]$ 的列向量,维数为环境影响因素的数量和,其中 e_i 为第 i 个环境影响因素的整数编码。本文中影响因素为弃风量、弃光量、爬坡限制、下坡限制、断面约束、最大容量约束,对越限程度进行划分,进行编码处理。越限程度越高,编码数值越大,以弃电量为例,无弃电量编码为0,弃电量占比0~5%编码为1,弃电量占比5%~10%编码为2,依此类推。

(2)对反应集合 S 进行编码:形如 $S=[s_1, s_2, \dots, s_i, \dots]$ 的列向量,维数为可控因素的数量和,其中 s_i 为第 i 个可控因素的整数编码。本文中可控因素为风电容量、光伏容量、水电容量、火电容量。编码对应规则为:等于1时表示增加容量;等于-1时表示减少容量;等于0时表示容量不变。

(3)构建行为规则集 R 。

针对上述环境影响因素以及反映集合的设定情况,执行规则的某实例如表1所示。

依据表1所示的规则实例,可得出规则集的一般数学表达式如下:

$$\left\{ \begin{aligned} R &= \bigcup_{k=1}^n R_k = \bigcup_{k=1}^n \mathbf{E}_k \\ \{S_{1k}, \delta_{1k}, S_{2k}, \delta_{2k}, \dots, S_{mk}, \delta_{mk}\} &= \bigcup_{k=1}^n \left\langle \mathbf{E}_k, \prod_{j=1}^m (S_{jk}, \delta_{jk}) \right\rangle \end{aligned} \right. \quad (22)$$

表1 行为规则集合实例

Table 1 Example of behavior rule set

规则集	环境影响因素						反应集合				执行 概率 / %
	弃风量	弃光量	爬坡限制	下坡限制	断面约束	最大容量约束	风电容量	光伏容量	水电容量	火电容量	
规则 1	4	1	0	0	1	0	1	1	0	-1	0.4
							-1	0	1	0	32
							-1	-1	0	0	56
规则 2				...					...		...
											...
											...
规则 n				...					...		...

其中, $\mathbf{E}_k$ 为第 k 条规则 R_k 从外界获取的环境信息; $\mathbf{S}_{jk}$ 为以执行概率 δ_{jk} 采取的行为措施, 对可控因素进行适应性调整, 即对电源容量进行相应修改。其中 δ_{jk} 的初始值为 $1/m$, 且始终满足 $\sum_{j=1}^m \delta_{jk} = 1$ 。

(4)修改行为规则。若主体从外界环境获取的信息为 E_k ,以概率 δ_{jk} 选取 S_{jk} 为所对应的行为措施。如果主体的目标效益函数值增加,则提高 δ_{jk} 的值,反之则降低 δ_{jk} 的值,用以表示主体的经验积累以及适应性提高的过程。依据目标函数值的变化情况,改变每条行为规则的执行概率的过程,即为信用分派机制。

(5)若所有主体的目标效益函数值均收敛,则得到问题的最终解决方案,输出结果;反之返回步骤(3)继续进行迭代计算。流程图详见附录A图A1。

3 算例分析

以某地区 2017 年实际电力系统为例进行电源布局优化仿真。系统结构如图 3 所示。节点类型详见附录 B 表 B1, 系统实际运行时的功率受限断面详见附录 B 表 B2, 且选取了夏季和冬季中的 2 个典型日对系统进行模拟, 典型日的电力需求详见附录 B 表 B3。规划前电源布局情况如表 2 所示, 系统的基准电压为 330 kV, 基准功率为 100 MV·A, 单位电价为 0.078 万元 / MW, 贴现率为 0.12, 其他经济技术参数详见附录 B 表 B4^[17]。

在对电源重新布局的过程中,各类电源总装机

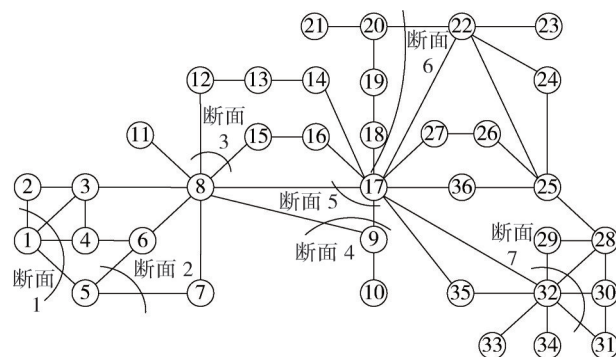


图3 电力系统网架示意图

Fig.3 Schematic diagram of power system grid

源多点最优布局的目的。

在同一负荷水平下对电源容量进行规划并且对各类电源容量的具体分布情况进行布局,可见各类电源的总容量基本保持不变,但是各类电源的具体分布情况发生了明显改变,具体如表 4 所示。

表 4 考虑断面约束的电源布局

Table 4 Power layout considering section constraints

电源节点	装机容量 / MW			
	风电	光伏	水电	火电
1	1355	3407	923	467
4	245	231	0	171
5	0	742	2019	0
10	133.5	2626	354.3	0
11	0	0	27	1400
18	0	788.4	29	670
20	0	0	497.2	996
21	0	0	0	762
25	0	78	18	0
29	0	419	531.2	0
30	0	0	242.1	0
33	0	0	2998	0
35	0	0	3551	0
36	0	0	1488	0
总容量	1733.5	8291.4	12677.8	4466

对重新规划前后的电源布局情况进行 100 次时序多场景的出力模拟,新能源消纳的情况如附录 A 图 A2 和表 5 所示。

表 5 消纳新能源电量对比

Table 5 Comparison of renewable energy consumption

指标	数值	
	规划前	规划后
风电平均消纳量 / (MW·h)	11 128.6	10 489.8
风电平均弃电率 / %	3.577	3.331
光伏平均消纳量 / (MW·h)	42 465.6	45 680.8
光伏平均弃电率 / %	7.261	7.049
新能源平均消纳量 / (MW·h)	53 594.2	56 170.6
新能源平均弃电率 / %	6.519	6.377

通过调整各节点电源类型及配置容量实现风电、光伏、水电、火电多种类型电源的最优布局。在对电源重新布局规划之后,断面受限节点的新能源装机容量减少,新能源消纳量提高了 4.8 %。由以上结果可以看出,采用本文方法对电源重新进行布局后,新能源的消纳量有了显著增加,减少了弃风、弃光现象,验证了本文所提方法的有效性。

基于以上分析,以目前该地区电源的分布情况为基础,给出 2020 年电源规划的合理方案。预计 2020 年该地区负荷增长率为 30 %,网架结构如图 7 所示,其中节点 37、38 为中间节点,节点 39 为负荷节点。各电源节点装机情况如表 6 所示。

对规划后的 2020 年电源布局方案进行 100 次时序性多场景的出力模拟,典型场景出力曲线如图 8 所示,新能源消纳的情况如表 7 所示。

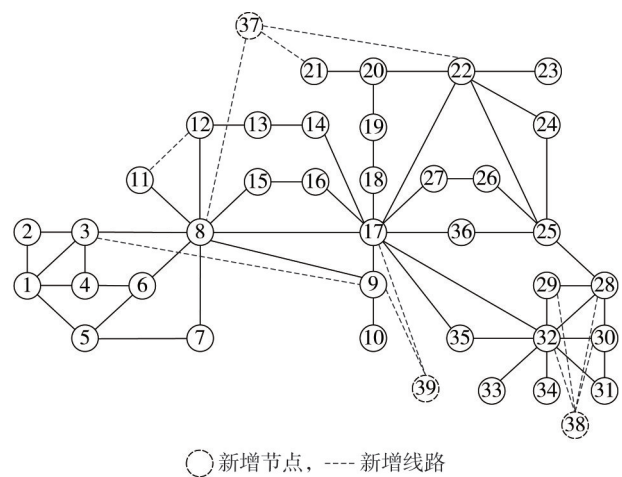


图 7 2020 年网架结构示意图

Fig.7 Schematic diagram of grid structure in 2020

表 6 2020 年电源布局规划

Table 6 Power supply distribution planning in 2020

电源节点	装机容量 / MW			
	风电	光伏	水电	火电
1	1472	4186	716	1115
4	50	1167	0	170
5	0	870	1296	0
10	493.5	2480	282.3	0
11	0	0	432	1423
18	0	266.4	160	1807
20	0	0	918.2	821
21	0	0	0	792
25	0	221	561.7	0
29	0	218	605.2	0
30	0	0	194.1	0
33	0	0	3254	0
35	0	0	3500	0
36	0	0	1866	0
总容量	2015.5	9408.4	13785.5	6128

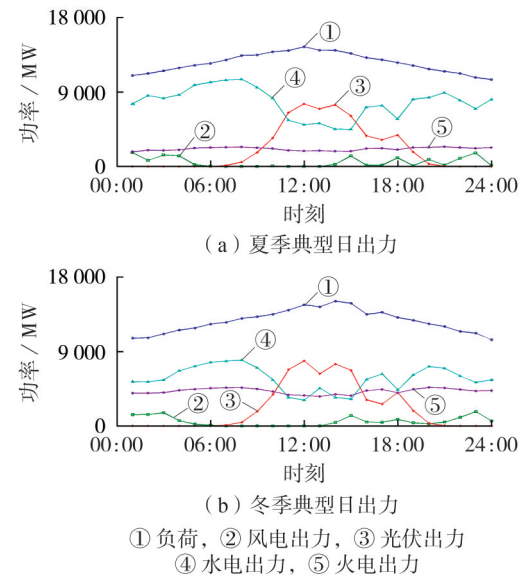


图 8 2020 年典型日出力曲线

Fig.8 Typical output curves in 2020

表7 2020年新能源消纳的情况
Table 7 Situation of renewable energy
consumption in 2020

指标	数值
风电平均消纳量/(MW·h)	12049.38950
光伏平均消纳量/(MW·h)	51982.00029
新能源平均消纳量/(MW·h)	64031.38979

从以上结果可以看出:由于负荷需求增大,各类电源容量均有所增加,且由于该地区的负荷特性与光伏电源的出力特性相一致,导致光伏电源容量增加较多;因为系统中新能源装机容量增加,所以对调峰容量的需求增大,常规电源容量也显著增加;新能源消纳量有了明显增加,相比于2017年,风电消纳量增长了8.3%,光伏消纳量增长了22.4%,新能源总消纳量增长了19.5%;因为夏季水量较为丰富,水电出力较大,而冬季由于该地区的采暖需求并且水量较为匮乏,所以火电出力较大,这也符合该地区的实际情况。

4 结语

复杂适应系统理论试图通过对系统中主体间的交互进行建模与仿真,将主体微观行为和系统宏观涌现现象进行有机的结合,使得主体的变化成为整个系统变化的基础,是一种自顶向下分析、自底向上综合的建模方式。

本文应用复杂适应系统理论所建立的电源规划模型,充分考虑了不同电源节点的地理因素、自然环境因素及电网的拓扑结构,给出了多类型电源容量布局配置的优化方案。通过对比分析可知,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。以电源节点为主体对象,以各类电源容量为控制因子所建立的电源规划模型,虽然其并没有将新能源消纳量作为目标函数,但是各个电源节点主体通过自身行为经验不断适应周围环境所建立的简单行为规则,以目标效益最大为目标进行演化,最终使系统整体涌现出新能源消纳量大幅提升的复杂现象。这充分印证了“适应性造就复杂性”的复杂适应系统的理论思想。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 马艺玮,杨苹,郭红霞,等. 风-光-沼可再生能源分布式发电系统电源规划[J]. 电网技术,2012,36(9):9-14.
MA Yiwei, YANG Ping, GUO Hongxia, et al. Wind-solar-marsh renewable energy distributed generation system power planning[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 9-14.
- [2] 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. Wind-light-water-gas-

fire-storage joint optimal dispatch based on chance-constrained goal programming[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 214-223.

- [3] 张沈习,程浩忠,邢海军,等. 配电网中考虑不确定性的分布式电源规划研究综述[J]. 电力自动化设备,2016,36(8):1-9.
ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, XING Haijun, et al. Review of distributed generation planning considering uncertainty in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(8): 1-9.
- [4] 王丹,孟政吉,贾宏杰,等. 基于配置-运行协同优化的分布式能源站选型与定容规划[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):152-160.
WANG Dan, MENG Zhengji, JIA Hongjie, et al. Distributed energy station selection and capacity planning based on configuration-operation cooperative optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 152-160.
- [5] 娄素华,卢斯煜,吴耀武,等. 低碳电力系统规划与运行优化研究综述[J]. 电网技术,2013,37(6):1483-1490.
LOU Suhua, LU Siyu, WU Yaowu, et al. Summary of low carbon power system planning and operation optimization[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1483-1490.
- [6] 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. Game theory planning model and analysis of wind-light-storage hybrid power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 13-19.
- [7] 郭永明,刘观起. 计及弃风成本的含抽水蓄能电力系统随机优化调度[J]. 电力建设,2016,37(4):29-34.
GUO Yongming, LIU Guanqi. Stochastic optimal dispatch of pumped storage power system with abandoned wind cost[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(4): 29-34.
- [8] 李婷,叶希,唐权,等. 基于交替方向乘子法的源网协同多适应规划[J]. 电力建设,2017,38(11):105-112.
LI Ting, YE Xi, TANG Quan, et al. Source network collaborative multi-adaptive planning based on alternating direction multiplier method[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(11): 105-112.
- [9] 高赐威,何叶,胡荣. 考虑大规模风电接入的电力规划研究[J]. 电网与清洁能源,2011,27(10):53-59.
GAO Ciwei, HE Ye, HU Rong. Power planning research considering large-scale wind power access[J]. Power Grid and Clean Energy, 2011, 27(10): 53-59.
- [10] 穆永铮,鲁宗相,周勤勇,等. 基于可靠性均衡优化的含风电电网协调规划[J]. 电网技术,2015,39(1):16-22.
MU Yongzheng, LU Zongxiang, ZHOU Qinyong, et al. Coordination planning of wind power grid based on reliability equilibrium optimization[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 16-22.
- [11] GU Y, MCCALLEY J D, NI M. Coordinating large-scale wind integration and transmission planning[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(4): 652-659.
- [12] 约翰·H·霍兰. 隐秩序适应性造就复杂性[M]. 上海:上海世纪出版集团,2011:40-133.
- [13] 黄何,梁大鹏. 基于复杂适应理论的电力系统生产模拟[J]. 电子技术应用,2018,44(5):16-20.
HUANG He, LIANG Dapeng. Power system production simulation based on complex adaptive theory[J]. Application of Electronic Technique, 2018, 44(5): 16-20.
- [14] 李冬. 复杂适应系统视角下碳交易特征及运作机制研究[J]. 南方金融,2018(3):61-70.

LI Dong. Research on carbon trading characteristics and operation mechanism from the perspective of complex adaptive system[J]. South China Finance, 2018(3):61-70.

[15] 约翰·H·霍兰. 涌现:从混沌到有序[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2006:26-78.

[16] 薛飞,石季英,袁大玲,等. 考虑配电网拓扑变化的广义电源规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(10):117-124.

XUE Fei, SHI Jiying, YUAN Daling, et al. Generalized power planning considering topology change of distribution network [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(10):117-124.

[17] 梅生伟. 工程博弈论基础及电力系统应用[M]. 北京:科学出版社, 2016:9.

作者简介:



赵书强

赵书强(1964—),男,河北景县人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事电力系统分析与控制、电力系统规划与可靠性等方面的教学与科研工作;

索 瑁(1994—),男,河北保定人,博士研究生,研究方向为电力系统分析与控制 (E-mail:suo_xun1030@163.com);

马燕峰(1978—),女,河北唐山人,副教授,博士,研究方向为电力系统分析、运行与控制。

(编辑 李玮)

Multi-point capacity planning method for high proportion of renewable energy

ZHAO Shuqiang, SUO Xun, MA Yanfeng

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Aiming at the problem of multi-energy and multi-point layout planning, the technical and economic characteristics of multi-energy power system composed of wind power, photovoltaic power, hydroelectric power and traditional thermal power are comprehensively analyzed, and a power planning model based on complex adaptive system theory is proposed. The model takes each power supply node as the main subject, changes its behavior rules constantly through experience accumulation, adjusts the installed capacity of various types of power supply to adapt to the environment, and obtains the optimal layout scheme of each node's various power supply capacity. In addition, a subject modeling method based on simple rules emerging complex phenomena is proposed, which reveals the core idea of complex adaptive system theory, that is, adaptability creates complexity. Through the analysis of the actual power grid in a certain area, it is verified that the proposed method has a significant effect on improving the consumption of new energy. Based on the current power capacity layout and future grid structure in this area, the future power optimal layout scheme is given, which has a certain guiding significance for the actual engineering construction.

Key words: multi-energy power system; complex adaptive system; subject modeling; source-grid coordination; generation planning

附录

附录 A

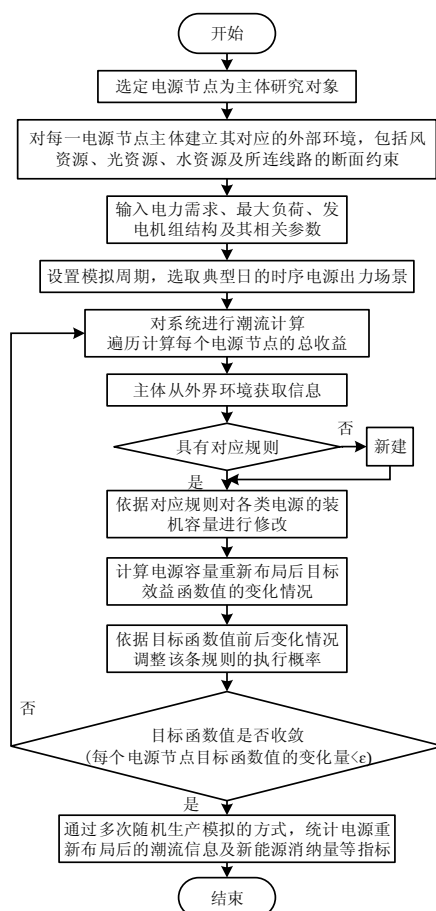
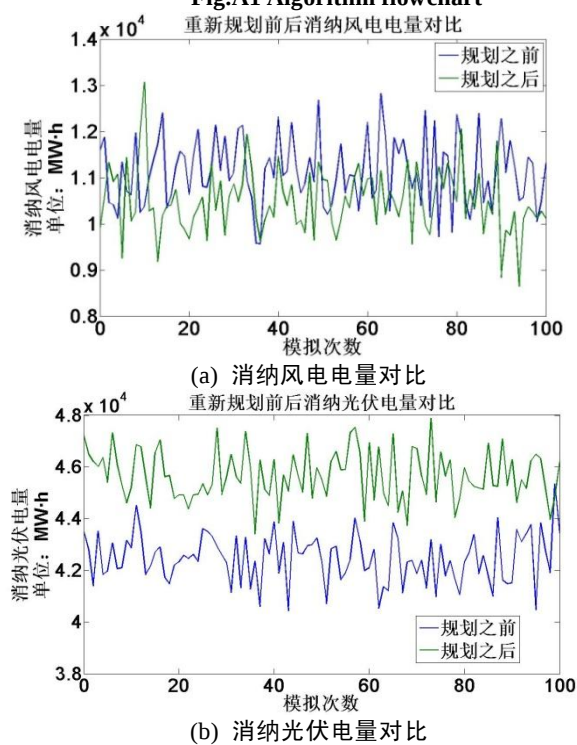
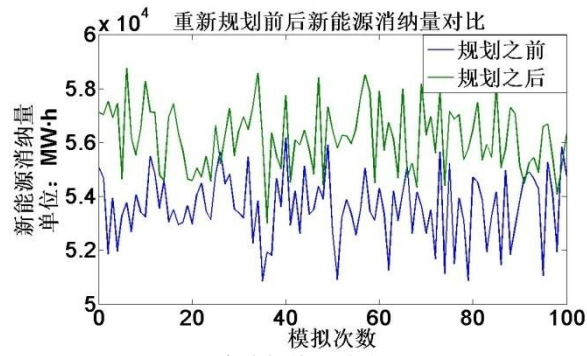


图 A1 算法流程图

Fig.A1 Algorithm flowchart





(c) 消纳新能源总电量对比

图 A2 新能源消纳量对比

Fig.A2 Comparison of new energy consumption

附录 B

表 B1 节点类型

Table B1 Node type

电源节点编号	中间节点编号	负荷节点编号	外电网节点编号
1	21	3	6 19 2
4	25	8	7 24 23
5	29	9	12 26 34
10	30	17	13 27
11	33	22	14 28
18	35	32	15 31
20	36		16

表 B2 典型日的电力需求

Table B2 Electricity demand on typical days

节点编号	夏季最大负荷/MW	冬季最大负荷/MW	节点编号	夏季最大负荷/MW	冬季最大负荷/MW
1	1572.2	1656.8	19	287.5	306.9
2	1260	1600	20	359.1	372.1
4	135.1	148.9	21	1600	1685
6	221.3	232.4	23	930	1500
7	308.1	320.5	24	452.2	479.8
10	198.8	200.7	25	277.5	296.4
11	133.4	141.1	26	369.4	382.9
12	287.3	302.7	27	164.2	177.4
13	184.7	193.9	28	299.1	319.1
14	985	1031.3	29	123.1	125.3
15	380.6	395.6	30	359.6	372.6
16	102.6	102.7	31	718.2	750.1
18	153.8	166.5	34	650	900

表 B3 断面划分

Table B3 Section division

断面	断面 1	断面 2	断面 3	断面 4	断面 5	断面 6	断面 7
包含线路	(1-2)	(1-3)	(5-6)	(8-12)	(8-9)	(8-17)	(17-18)
	(28-32)	(29-32)	(1-4)	(1-5)	(5-7)	(8-15)	(9-17)
限制功率/MW	2800	1500	2300	2400	5500	2000	1600

表 B4 经济技术参数

Table B4 Economic and technical parameters

技术经济参数	风电	光伏	水电	火电
单位容量建设成本/(万元 · MW ⁻¹)	500	1226.6	300	500
单位容量回收收入/(万元 · MW ⁻¹)	50	65	50	50
单位容量运行费用/(万元 · MW ⁻¹)	13	13	10	13
政策补贴系数	0.2	0.2	0	0
环保系数	0.5	0.5	0.3	-0.5
使用年限/a	20	20	50	30