

【特邀论坛】——智能电网

专家点评: 智能电网是当前国际上广泛受到关注的研究和发展领域,很多国家都针对智能电网制定了本国发展路线图,依据本国国情明确了未来智能电网的发展思路。尽管不同国家对智能电网的定义、发展侧重点、发展路径等有所不同,但解决大规模可再生能源以及分布式能源接入电网问题几乎是所有国家智能电网发展的重点所在。

在我国发展大规模可再生能源对于优化我国的能源结构,促进经济社会的协调可持续发展意义重大。当前,我国大规模风电发展迅速,但发展过程中也暴露出了一些亟待解决的问题,其中问题之一就是如何进行电源和电网的扩展规划,保证“网-源”协调规划的科学性,解决这一问题对提高电网接纳大规模集中式可再生能源发电能力意义重大。

智能电网发展面临的另一方面的挑战就是大量分布式电源在配电系统中的广泛接入。分布式电源容量小,位于负荷附近,能源类型多样,易于用户使用,可为用户带来一系列的好处。但大量分布式电源的接入,将使配电系统运行面临许多新问题,包括很多分布式电源的不可调度性等。为了提高配电系统接纳分布式电源的能力,微网技术应运而生。微网是指由分布式电源、储能装置、能量变换装置、相关负荷和临控、保护装置汇集而成的小型发电系统,是一个能够实现自我控制、保护和管理的自治系统,既可以与常规电网并网运行,也可以孤立运行。将分布式电源以微网的形式接入常规电网并网运行,与电网互为支撑,是发挥分布式电源效能的有效方式。考虑到微网技术还处于探索发展阶段,相关的保护问题、对配电系统可靠性的影响问题、相关的建模仿真分析等问题等都是当前的研究热点。

本期选登的几篇文章涉及含大规模风电的电力规划评估、多微网配电系统可靠性评价、微电网保护、分布式电源模型验证等几个方面,属智能电网研究关注的重点领域,相信对读者会有一定的参考价值。

天津大学 王成山

基于价值的含大规模风电电力规划评估

余贻鑫, 周金辉, 秦 超

(天津大学智能电网教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 从全社会成本视角出发,构建了含大规模风电的电力规划方案评估的总体框架。其中,为计及风电出力波动性的影响,针对给定的规划方案和全年时序的风电出力与负荷数据,通过内嵌机组组合优化模型、计及静态和动态安全约束的经济调度模型(动态安全域边界的超平面形式可使动态安全约束处理难的问题变得十分简易)及校正性控制模型,实现系统运行过程的模拟,从而可详细评估全年每小时的系统燃料、环境、网损成本以及系统可靠性成本。再结合电源的容量成本和电网成本,则可获得方案的全社会成本,实现规划方案的全社会成本评估。最后通过示例分析验证了方法的有效性。

关键词: 大规模风电; 全社会成本; 价值评估; 电力规划

中图分类号: TM715

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2011)11-0941-08

收稿日期: 2011-04-27; 修回日期: 2011-08-30.

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划重大资助项目(2008BAA13B01).

作者简介: 余贻鑫(1936—), 男, 中国工程院院士.

通讯作者: 余贻鑫, yixinyu@tju.edu.cn.

Value-Based Evaluation of Power System Planning Alternatives with Large-Scale Wind Power

YU Yi-xin, ZHOU Jin-hui, QIN Chao

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: From the perspective of the total social cost, the overall framework of evaluation of power system planning with large-scale wind farms was established. According to the annual chronological hourly data of wind power and load, for a given power system planning alternative, its system operation simulation was carried out, where the variability of wind power was considered. In the simulation process, daily-ahead(or week-ahead) unit commitment model, steady state and dynamic security constraints based economic dispatch model and remedial control model were included. It was emphasized that based on the hyper-plane description of the boundary of the practical dynamic security region(PDSR), the difficulty of dealing with stability constraints in the problem of solving for steady state and dynamic security constrained economic dispatch can be overcome easily. Hence the hourly fuel, environmental and network loss cost in the year for the given planning alternative could be calculated. These costs were to be combined with generation capacity cost, power network cost and system reliability cost, so that the total social cost of the alternative could be determined. Therefore the evaluation of the total social cost of an alternative was achieved. Finally, the proposed method was validated by means of the case studied.

Keywords: large-scale wind power; total social cost; value-based evaluation; power system planning

在我国发展大规模风电,对于调整能源结构、改善生态环境,进而促进经济社会的协调可持续发展意义重大^[1]. 欲使电网能充分接纳大规模风电,需要科学地进行电源和电网扩展规划(统称为电力规划). 文献[2]对含风电的若干规划方案进行了可靠性评估的工作,文献[3]建立了含风电的输电系统机会约束规划模型,给出在满足一定的过负荷概率下投资成本最低的规划方案. 文献[4-5]提出了价值评估方法,即通过内嵌安全约束经济调度模型可以获取系统每一时段(通常为 1 h)的整体成本,从而确定规划方案的经济价值,特别适合于含可再生能源电力规划的评估分析. 但是,其不足之处:没有考虑常规火电机组功率调节能力对风电接纳的制约;经济调度模型中仅计及了静态安全约束,没有考虑动态安全约束,没有考虑当系统运行状态不满足安全约束情况下的校正性控制. 基于上述分析,笔者提出了更完善的价值评估方法,从而实现规划方案的全社会成本评估.

一进行的. 需指出,该框架完全适用于含风能、太阳能等可再生能源电力规划的评估.

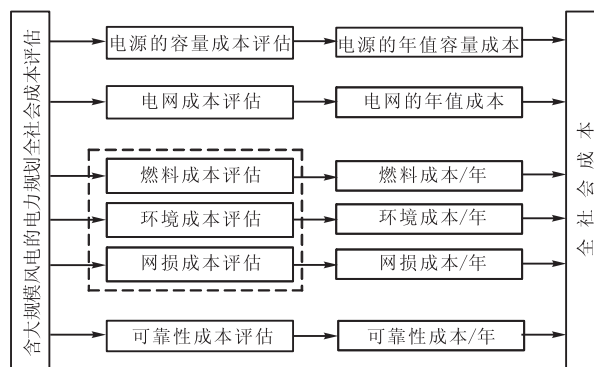


图 1 含大规模风电的电力规划评估框架

Fig.1 Framework of evaluation for power system planning with large-scale wind farms

1 含大规模风电的电力规划评估框架

评估框架如图 1 所示. 全社会成本评估包括: ①电源的容量成本评估; ②电网成本评估; ③燃料成本评估; ④环境成本评估; ⑤网损成本评估; ⑥可靠性成本评估, 以上各项评估输出的成本之和构成了全社会成本. 图中的虚线框表示③④⑤项成本评估是统

2 全社会成本评估

针对给定的含大规模风电的电源、电网扩展规划方案, 评估全社会成本的方法如下.

2.1 燃料、环境和网损成本评估

大规模风电接入对电力系统的影响体现在: ①常规火电机组必须具备充足的调节容量(正向和负向旋转备用)和足够快的调节速率, 以便平衡风电出力波动; ②扩展后的电网必须能够承受线路有功潮流和节点电压频繁的波动, 满足系统的静态和动态安全约束, 若无法满足, 则需要进行相应的校正性控制. 需

指出,这里的静态安全约束包括线路潮流约束和节点电压幅值约束,动态安全约束是指给定的预想事故发生后系统保持暂态稳定的约束,它可借助动态安全域边界的超平面形式将其变成节点注入功率的线性组合不等式约束,这样使该约束的计及变得十分简易^[6].

考虑到上述因素,本文在静态和动态安全约束经济调度模型的基础上,结合机组组合优化模型^[7]与校正性控制模型^[8],实现了系统运行过程的模拟,从而可保证评估的合理性和结果的可信度.

图2给出了研究的时间框架,对全年8760h逐时段的模拟系统的运行状况.图3给出了全社会成本评估的详细流程.具体步骤如下:根据规划水平年时序的风电出力及节点负荷数据,对于给定的电源和电网扩展规划方案,首先进行第1个调度周期(日或周)的机组组合优化获得该周期内每一时段的各机组的运行状态(启停)和发电出力.然后转入实时运行模拟,即基于每个时段进行交流潮流计算,并校验是否满足静态和动态安全约束,若满足则获得该时段系统的燃料耗量、网损电量、各项污染物的排放量,再将其转化为货币化的经济性指标并进行累积;反之,则需进行计及静态和动态安全约束的发电经济调度(若调度也失败,则需进行校正性控制)进而确定系统新的运行点,最后输出此时段的燃料成本、环境成本和网损成本并进行累积,重复进行上述过程直至该调度周期模拟结束.然后,再进行下一个调度周期的机组组合,重复以上过程直至全年模拟结束,最终集成出全年8760h的系统各项成本.

需指出的是:上述评估过程中连续的机组组合之间计及了机组的最小运行启停机时间的关联性约束;在风电的极端出力模式或系统无法满足其功率调节要求而出现机组组合无解的情况下,需要采取相应的控制措施使之有解(如弃风或削减负荷).

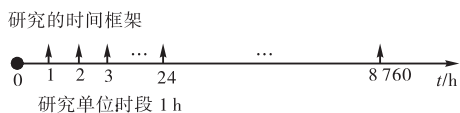


图2 研究的时间框架
Fig.2 Time framework for the study

环境成本是由环境对策成本和环境损失成本构成.环境对策成本指采取环境保护措施而付出的成本,包括安装脱硫、脱硝设备的投资成本及运行成本.而环境损失成本的评估是,在考虑应对环境污染措施的条件,根据该时段燃料污染物的排放量^[9],再结合其环境价值^[10],即可得到相应的环境损失成本.图3中对环境损失成本是按小时进行的,最终累

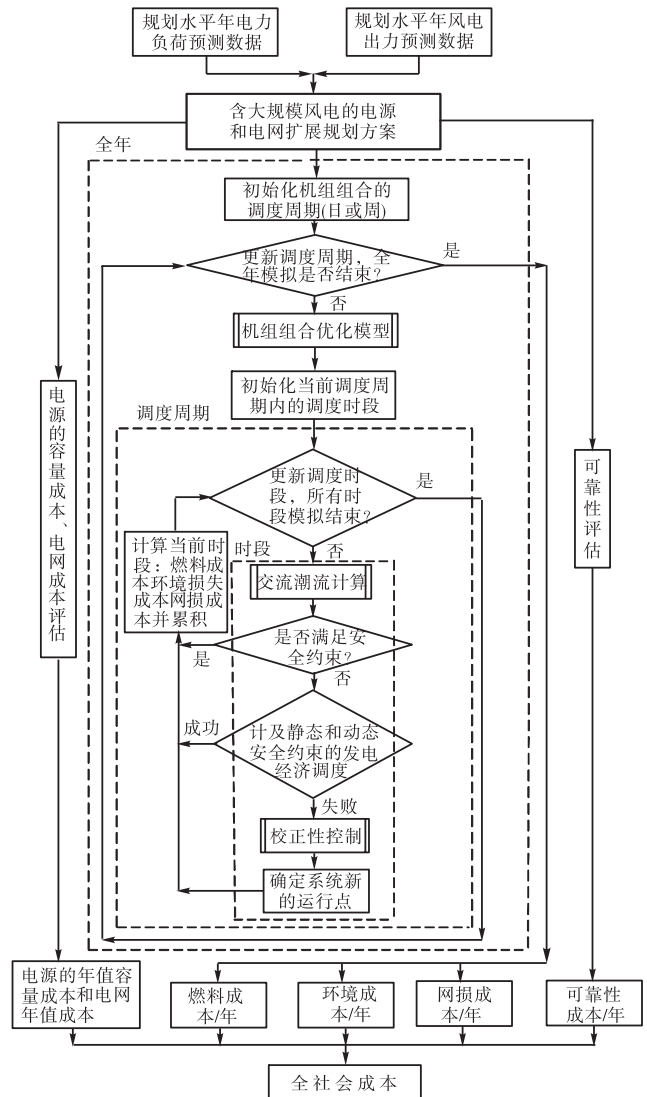


图3 全社会成本评估的流程
Fig.3 Flow chart of evaluation of total social cost

积获得全年8760h的相应成本.

2.2 电源的容量成本和电网成本评估

电源容量成本包括系统原有机组的折旧成本及其运行维护成本、新建机组的投资成本及其运行维护成本;电网成本包括系统原有线路和变电站的折旧成本及其运行维护成本、新建线路和变电站的投资成本及其运行维护成本,上述各成本均为年值形式.

2.3 可靠性成本评估

首先通过基于序贯蒙特卡罗仿真的含风电发输电系统可靠性评估^[11]获得期望缺供电量,然后利用单位停电的经济损失(即单位电量的可靠性成本或价值),将其转化为系统的可靠性成本(或风险成本).

3 算例分析

基于上述框架,利用MATLAB编制了整套评估

程序,并进行了算例分析.

示例系统如图 4 所示. 其中, Bus1、Bus2 表示风电场汇集升压站节点,总的装机容量分别为 2 000 MW 和 2 400 MW,分别经由线路 L1-3 和 L2-4 接入系统,这些风电通过 Bus6 外送,送出功率为 3 000 MW,为了使外送线路保持较高的利用率,这里假定线路外送功率为恒定值. 规划年时序的风电出力与负荷曲线采用文献[12]中的数据. 系统相关数据见表 1 和表 2.

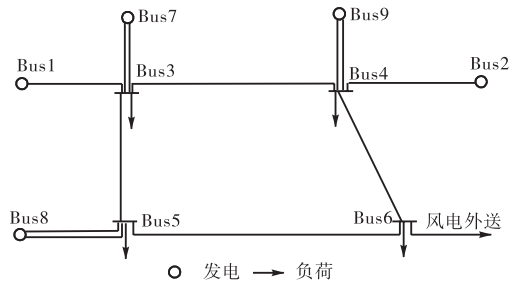


图 4 示例系统
Fig.4 Illustration example system

表 1 线路电气参数

Tab.1 Electrical parameters of transmission lines

始端节点编号	终端节点编号	单回电阻	单回电抗	单回电纳	潮流上限/MVA	线路长度/km	线路条数
1	3	0.000 80	0.011 2	1.025 00	2 371	100	1
3	4	0.001 75	0.025 2	2.306 25	2 371	225	1
3	5	0.001 20	0.016 8	1.537 50	2 371	150	1
2	4	0.001 00	0.014 0	1.281 25	2 371	125	1
4	6	0.001 60	0.022 4	2.050 00	2 371	200	1
5	6	0.001 95	0.028 0	2.562 50	2 371	250	1
3	7	0.000 60	0.008 4	0.768 75	2 371	75	2
4	9	0.000 60	0.008 4	0.768 75	2 371	75	2
5	8	0.000 80	0.011 2	1.025 00	2 371	100	2

注:电阻、电抗和电纳均为标么值,系统基准功率取为 100 MVA,基准电压为 500 kV.

表 3 给出了风电接入系统后的 5 个初始电力规划方案. 其中,方案 1、方案 2 与方案 3,具有不同的电源扩展规划方案和相同的电网扩展规划方案;而方案 1、方案 4 与方案 5 具有相同的电源扩展规划方案和不同的电网扩展规划方案. 由此可对上述方案进行不同层次的分析比较.

算例中机组、线路和风机的技术、经济及可靠性参数见表 4 和表 5. 考虑如下预想事故:线路 L1-3、L2-4 和 L5-8 首端发生三相短路故障,在 0.10 s 时切除故障线路. 5 个方案下每个预想事故对应的动态安全域边界超平面系数如表 6 所示. 标煤价格取为 700 元/t,天然气价格取为 2 元/m³,单位电量网损成本取为 0.25 元/(kW·h),单位电量中断的经济损失取为

表 2 发电与负荷数据

Tab.2 Data of generation and loads

节点编号	节点信息
3	有功负荷 2 000 MW,功率因素为 0.95
4	有功负荷 1 500 MW,功率因素为 0.95
5	有功负荷 3 000 MW,功率因素为 0.95
6	有功负荷 1 000 MW,功率因素为 0.95,外送有功功率 3 000 MW
7	4 台 600 MW 机组,2 台 300 MW 机组
8	5 台 600 MW 机组,2 台 300 MW 机组
9	2 台 600 MW 机组,3 台 300 MW 机组
1	风电 500 kV 汇集升压站节点,按照“国家电网风电场接入电网技术规定(2009)”,风电场在额定运行情况下该节点的功率因数要求为 -0.98 ~ 0.98 加以确定其无功补偿容量,并在系统分析中将其作为 PV 节点处理.
2	同上

注:表中有功负荷指全年的峰值情况,并使用典型的日负荷曲线. 在节点 4、5、6 安装有无功补偿装置(电容器组),容量分别为 180 Mvar、480 Mvar、600 Mvar. 为了系统分析计算方便,发电节点 7、8、9 分别按同类型机组分裂为若干子节点,其中每个子节点用一条无损线与系统相连接,机组的功率因数范围为 -0.97(超前)~0.8(滞后).

表 3 含大规模风电的初始电力规划方案

Tab.3 Initial power system planning alternatives with large-scale wind power

方 案	电源扩展规划方案 (新建机组)	电网扩展规划方案 (新建线路)
1	Bus7:2×390 MW 燃气 Bus8:4×390 MW 燃气	L4-6,L5-6,L5-8
2	Bus7:1×600 MW 燃煤 Bus8:3×600 MW 燃煤	L4-6,L5-6,L5-8
3	Bus7:2×300 MW 燃煤 Bus8:3×600 MW 燃煤	L4-6,L5-6,L5-8
4	Bus7:2×390 MW 燃气 Bus8:4×390 MW 燃气	L4-6,L5-6
5	Bus7:2×390 MW 燃气 Bus8:4×390 MW 燃气	L4-6(2),L5-6,L5-8

50 元/(kW·h),由此获得的各方案评估结果如表 7 所示,其中的各项成本均为年值形式.

需指出,表 6 中方案的负荷削减电量由以下 2 部分构成:①机组组合无解所需的负荷削减;②安全约束经济调度失败所采取校正性控制措施对应的负荷削减. 它们所导致的经济损失也纳入了全社会成本.

1) 不同电源规划方案间的比较

方案 1、方案 2 与方案 3 新增机组总容量近似相等,约为 2 400 MW. 由表 6 可见,方案 2 与方案 3 在全年运行模拟过程中均造成一定的弃风和负荷削减,其原因在于:①火电机组受最小运行时间、最小停机时间及最小技术出力等约束的限制,功率调节能力较差;②为满足系统的安全运行而采取的控制措施所

表 4 机组的技术经济和可靠性参数
Tab.4 Technical and economic parameters and reliability parameters of generation units

机组参数		机组容量 P_{max}/MW		
		600(燃煤)	300(燃煤)	390(燃气)
技术参数	最小出力/MW	180	180	19.5
	最大出力/MW	600	300	390
	爬坡速率/ $(P_{max} \cdot \min)$	$\pm 5\%$	$\pm 1\%$	$\pm (5 \sim 10)\%$
	最小允许运行时间/h	16	8	6
	最小允许停机时间/h	8	5	3
经济参数	发电成本函数 $f(P) = aP^2 + bP + c$ (P 为机组有功出力)	$a = 7p_c/125\ 000$ $b = 5\ 401p_c/25\ 000$ $c = 13\ 224p_c/625$	$a = 3p_g/50\ 000$ $b = 129p_g/500$ $c = 12p_c$	$a = 304p_g/533$ $b = -36\ 420p_g/533$ $c = 16\ 212\ 000\ p_g/533$
	资金回收系数	0.082	0.082	0.082
	单位投资成本/(元 $\cdot kW^{-1}$)	3 675	4 412	3 166
	初投资成本/(亿元 $\cdot 台^{-1}$)	22.05	13.236	12.347
	运行维护费率/%	3.5	3.5	5
可靠性参数	失效率/(次 $\cdot (台 \cdot a)^{-1}$)	1.35	1.99	1.4
	修复率/(次 $\cdot (台 \cdot a)^{-1}$)	154.47	230.89	219
	平均修复时间/(h $\cdot 次^{-1}$)	56.71	37.94	40

注：发电成本函数系数中的 p_c 为标煤价格，元/t，取为 700 元/t， p_g 为天然气价格，取为 2 元/m³。机组的经济寿命与折现率分别取为 25 a 和 6.5%，机组单位千瓦投资成本中不含脱硫脱硝设备的费用。

表 5 线路和风机的经济参数

Tab.5 Economic parameters of transmission lines and wind power generation units

类 型	资金回收系数	单位投资成本	运行维护费率/%
线路	0.082 0	160 万元/km	1.7
风机	0.087 2	8 000 元/kW	1.3

注：这里线路指 500 kV 的架空线路，经济寿命与折现率分别取为 25 a 和 6.5%。500 kV 变电站共计 9 所，假定变压器总容量均为 $3 \times 1\ 000\ MVA$ ，成本为 270 元/kVA，运行维护费率为 2.2%。线路的强迫停运率为 0.077 次/(100 km $\cdot a$)，平均修复时间为 37.67 h/次。风机的经济寿命与折现率分别取为 20 a 和 6.0%。

致。方案 1 也存在一定的弃风和负荷削减，原因是系统的安全约束限制所致（主要是动态安全约束），但是相对于方案 2 与方案 3，其值较小。其中，由于燃气机组启停时间短，调峰能力强，因而在机组组合过程中系统并未造成弃风和负荷削减。方案 1 的燃料成本相较于方案 2、方案 3 稍大，原因是后 2 个方案在运行模拟过程中进行了负荷削减（即相应地减少了燃料成本），但由此造成的经济损失非常大，分别约为 17 亿元和 13 亿元。对于环境成本，方案 1 优于方案

表 6 注入功率空间上实用动态安全域超平面系数

Tab.6 Critical boundary hyper-plane coefficients of PDSR in power injection space

方 案	预想事故号	G1	G2	G7	G8a	G8b	L3	L4	L5	L6
1	1	-0.050 6	-0.042 2	0.035 6	0.044 8	0.062 2	-0.050 4	0.067 2	0.033 6	0
	2	-0.153 5	0.127 3	-0.053 3	0.067 5	0.188 5	0.152 9	-0.101 2	0.050 6	0
	3	-0.001 7	-0.004 6	0.013 4	0.020 0	0.026 8	-0.015 3	0.004 0	-0.000 4	-0.007 0
2	1	-0.050 5	-0.042 1	0.035 5	0.044 9	0.062 1	-0.050 3	0.067 2	0.033 5	0
	2	-0.153 6	0.127 4	-0.053 4	0.067 4	0.188 6	0.152 9	-0.101 3	0.050 6	0
	3	-0.094 8	-0.005 4	0.010 9	0.009 5	0.027 8	-0.001 2	-0.024 7	-0.009 1	-0.012 8
3	1	-0.050 6	-0.042 1	0.035 5	0.044 8	0.062 3	-0.050 4	0.067 1	0.033 7	0
	2	-0.153 5	0.127 2	-0.053 2	0.067 4	0.188 4	0.153 0	-0.101 3	0.050 6	0
	3	-0.094 1	-0.004 1	0.012 0	0.007 8	0.031 2	0.001 4	-0.019 4	-0.010 6	-0.012 6
4	1	-0.050 6	-0.042 1	0.035 6	0.044 8	0.062 1	-0.050 3	0.067 1	0.033 5	0
	2	-0.153 8	0.128 7	-0.049 5	0.061 9	0.190 3	0.154 2	-0.093 2	0.046 9	0
	3	-0.001 9	-0.004 7	0.013 4	0.021 0	0.026 9	-0.015 3	0.004 2	-0.000 6	-0.007 0
5	1	-0.050 6	-0.042 2	0.035 6	0.044 8	0.062 2	-0.050 4	0.067 2	0.033 6	0
	2	-0.154 0	0.128 1	-0.108 1	0.136 6	0.189 4	0.153 6	-0.204 5	0.102 4	0.000 3
	3	-0.001 7	-0.004 6	0.013 4	0.020 0	0.026 8	-0.015 3	0.004 0	-0.000 4	-0.007 0

注：示例系统中 Bus9 为平衡节点，Bus8 分裂为 2 个子节点，其节点号分别为 8a、8b。1、2、3 号预想事故分别表示线路 L1-3、L2-4 和 L5-8 首端发生三相短路故障，在 0.10 s 时切除故障线路。

表 7 初始规划方案的评估结果

Tab.7 Evaluation results of initial power system planning alternatives with large-scale wind power

方 案	电源的容量成本/(10 ⁸ 元)	电网成本/(10 ⁸ 元)	燃料成本/(10 ⁸ 元)	环境成本/(10 ⁸ 元)	网损成本/(10 ⁸ 元)	可靠性成本/(10 ⁸ 元)	弃风电量/(MW·h)	负荷削减电量/(MW·h)	全社会成本/(10 ⁸ 元)	
									本文方法	文献[3-4]方法
1	84.26	10.94	167.27	18.12	3.77	5.37	187 844.06	2 524.76	290.99	294.37
2	84.80	10.94	151.99	19.43	3.88	6.12	307 334.37	34 605.88	294.46	278.42
3	85.32	10.94	155.94	19.95	3.76	6.27	763 094.08	25 262.27	294.81	280.22
4	84.26	10.78	168.46	18.17	4.25	41.67	219 868.64	37 236.24	346.21	314.10
5	84.26	11.26	166.36	18.08	3.28	2.42	9 122.15	569.26	285.94	291.07

2 和方案 3, 评估结果表明: 三者全年排放的二氧化碳分别约为 5 035 万吨、5 192 万吨和 5 326 万吨(其大部分是由系统中原有的燃煤机组排放), 方案 1 较后两者分别少 157 万吨和 291 万吨, 这是因为燃气机组的环保性能较好^[15]. 需指出, 排放的二氧化碳所造成的经济损失在文献[9]中可能被严重低估. 从全社会成本角度看, 方案 1 明显优于方案 2 和方案 3.

2) 不同电网规划方案间的比较

方案 1、方案 4 和方案 5 三者具有相同的电源扩展规划方案, 但方案 4 较方案 1 少建线路 L5-8, 方案 5 较方案 1 多建一回线路 L4-6. 由表 2 可见, 方案 4 在系统运行模拟过程中存在一定的弃风和负荷削减, 评估结果表明: 少扩建线路 L5-8 在一些情况下会导致安全约束经济调度失败, 故必须采取相应的校正性控制措施, 与此同时, 系统的可靠性也严重下降, 其可靠性成本较方案 1 增加了约 6.8 倍. 方案 5 较方案 1 由于多扩建一回线路, 方案仅有少量的弃风和负荷削减, 而且其可靠性成本较方案 1 降低了约 55%. 由表 6 可知: 5 个方案中方案 5 的全社会成本最低, 故为最佳方案.

此外, 表 6 中还给出了按文献[3-4]方法各方案的评估结果, 从中可以发现:

(1) 方案 2、方案 3 和方案 4 的全社会成本相较于本文方法的评估结果都偏低, 原因是系统运行模拟过程中的安全约束经济调度模型忽略了动态安全约束, 也没有考虑安全约束经济调度失败后的校正性控制, 故由于计及上述因素而导致的负荷削减的经济损失并未纳入其全社会成本;

(2) 方案 1 和方案 5 的全社会成本相较于本文方法的评估结果数值都偏高, 这是由于系统运行模拟过程中没有考虑机组组合优化模型所致;

(3) 各方案的弃风电量皆为 0, 这是因为没有考虑常规火电机组对风电的接纳制约因素. 故在评估含大规模风电的电力规划方案时, 详细模拟系统的运行过程十分重要, 否则可能导致错误决策.

4 结 语

本文立足于全社会成本视角, 建立了含大规模风电的电力规划方案评估的整体框架. 为计及风电出力的波动性, 在计及静态和动态安全约束的经济调度模型基础上, 结合机组组合优化模型与校正性控制模型, 实现了系统运行过程的详细模拟, 可以获得全年每一时段(如 1 h)的可信的系统燃料成本、环境成本、网损成本和系统可靠性成本. 再结合电源的容量成本和电网成本, 则可实现既定电力规划方案的全社会成本的详细评估. 最后, 通过示例验证了在评估含大规模风电的电力规划方案时, 详细模拟系统的运行的重要意义和本文方法的有效性. 为我国今后含大规模风能、太阳能等可再生能源的规划方案评估提供了分析工具.

参考文献:

- [1] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网的基本理念[J]. 天津大学学报, 2011, 44(5): 377-384.
Yu Yixin, Luan Wenpeng. Basic philosophy of smart grid[J]. *Journal of Tianjin University*, 2011, 44(5): 377-384(in Chinese).
- [2] Billinton R, Wangdee W. Reliability-based transmission reinforcement planning associated with large-scale wind farms[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2007, 22(1): 34-41.
- [3] 于 晗, 钟志勇, 黄杰波, 等. 考虑负荷和风电出力不确定性的输电系统机会约束规划[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(2): 20-24.
Yu Han, Chung C Y, Wong K P, et al. A chance constrained transmission network expansion planning method associated with load and wind farm variations[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(2): 20-24(in Chinese).
- [4] Lawhorn J, Osborn D, Caspary J, et al. The view from

- the top[J]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2009, 7(6): 76-88.
- [5] Corbus D, Lew D, Jordan G, et al. Up with wind[J]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2009, 7(6): 36-46.
- [6] 余贻鑫. 安全域的方法学及实用性结果[J]. 天津大学学报, 2003, 36(5): 525-528.
Yu Yixin. Methodology of security region and practical results[J]. *Journal of Tianjin University*, 2003, 36(5): 525-528 (in Chinese).
- [7] 王喆, 余贻鑫, 张弘鹏. 社会演化算法在机组组合中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 12-17.
Wang Zhe, Yu Yixin, Zhang Hongpeng. Social evolutionary programming based unit commitment[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(4): 12-17 (in Chinese).
- [8] 周金辉, 余贻鑫, 王菲, 等. 计及静态安全风险的输电网短期综合扩展规划[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(6): 22-25.
Zhou Jinhui, Yu Yixin, Wang Fei, et al. Short term integrated expansion planning for transmission network considering static security risk[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(6): 22-25 (in Chinese).
- [9] 陆华, 周浩. 发电厂的环境成本分析[J]. 环境保护, 2004(4): 51-54.
Lu Hua, Zhou Hao. Environmental cost analysis of power plants[J]. *Environmental Protection*, 2004(4): 51-54 (in Chinese).
- [10] 魏学好, 周浩. 中国火力发电行业减排污染物的环境价值标准估算[J]. 环境科学研究, 2003, 16(1): 53-56.
Wei Xuehao, Zhou Hao. Evaluating the environmental value schedule of pollutants mitigated in China thermal power industry[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2003, 16(1): 53-56 (in Chinese).
- [11] 张硕, 李庚银, 周明. 含风电场的发输电系统可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 8-14.
Zhang Shuo, Li Gengyin, Zhou Ming. Reliability assessment of generation transmission and distribution systems integrated with wind farms[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(7): 8-14 (in Chinese).
- [12] 张宁, 周天睿, 段长刚, 等. 大规模风电场接入对电力系统调峰的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 152-158.
Zhang Ning, Zhou Tianrui, Duan Changgang, et al. Impact of large-scale wind farm connecting with power grid on peak load regulation demand[J]. *Power System Technology*, 2010, 34(1): 152-158 (in Chinese).