

文章编号:2095-0411(2017)04-0039-05

基于多代理技术的多能源节能减排机组组合

张晓花^{1,2}, 朱陈松³, 朱正伟⁴, 强 浩¹

(1. 常州大学 城市轨道交通学院, 江苏 常州 213164; 2. 江苏省输配电装备技术重点实验室(河海大学), 江苏 常州 213022; 3. 常州大学 商学院, 江苏 常州 213164; 4. 常州大学 信息科学与工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要:以风电、火电和抽水蓄能为研究对象,利用抽水蓄能的快速调节特性,形成抽水蓄能削峰填谷的静态作用、提供旋转备用的动态作用 and 环境保护作用的平衡。建立了节能减排下多目标多能源风火蓄机组组合模型,并利用多代理技术进行求解。对不同权重下多目标机组组合的各目标及其权重进行分析协调,能够在一次能源消耗成本、SO₂和 CO₂排放目标上得到合理的权衡,使得系统的社会综合效益得到大幅提高。

关键词:抽水蓄能;风电;火电;节能减排;多代理技术

中图分类号:TM 71

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2017.04.007

Unit Commitment Considering Energy Saving and Emission Reduction Based on Multi-Agent Technology

ZHANG Xiaohua^{1,2}, ZHU Chensong³, ZHU Zhengwei⁴, QIANG Hao¹

(1. School of Urban Rail Transportation, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Power Transmission and Distribution Equipment Technology, Hohai University, Changzhou 213022, China; 3. Business College, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 4. School of Information Science and Engineerer, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: Rapid response to load variations of pump storage is analyzed, and it is used to shift load, supply spinning reserve and protect environment and the multi-objective wind-thermal-pump storage Unit Commitment (UC) model is presented, and the multi-agent technology is used. Primary energy consumption costs, emission reducing and cascade energy storage are synthetically considered. Through the weight coordination of the wind-thermal-pump storage in the UC, the energy-saving and emission reduction targets are realized, and the comprehensive social benefits are improved.

收稿日期:2016-11-30。

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51207074);江苏省输配电重点实验室项目(2011JSSPD10);江苏省产学研联合创新资金项目(前瞻性联合研究项目)(BY2014037-29)。

作者简介:张晓花(1981—),女,山西五台人,博士,讲师,主要从事电力系统优化调度的研究。

Key words: pump storage; wind power; thermal power; energy saving and emission reduction; multi-agent technology

随着风电等清洁能源大规模接入电网,电网在调峰、调频及安全运行方面的压力进一步加大,为风火发电系统配置一个抽水蓄能是改善风力发电稳定性的有效解决措施之一^[1-2]。抽水蓄能与风电互补运行是构建绿色电力的有效手段,这对于改善现有的电源结构,减少系统运行成本和实现系统的节能减排具有重要的现实意义^[3-4]。

文献[5]阐述了利用风电、抽水蓄能电站及火电形成多能源综合分布式发电系统在效率、能源多样化、环保、节能等多方面具有优越性。文献[6]将风电场的经济性最大化作为目标,验证了风电机组和抽水蓄能电站联合运行的可能性。丁明等提出含多种复合能源的分布式发电系统发电成本最低的机组组合模型^[7]。文献[8-10]建立了风电-抽水蓄能联合运行系统和优化模型,研究了风蓄联合系统中抽水蓄能电站对风电削峰填谷的影响,但未考虑系统的减排。谭志忠等对风蓄联合运行系统优化进行了研究,但没有给出具体的污染气体排放模型,也未考虑抽水蓄能提供旋转备用的动态功能^[11]。而该功能比抽水蓄能的其他作用更重要,特别是在有风电存在的电网中。

目前针对抽水蓄能优化运行的许多研究成果主要集中在削峰填谷等静态功能,因此需要全面考虑并充分利用抽水蓄能的快速调节特性,建立合理的多能源机组组合模型,运用多代理技术,实现多能源风火蓄机组组合的节能减排目标。本文利用多代理技术实现对风火蓄发电系统的优化调度,并同时考虑了节能减排和抽水蓄能的快速调节特性。最后通过算例分析,验证所提算法的有效性。

1 多能源机组组合的多代理系统架构

多代理系统中的“代理”(Agent)主要指软件代理(software agent),软件代理是指在一定环境下,独立的、具有一定的自主性和推断能力、又能够和系统中其它代理通信交互以及能对周围的环境做出反应,从而完成一个或者多个功能目标的软件模块。代理的基本特性包括:自治性、可通信性、反应性、面向目标性和针对环境性等。

多能源机组组合利用多代理技术将火电、风电和抽水蓄能系统组合成为多智能体系统(Multi-Agent System, MAS)。系统包含多个 Agent,这些 Agent 不仅具备自身的问题求解能力和行为目标,而且能够相互协作,达到共同的整体目标。基于多代理技术的多能源机组组合多智能体系统框架如图 1 所示。机组组合的节能减排目标数据通过节能减排分析评价体系实时传送到分析评价代理,经该代理执行分析评价后,根据当前分析评价结果向机组管理代理提出机组调度需求,机组管理代理经过协调后优化选择某种控制,然后启动相应的控制代理,制定控制方案,并提交给协同进化代理,协同进化代理得到该机组组合的合理方案并给出节能减排的目标,节能减排目标再通过分析评价体系评价其机组组合的社会效益,从而形成风火蓄机组组合的多智能体系统。上述的各种代理都要求具有一定的推理决策能力,因此由慎思型或混合型代理构成。

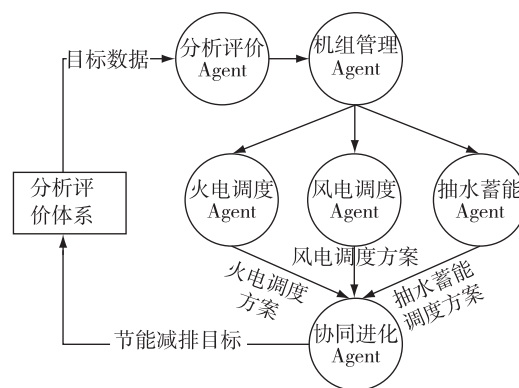


图 1 基于多代理技术的多能源机组组合多智能体系统

2 节能减排风火蓄机组组合数学模型

2.1 目标函数

以节能减排为目标的风火蓄机组组合同样考虑系统的一次能源消耗成本最小、SO₂排放量最小及CO₂排放量最小,其目标函数表达为:

$$F_{\min} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [C_i(p_i^t)u_i^t + S_i u_i^t (1 - u_i^{t-1})] \quad (1)$$

$$E_{s\min} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [(\alpha_{si} + \beta_{si} p_i^t + \gamma_{si} (p_i^t)^2) u_i^t] \quad (2)$$

$$E_{c\min} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [(\alpha_{ci} + \beta_{ci} p_i^t + \gamma_{ci} (p_i^t)^2) u_i^t] \quad (3)$$

式中: F 为系统一次能源消耗成本; p_i^t 为火电机组 i 在 t 时刻的有功功率; $u_i^t = 1/0$ 表示火电机组 i 处于运行/停机状态; $C_i(p_i^t)$ 为火电机组 i 在 t 时刻的燃料消耗成本, S_i 为火电机组 i 的启动成本; T 为时段数; N 为火电机组数。 a_i 、 b_i 、 c_i 为火电机组 i 的耗量特性参数。 E_s 、 E_c 为系统 SO₂、CO₂ 总排放量; α_{si} 、 β_{si} 、 γ_{si} 及 α_{ci} 、 β_{ci} 、 γ_{ci} 为火电机组 i 的 SO₂ 及 CO₂ 排放函数系数。

$$S = F + F_e \quad (4)$$

式中: S 为节能减排下机组组合的社会综合成本,社会综合成本的节约等价为社会综合效益的增加,社会综合成本低其相应的社会综合效益就大; F_e 是环境污染的惩罚成本,环境污染的惩罚成本是企业为了等值补偿污染物造成“污染经济损失”所付出的代价。环境污染的惩罚成本可表示为 $F_e = P_s E_s + P_c E_c$, 式中: P_s 、 P_c 为因排放污染物 SO₂、CO₂ 所受的罚款,本文选 PS_s 、 PS_c 的处罚标准均为每吨 300 美元。

2.2 约束条件

1) 系统有功功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^N p_i^t u_i^t + p_g^t + p_w^t = p_d^t \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (5)$$

2) 系统旋转备用约束

$$\sum_{i=1}^N (u_i^t p_{i\max} - u_i^t p_i^t) + R_g^t \geq R^t \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (6)$$

同样假设风力机组不提供备用,多能源风火蓄系统所需的旋转备用由火电机组及抽水蓄能共同提供。

3) 机组出力上下限约束

$$p_{i\min} \leq p_i^t \leq p_{i\max} \quad (7)$$

$$\text{抽水工况} \quad -p_{p\max} \leq P_g^t \leq -p_{p\min} \quad (8)$$

$$\text{发电工况} \quad p_{h\min} \leq p_g^t + R_g^t \leq p_{h\max} \quad (9)$$

式中: p_d^t 为 t 时段系统的负荷; $p_{i\max}$ 、 $p_{i\min}$ 为火电机组 i 的最大、最小出力; R^t 为 t 时段系统旋转备用容量; p_w^t 为 t 时段风电的出力; P_g^t 为 t 时段抽水蓄能电站的功率, $P_g^t = \sum_{g=1}^G p_g^t$; G 为抽水蓄能机组的个数, p_g^t 为 t 时段第 g 个抽水蓄能机组的功率。抽水时功率为负, $p_g^t = 9.81h^t Q_p^t / \eta_p$; 发电时功率为正, $p_g^t = 9.81h^t Q_h^t \eta_h$, 静止时功率为 0; h^t 为水库 t 时段的净水头; Q_p^t 、 Q_h^t 分别为 t 时段第 k 个抽水蓄

能机组的抽水引用流量(负值)与发电(正值)引用流量; η_p 、 η_h 为抽水、发电效率。 R_g^t 为 t 时段抽水蓄能电站提供的旋转备用, $0 \leq R_g^t \leq R_{g\max}$, $R_{g\max}$ 为抽水蓄能所能提供的最大旋转备用, $R_g^t = \sum_{g=1}^G r_g^t$, r_g^t 为 t 时段第 g 个抽水蓄能机组所提供的旋转备用, 且 $r_g^t = p_{h\max} - p_g^t$, $p_{h\max}$ 为抽水蓄能机组 g 的发电容量上下限约束; $P_{p\max}$ 和 $P_{p\min}$ 为抽水蓄能机组 g 的抽水容量上下限约束。

除以上约束条件外, 还需要计及风力发电的功率及其波动约束、火电机组自身约束, 这里不再赘述。

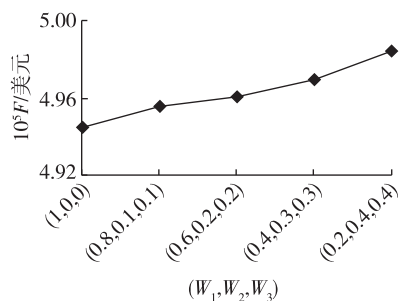
3 算例分析

以某一具有日调节性能的抽水蓄能电站为例, 该电站上水库最大库容对应的可发电量为 $465 \text{ MW} \cdot \text{h}$, 最小库容对应的可发电量为 $0 \text{ MW} \cdot \text{h}$, 抽水容量为 150 MW , 发电容量为 155 MW , 抽水-发电的循环效率 $\eta = 80\%$ 。假设其下水库库容相对较大, 发电过程中下水库水位变化很小, 因此可忽略其库容约束; 上下水库之间的发电水头较大, 发电过程中引起的水头变化相对于总水头来说相对较小, 可忽略不计。在发电工况下抽水蓄能电站提供的旋转备用容量为其发电容量的 0.4 倍, 火电机组及日负荷数据见文献[12]。风电场的数据参照文献[13]给出, 含有并联运行的 120 台同型号异步风力机组, 额定功率为 240 MW 。

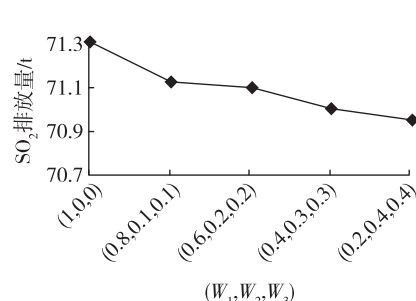
在各种优化目标选取不同权重时, 多能源风火蓄机组组合的节能减排及其效益见表 1, 各目标权重的关系如图 2 所示, W_1, W_2, W_3 分别对应为系统一次能源消耗成本、 SO_2 排放量及 CO_2 排放量权重。

表 1 多能源风火蓄机组组合的节能减排及其效益与各目标权重的关系

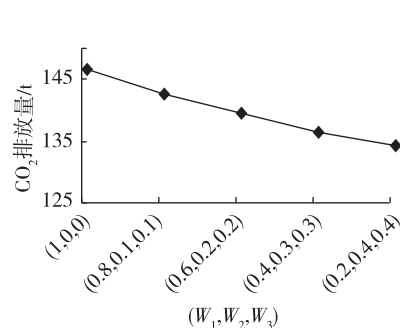
权重	$F/\text{美元}$	E_s/t	E_c/t	$S/\text{美元}$
(1, 0, 0)	494 502.226	71.304	146.476	559 836.100
(0.8, 0.1, 0.1)	495 562.580	71.121	142.584	559 674.140
(0.6, 0.2, 0.2)	496 079.269	71.094	139.536	559 268.179
(0.4, 0.3, 0.3)	496 899.345	71.004	136.463	559 139.415
(0.2, 0.4, 0.4)	498 392.293	70.955	134.133	559 918.783



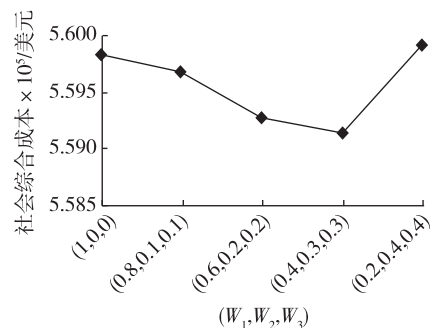
(a) 一次能源消耗成本与权重关系



(b) SO_2 排放与权重关系



(c) CO_2 排放与权重关系



(d) 社会综合成本与权重关系

图 2 多能源机组组合的节能减排与各目标权重的关系

从表1与图2中可以看出,随着节能目标对应权重的减小,系统的一次能源消耗成本有所增加,但其增幅值比例较小,可以接受;增加CO₂排放量指标所对应的权重,其排放量可得到大幅减少;同样增加SO₂排放量对应的权重,其排放量也得到减少,但减幅较小。随着污染物减排量权重的增加,社会综合成本先减小,后增加,当权重为(0.4,0.3,0.3)时对应的社会综合成本较其他权重下最小,即社会综合效益最大,也就是说按照以节能为主要目标、同时兼顾减排目标、保持节能与减排的协调为原则进行机组组合可以获得最大的社会综合效益。

4 结 论

同时考虑了节能减排和抽水蓄能的快速调节特性,通过多代理技术实现对风火蓄发电系统的优化调度,建立了节能减排下多目标风火蓄机组组合模型。抽水蓄能的加入能够提高风电的利用率,弥补其随机性、波动性的不足,从而进一步提高风火蓄系统的经济性、环保性与调度的灵活性。利用抽水蓄能的快速调节特性,形成抽水蓄能削峰填谷的静态作用、提供旋转备用的动态作用 and 环境保护作用的平衡。通过算例对多能源风火蓄机组组合的节能减排效益及其各目标的权重进行了分析,选取了节能减排各目标较合适的权重。实现了风火蓄机组组合的节能与减排目标之间的协调,达到了节能减排社会效益最大化。

参考文献:

- [1] EDGARDO D C, PECAS J A. On the optimization of the daily operation of a wind-hydro power plant[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(3): 1599-1606.
- [2] CHEN H Y, XUAN P Z, WANG Y C, et al. Key technologies for integration of multitype renewable energy sources—research on multi-timeframe robust scheduling/dispatch[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2016, 7(1): 471-480.
- [3] ZHANG N, HU Z G, DAI D H, et al. Unit commitment model in smart grid environment considering carbon emissions trading[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2016, 7(1): 420-427.
- [4] LU S, WU Y, LOU S, et al. A model for optimizing spinning reserve requirement of power system under low-carbon economy[J]. IEEE Trans Sustain Energy, 2014, 5(4): 1048-1055.
- [5] 余昆, 曹一家, 倪以信, 等. 分布式发电技术及其并网运行研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(6): 2-9.
- [6] ANGARITA J M, USAOLA J G. Combining hydro-generation and wind energy: biddings and operation on electricity spot markets[J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77(5/6): 393-400.
- [7] 丁明, 包敏, 吴红斌, 等. 复合能源分布式发电系统的机组组合问题[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 46-50.
- [8] 李强, 袁越, 李振杰, 等. 考虑峰谷电价的风电-抽水蓄能联合系统能量转化效益研究[J]. 电网技术, 2009, 33(6): 13-18.
- [9] 胡泽春, 丁华杰, 孔涛. 风电—抽水蓄能联合日运行优化调度模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 36-41.
- [10] GARCIA-GONZALEZ J, DE M R, SANTOS L M, et al. Stochastic joint optimization of wind generation and pumped-storage units in an electricity market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 460-468.
- [11] 谭志忠, 刘德有, 欧传奇, 等. 风电-抽水蓄能联合系统的优化运行模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(1): 58-62.
- [12] ONGSAKU W, PETCHARAKS N. Unit commitment by enhanced adaptive lagrangian relaxation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(1): 620-628.
- [13] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含风电场电力系统经济调度的模糊建模及优化算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 22-26.

(责任编辑:李艳)