

基于 MPC 的超短期优化调度策略研究

杨冬锋¹, 周苏荃¹, 魏剑啸², 张实³

(1. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 许继变压器有限公司, 河南 许昌 461000; 3. 北京京桥热电有限责任公司, 北京 100067)

摘要: 为实现多时间尺度协调调度模式, 基于模型预测控制(MPC)理论对超短期优化调度策略进行了研究。以系统发电机组运行成本和排放量费用最小为目标函数, 通过求解前瞻时间内的多时段优化问题, 为实时调度提供初始策略, 以实际调度结果和新的预测信息作为反馈信息进行滚动优化调度。该方法将日前调度时间尺度和实时调度时间尺度的信息联系起来, 可有效应对预测信息波动对系统调度的影响。算例仿真结果表明: 考虑多时段整体优化, 可以更好地在机组之间合理的优化分配负荷, 提高整个火电厂运行的经济性。同时验证了 MPC 方法的鲁棒性和收敛性。

关键词: 有功调度; 实时调度; 多时间尺度; 模型预测控制

Ultra-short term optimal dispatch method based on MPC

YANG Dongfeng¹, ZHOU Suquan¹, WEI Jianxiao², ZHANG Shi³

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Xuji Transformer Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 3. Beijing Jingqiao Thermal Power Co., Ltd., Beijing 100067, China)

Abstract: To realize the multiple time-scale coordination dispatching mode, the extended short-term optimal dispatching strategy based on the model predictive control method (MPC) is studied. The object functions of the model are the minimizations of the units' cost and emission expense. The initial strategy of the real-time dispatching is decided by solution of the multi-period optimal problem in the periods ahead, and then the real dispatching condition and the new forecasting information being taken as the feedback information are used to execute circling optimal dispatch. The day-ahead dispatch time-scale and the real-time time scale are cooperated to deal with the effect of forecasting information fluctuation on system dispatch. The case study results show that considering the multiple period optimizations as a whole could allocate load among the units reasonably and improve the economy of the power plant operation. At the same time, the robustness and convergence of MPC method is testified.

Key words: active power dispatch; real time dispatch; multi-time scale; model prediction control

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)11-0021-06

0 引言

随着风电在电网中所占比例不断增大, 风电与系统调度的相互影响日益紧密, 一方面风电功率的不确定性给电网调度带来的不利影响越来越大, 另一方面通过优化调度策略又可以有效提升电网对风电的接纳能力^[1-5]。

我国传统的电力系统有功调度模式主要考虑日前调度和实时调度两个时间尺度的调度问题, 由于两个时间尺度跨度过大, 无法较好地应对大规模风电接入电网给系统调度带来的不确定性问题。因此,

许多学者开展了有关多时间尺度相协调的有功调度模式研究^[6-8]。其目的在于逐级降低由风电等新能源接入电网后给电网造成的不确定扰动。

就目前风电功率预测技术的发展水平而言, 日前风电预测的误差一般在 25%~40%, 甚至更大; 因此风电并网系统的日前调度计划的主要任务是在满足安全性和经济性的要求下, 为系统配置合理的备用与调峰容量^[8]。利用风电预测精度随时间尺度减小而提高的特点, 需要在日前调度计划的基础上做好更短时间尺度下的调度方案; 同时, 要考虑实际调度过程中预测信息和机组实际输出功率的变化及

时更新调度方案。众多学者在不同时间尺度上对调度模型和算法求解等问题作了大量的研究^[8-16]。文献[8]提出一种日内调度手段来协调日前调度向实时调度的过渡,进入日内调度后,对负荷数据的变化实时跟踪,及时修正日前计划,通过日内变化求解优化模型,确保发电计划的经济性。文献[9]提出一种在线经济调度模型,通过前瞻时间窗口的大小得到动态经济调度的最优解。文献[10]引入了风险备用的概念,提出了一种将日前和日内滚动经济调度相协调的经济调度策略,以适应风电的随机性。文献[11-15]在目标函数上考虑机组的排放特性,更满足系统经济性和环境的要求。文献[16]考虑电网调度实时性要求,通过对火电厂的实时调度对机组进行负荷优化分配。但是,这些研究没有综合考虑目前电力系统的经济性,环境问题以及存在优化时间长,达不到电网实时调度的要求,同时当负荷偏差或者出现随机扰动时不能实时修正,导致 AGC 可调容量不足,就会影响系统的安全性。

本文借鉴 MPC 理论,构建联系日前调度和实时调度的超短期滚动优化调度策略。该优化模型以可调机组的发电成本和排放费用最小为优化目标进行滚动计算;以机组实时出力和不断更新的超短期预测信息(超短期负荷预测和超短期风电功率预测)为反馈信息,实现对系统调度方案的修正。

1 超短期滚动优化调度模型

1.1 目标函数

在满足发电成本最小的同时,必将导致排放量的增大,这是一个多目标优化问题。燃料成本和排放量是相互矛盾的目标函数,因此需要在两者之间找到一个平衡点。在整个调度周期 $[0, N]$ 内,将多目标函数转化为单目标函数 H 为

$$H = \alpha \sum_{t=1}^N \sum_{i=1}^n C_i(P_i^t) + (1 - \alpha) \sum_{t=1}^N \sum_{i=1}^n E_i P_i^t \quad (1)$$

发电成本和排放量为二次函数形式。

$$C_i(P_i^t) = a_i + b_i P_i^t + c_i (P_i^t)^2 \quad (2)$$

$$E_i(P_i^t) = \alpha_i + \beta_i P_i^t + \gamma_i (P_i^t)^2 \quad (3)$$

式中: a_i 、 b_i 、 c_i 为发电机 i 的燃料成本系数; α_i 、 β_i 、 γ_i 分别表示机组 i 的排放费用系数; $\alpha \in (0, 1]$ 为反映燃料费用和环境成本的权重系数; n 为发电机总数。

设 u_i^t 为时段 t 内机组 i 的爬坡速率,则其具体表达为

$$u_i^t = \frac{P_i^{t+1} - P_i^t}{T} \quad (4)$$

$$P_i^t = P_i^1 + \sum_{j=1}^{t-1} T u_i^j \quad (t = 2, \dots, N) \quad (5)$$

将式(5)代入式(1)中,将控制变量 P_i^t 变换为 u_i^t ,则目标函数 H 变为

$$H = \alpha \sum_{t=1}^N \sum_{i=1}^n C_i(P_i^1 + \sum_{j=1}^{t-1} T u_i^j) + (1 - \alpha) \sum_{t=1}^N \sum_{i=1}^n E_i(P_i^1 + \sum_{j=1}^{t-1} T u_i^j) \quad (6)$$

以最小化 H 为优化目标。

1.2 约束条件

(1) 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^n \left(P_i^1 + \sum_{j=1}^{t-1} T u_i^j \right) = D^t \quad (7)$$

式中, D^t 为总负荷。

(2) 机组出力上下限约束

$$P_i^{\min} \leq P_i^1 + \sum_{j=1}^{t-1} T u_i^j \leq P_i^{\max} \quad (8)$$

$$-DR_i \leq u_i^j \leq UR_i \quad (9)$$

式中, DR_i 和 UR_i 为机组向下和向上爬坡速率限制。

(3) 网络安全约束

$$-P_{l_{\max}} \leq \sum_{j=1}^N T_j, l P_j^t \leq P_{l_{\max}} \quad (10)$$

式中: $P_{l_{\max}}$ 为支路 l 有功功率限值; $T_{j,l}$ 为直流潮流下的功率转移分布因子。

2 基于 MPC 的超短期调度

2.1 模型预测控制(MPC)的基本原理

从 1970 年开始, MPC 方法就广泛应用于很多控制行业,并且取得了很大的成功。对于 MPC 方法的稳定性和鲁棒性国外学者均进行了研究。MPC 在过程工业中广泛应用,其本质上是一种滚动周期最优化基础上的控制技术^[17-21]。它以发电机的当前出力作为优化问题的初始解,基于预测负荷出力结果,通过在每一个采样周期内,在线求解一个有限时长的开环最优控制问题来获得未来时段的机组发电计划。

2.2 MPC 方法的实现流程

输入初始化状态: \bar{P}^1 定义为 $\bar{P}^1 = (P_1^1, P_2^1, \dots, P_n^1)$, 令 $m = 0$ 。MPC 方法的实现流程如下。

(1) 计算开环最优解 \bar{u}^m (该最优解为用 MPC 方法计算实时调度问题的解,在 $[m, m + N]$ 周期内)。

(2) 闭环 MPC 控制器放入采样周期 $[m, m + 1]$ 内,获得闭环 MPC 时间周期 $[m + 1, m + 2]$ 的解 v_i^m 。

$$\bar{P}_i^{m+2} = \bar{P}_i^{m+1} + T v_i^m (\bar{P}^{m+1}) \quad (11)$$

(3) 令 $m := m + 1$ 转到步骤(1)。

如图 1 所示, 给出了在 $n=1, N=5$ 的情况下 MPC 控制器的更新步骤。图 1 中第 1 列为 MPC 方法的初始值 $\bar{P}^1 = P^1$, 其他列为其他 MPC 控制器。图 1 中的图 1(a)表示第一次迭代过程, 虚线表示执行到当前时刻, MPC 方法优化了未来(1-5)4 个时段, 获得了四维控制量, 并且在 $t=1$ 时刻, 只有阴影部分被实际执行。而阴影部分为 MPC 的开环最优解 \bar{u}_0^1 , 则得到 $\bar{P}^2 = \bar{P}^1 + \bar{u}_0^1$ 。在此之后, 当 $t=2$ 以 \bar{P}^2 作为新的初始值对未来(2-6)4 个时段进行优化, 得到 \bar{u}_1^2 如图 1(b)所示。图 1(c)的虚线表示 MPC 控制器 \bar{u}_0^1 和 \bar{u}_1^2 。一般来说, MPC 方法不会停止, 在每个 $[m, m+1)$ 时刻都更新一次控制器, 包括上一个时段的反馈信息。

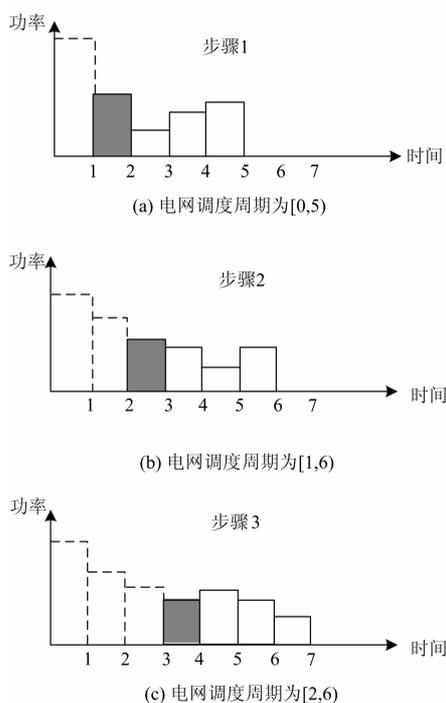


图 1 MPC 方法示意图

Fig. 1 Implementation of the MPC algorithm

2.3 超短期调度流程

结合 MPC 的基础原理, 本文所提的超短期调度基本流程如图 2 所示。

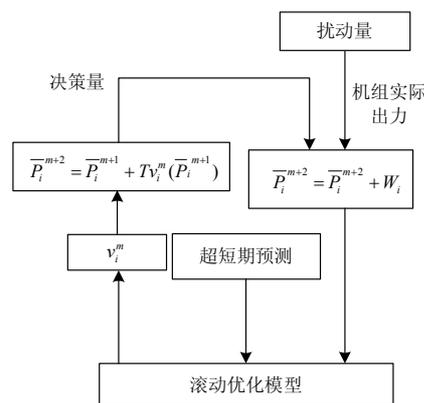


图 2 本文的超短期调度过程

Fig. 2 Proposed ultra-term dispatch processes

首先给优化模型赋初值, 即 $m=0$ 时刻的当前机组出力为 \bar{P}^{m+1} 。将初始值与超短期负荷预测和风电预测模型得到的预测信息输入到滚动优化模型中, 计算得到相应研究周期各时段各机组调整方案, 仅将下一时刻的调整方案作为实时调度的参考信息, 而其他时段的调整作为对日前调度计划的修正信息; 另外由于风电并网, 系统负荷的波动等不确定因素的影响, 机组的实际出力往往与实时调度方案不同, 将其与实时更新的预测信息作为反馈信息输入给滚动优化模型, 进入下一时段的优化计算, 并滚动更新和修正日前调度计划。

随着风电的大规模接入, 扰动也大小不一, MPC 控制方式可以保证优化计算的收敛性, 同时具有较强的鲁棒性。

3 算例分析

为验证所提模型和方法的有效性, 本文以 IEEE30 节点为例, 机组参数见表 1, 负荷参数如图 3 所示。

表 1 机组特性系数

Table 1 Characteristic coefficients of the units

i	$a_i / (\$/h)$	$b_i / (\$/MWh)$	$c_i / (\$/MW^2h)$	$\alpha_i / (lb/h)$	$\beta_i / (lb/MWh)$	$\gamma_i / (lb/MW^2h)$	P_i^{max} / MW	P_i^{min} / MW	$UR_i / (MW/h)$	$DR_i / (MW/h)$
1	240	7.0	0.007 0	13.859 3	0.327 67	0.004 19	500	100	80	120
2	200	10.0	0.009 5	13.859 3	0.327 67	0.004 19	200	50	50	90
3	220	8.0	0.009 0	40.266 9	-0.545 51	0.006 83	300	80	65	100
4	200	11.0	0.009 0	40.266 9	-0.545 51	0.006 83	150	50	50	90
5	220	10.5	0.008 0	42.895 5	-0.511 6	0.004 61	200	50	50	90
6	190	12	0.007 5	42.895 5	-0.511 6	0.004 61	120	50	50	90

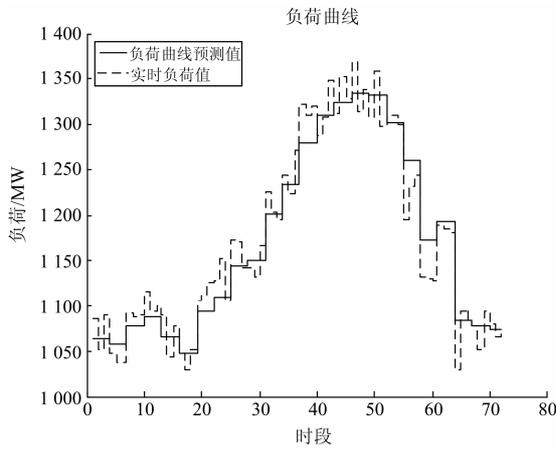


图3 负荷数据
Fig. 3 Load data

本文假设日前调度时段数为 96 个时段,时段持续时间为 15 min;超短期调度的时间尺度为每个时段持续时间为 5 min,算例考察总调度时段为 72 个时段(6 h);超短期预测信息每 5 min 更新一次,预测信息的时段数为 24。

为了模拟由风电功率和负荷不确定性对系统调度过程的影响,在原有负荷序列的基础上每进行一次滚动计算引入一组随机序列作为干扰项,以此模拟本文方法对预测信息更新的适应性。目标函数中反映燃料费用和环境成本的权重系数 α 取 0.5;引入干扰项设为一个在 $[-30,30]$ MW 的随机数,在每次执行滚动优化计算时加入到负荷序列上;取滚动优化时段与超短期预测时段数相同,即 $N=24$ 。

在上述条件下对以下三种情况进行比较分析:

I) 根据原始负荷数据采用动态经济调度模型,制定日前调度计划; II) 根据最终扰动产生的负荷序列采用动态经济调度方法对整个周期进行优化计算,得到理想调度方案(由于实际调度过程中,预测信息及机组实际出力均会发生变化,这种情况只能作为验证本文方法的理想参照); III) 采用本文方法,每执行一次滚动优化即用随机序列项对负荷进行修正(最终的负荷序列与情况 2 完全相同)。

以第 1 台和第 3 台机组为例,三种情况下的比较结果分别见图 4 和图 5,其他机组曲线见图 6~图 9。

由比较结果可以看出,II、III 两种情况的调度结果变化趋势均在 I 调度方案的基础上上下调整;II 情况下的各时段调度方案与 III 情况的调度方案变化趋势一致,但各时段调度结果存在差异。

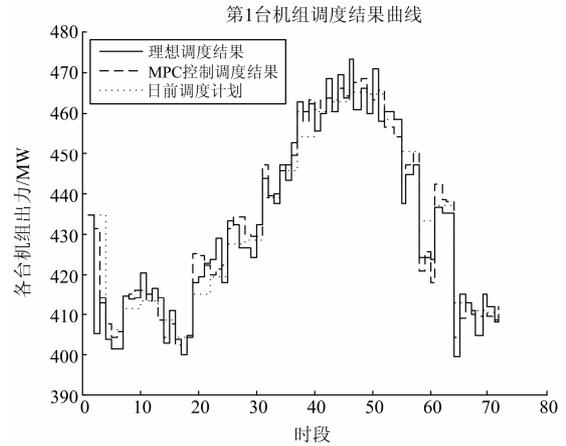


图4 第 1 台机组三种情况比较结果

Fig. 4 Comparison results under three cases of the first unit

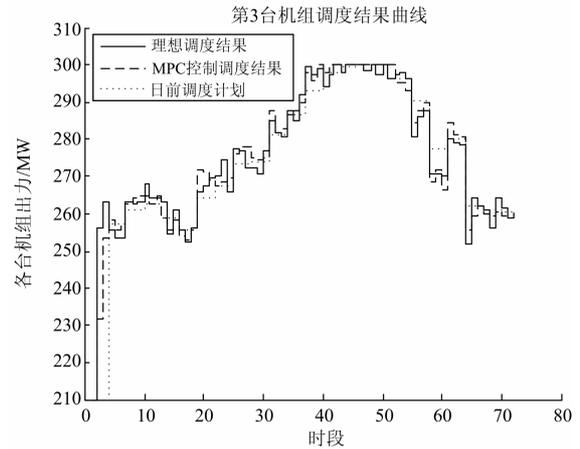


图5 第 3 台机组三种情况比较结果

Fig. 5 Comparison results under three cases of the third units

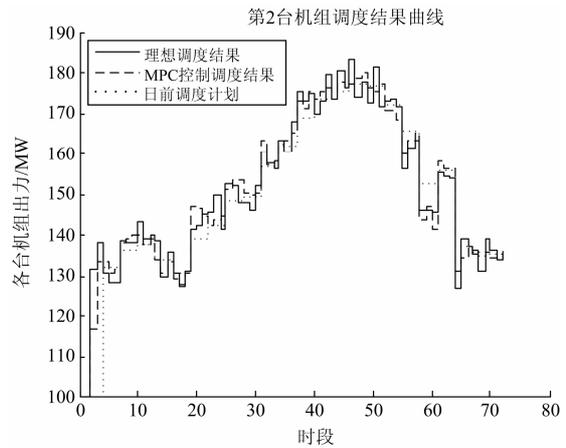


图6 第 2 台机组三种情况比较结果

Fig. 6 Comparison results under three cases of the second unit

以 II 和 III 两种情况下各时段各机组出力差值的绝对值作为比较依据,对其进行比较分析。在负荷上升阶段、负荷下降阶段和高峰负荷阶段三种不

同负荷变化趋势下, 各机组在 II 和 III 两种情况出力差值最大绝对值如表 2 所示。

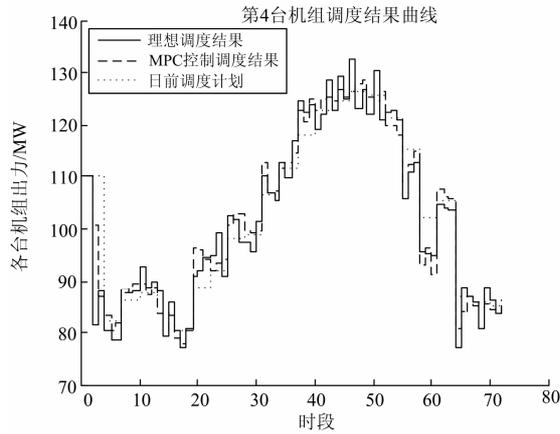


图 7 第 4 台机组三种情况比较结果

Fig. 7 Comparison results under three cases of the fourth unit

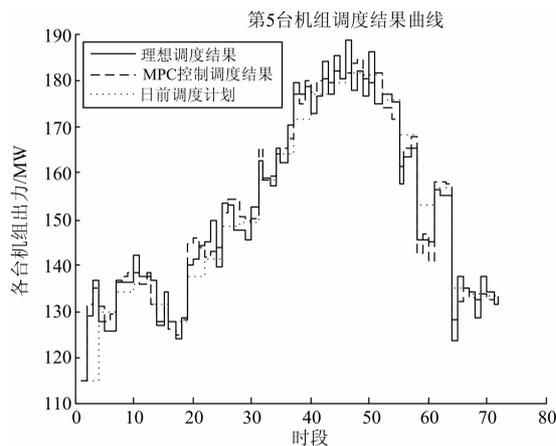


图 8 第 5 台机组三种情况比较结果

Fig. 8 Comparison results under three cases of the fifth unit

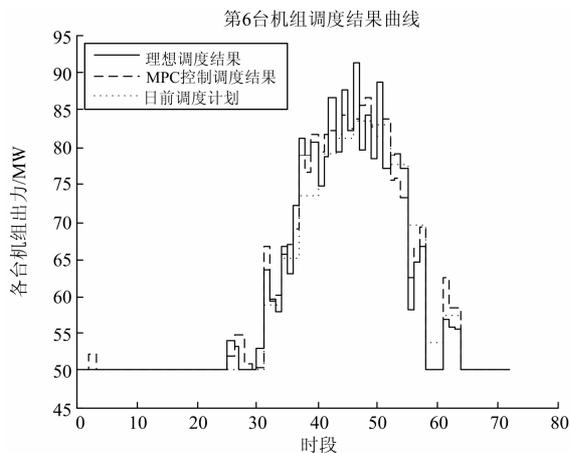


图 9 第 6 台机组三种情况比较结果

Fig. 9 Comparison results under three cases of the sixth unit

表 2 II 和 III 两种情况下各机组出力差异比较

Table 2 Each unit output difference comparison in the

II and III of the two cases						
机组	1	2	3	4	5	6
负荷上升阶段	7.60	5.80	5.79	5.70	6.67	4.86
负荷下降阶段	6.10	4.63	4.59	4.56	5.34	5.68
高峰负荷阶段	7.97	6.08	3.69	5.99	6.91	7.41

通过对调度结果的比较分析, 可以发现随负荷变化趋势不同, 其差异较小的情况均出现于负荷上升阶段(20-40 时段)和负荷下降阶段(55-65 时段); 除 3 号机组外, 其他机组两者差异较大的情况均出现于峰荷时段(40-55 时段)。由于 3 号机组在峰荷时段基本处于额定出力运行状态, 其已不具备调整空间, 其在 II 和 III 两种情况下基本一致。

在预测信息变化后按照本文方法得到的机组调度方案基本逼近理想调度方案, 尤其对于负荷变化趋势较大的上升阶段和下降阶段, 采用本文方法所得调度方案具有较强的适应性。

4 结论

针对多时间尺度的调度模式, 本文结合 MPC 理论提出了一种超短期调度策略, 该方法将实时调度和日前调度两个时间尺度联系起来, 利用滚动优化计算实时调整调度方案, 为实时调度和日前调度提供调整依据; 以 IEEE30 节点系统为例对本文方法进行仿真分析, 其结果表明该方法可以较好地应对调度过程中预测信息不确定对调度结果的影响。

参考文献

- [1] 杨佳俊, 雷宇, 龙淼, 等. 考虑风电和负荷不确定性的机组组合研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 63-70.
YANG Jiajun, LEI Yu, LONG Miao, et al. Study of unit commitment considering the uncertainty of wind farm and load[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 63-70.
- [2] 张宁宇, 高山, 赵欣. 一种考虑风电随机性的机组组合模型及其算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 22-29.
ZHANG Ningyu, GAO Shan, ZHAO Xin. An unit commitment model and algorithm with randomness of wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 22-29.
- [3] 江岳文, 温步瀛. 从调度模式经济性角度评估电网风电出力接纳能力[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(4): 54-60.
JIANG Yuewen, WEN Buying. Capability of accommodating wind power for different dispatching models based on economy[J]. Advanced Technology of

- Electrical Engineering and Energy, 2014, 33(4): 54-60.
- [4] 查浩, 石文辉. 协调电网接纳风电能力的概率优化调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 14-18.
ZHA Hao, SHI Wenhui. Study on power grid probabilistic optimal dispatch of coordinating wind power accommodation capability[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 14-18.
- [5] 尹明, 王成山, 葛旭波, 等. 中德风电发展的比较与分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 157-162.
YIN Ming, WANG Chengshan, GE Xubo, et al. Comparison and analysis of wind power development between China and Germany[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 157-162.
- [6] 郑太一, 范国英, 孙勇, 等. 大规模风电接入电网多目标电源的协调控制[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3091-3095.
ZHENG Taiyi, FAN Guoying, SUN Yong, et al. A coordinated control strategy for multiple power sources under grid-integration of large-scale wind farm[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3091-3095.
- [7] 马瑞, 康仁, 姜飞, 等. 考虑风电随机模糊不确定性的电力系统多目标优化调度计划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 150-156.
MA Rui, KANG Ren, JIANG Fei, et al. Multi-objective dispatch planning of power system considering the stochastic and fuzzy wind power[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 150-156.
- [8] 陈之栩, 李丹, 梁吉, 等. 华北电网日内发电计划及实时调度系统[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 54-57.
CHEN Zhixun, LI Dan, LIANG Ji, et al. Intraday generation plan and real-time dispatch system of north china grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 54-57.
- [9] 韩学山, 柳焯. 一种实用的电力系统在线动态经济调度模型[J]. 中国电力, 2002, 35(9): 28-32.
HAN Xueshan, LIU Zhuo. A practical model of on-line dynamic economic dispatching in power system[J]. Electric Power, 2002, 35(9): 28-32.
- [10] 娄素华, 王志磊, 吴耀武, 等. 基于机会约束规划的含大规模风电电力系统协调经济调度[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 337-345.
LOU Suhua, WANG Zhilei, WU Yaowu, et al. Coordinated economic dispatch for power system with significant wind power generation based on chance-constrained programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 337-345.
- [11] BASU M. Particle swarm optimization based goal-attainment method for dynamic economic dispatch[J]. Electric Power Component System, 2006, 34(9): 1015-1025.
- [12] BASU M. Dynamic economic emission dispatch using evolutionary programming and fuzzy satisfied method[J]. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2007, 8(4): 1-15.
- [13] BASU M. Dynamic economic emission dispatch using nondominated sorting genetic algorithm-II[J]. Electric Power Components and Systems, 2008, 30(2): 140-149.
- [14] SONG Y H, YU I K. Dynamic load dispatch with voltage security and environmental constrains[J]. Electric Power Systems Research, 1997, 13(1): 53-60.
- [15] ALSUMAIT J S, QASEM M, SYKULSKI J K, et al. An improved pattern search based algorithm to solve the dynamic economic dispatch problem with value point effect[J]. Energy Conversion Management, 2010, 51(10): 2062-2067.
- [16] 李勇, 王建君, 曹丽华. 考虑电网调度实时性要求的机组负荷优化分配[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(32): 122-127.
LI Yong, WANG Jianjun, CAO Lihua. Optimal load dispatch of units considering the real-time demand of power network dispatching[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(32): 122-127.
- [17] QIN S J, BADGWELL T. A survey of industrial model predictive control technology[J]. Control Engineer Practice, 2003, 11(7): 733-764.
- [18] OTOMEGA B, MARINAKIS A, GLAVIC M, et al. Model predictive control to alleviate thermal overloads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1384-1385.
- [19] CAMACHO E F, BORDONS C. Model predictive control[M]. 2nd Edition. New York, USA, Springer, 2004.
- [20] GALLESTEYE, STOTHERTA, ANTOLNE M. et al. Model predictive control and the optimization of power plant load while considering lifetime consumption[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(1): 186-191.
- [21] CAMPONOGARA E, JIA D, KRODH B H, et al. Distributed model predictive control[J]. IEEE Control Systems, 2002, 22(1): 44-52.

收稿日期: 2014-10-20; 修回日期: 2014-12-01

作者简介:

杨冬锋(1976-), 男, 博士研究生, 副教授, 研究方向为电力系统运行分析、风力发电等; E-mail: ydfnedu@126.com

周苏荃(1958-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析、电力系统状态估计等;

魏剑啸(1968-), 男, 工程师, 研究方向为电力系统分析及及其自动化。

(编辑 姜新丽)