



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105046395 A

(43) 申请公布日 2015. 11. 11

(21) 申请号 201510250844. 6

(22) 申请日 2015. 05. 15

(71) 申请人 华南理工大学

地址 510641 广东省广州市天河区五山路  
381 号

(72) 发明人 陈皓勇 禩培正

(74) 专利代理机构 北京中海智圣知识产权代理  
有限公司 11282

代理人 李奎书

(51) Int. Cl.

G06Q 10/06(2012. 01)

G06Q 50/06(2012. 01)

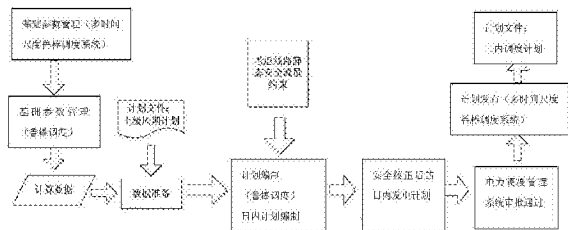
权利要求书2页 说明书13页 附图5页

(54) 发明名称

一种含多类型新能源的电力系统日内滚动计划编制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种含多类型新能源的电力系统日内滚动计划编制方法,包括:步骤1:根据编制要求确定约束条件、优化目标和相应算法选项;步骤2:建立基于鲁棒调度的日内滚动模型;步骤3:通过采用多时间尺度的电力系统鲁棒调度系统的静态安全校核服务以实现鲁棒调度日内计划的静态安全校核;步骤4:采用多时间尺度的电力系统鲁棒调度系统将经过安全校核的滚动调度计划以文件方式或者自动发布的方式发布到能量管理系统;本发明的优点是:(1)降低了新能源的不确定性对电网的冲击作用;(2)保证了系统具备消化新能源不确定性的能力,使调度方案具有较强的鲁棒性;(3)调度方式适应范围广(4)本发明兼具经济性和环保性。



1. 一种含多类型新能源的电力系统日内滚动计划编制方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤 1:为编制日内滚动计划准备输入数据,根据编制要求确定约束条件、优化目标和相应算法选项;

步骤 2:采用每小时滚动一次,调度周期为 4~6 小时的滚动策略,建立基于鲁棒调度的日内滚动模型,采用原始对偶内点算法或其他非线性规划算法求解调度模型;

步骤 3:通过采用多时间尺度的电力系统鲁棒调度系统的静态安全校核服务,实现鲁棒调度日内计划的静态安全校核,当出现支路或断面潮流越限时,采用安全校正算法调整发电计划以消除支路及断面的潮流约束;

步骤 4:采用多时间尺度的电力系统鲁棒调度系统将经过安全校核的滚动调度计划以文件方式或者自动发布的方式发布到能量管理系统,每小时发布 1 次日内滚动计划,包括未来 4~6 小时各常规机组的出力计划,时间分辨率为 15 分钟。

2. 根据权利要求 1 所述的一种含多类型新能源的电力系统日内滚动计划编制方法,其特征在于,所述能量管理系统是对现代电网调度自动化系统的总称,所述能量管理系统包括:计算机、操作系统、支撑系统、数据采集系统、能量管理和网络分析系统。

3. 根据权利要求 1 所述的一种含多类型新能源的电力系统日内滚动计划编制方法,其特征在于,所述能量管理系统具体包括以下模块:数据采集和监控系统模块、自动发电控制和经济调度控制模块、电力系统状态估计模块、安全分析模块、调度员模拟培训系统模块。

4. 根据权利要求 1 所述的一种含多类型新能源的电力系统日内滚动计划编制方法,其特征在于,所述步骤 1 中,为编制日内滚动计划准备基础数据,包括实时更新的负荷及新能源的超短期功率预测数据、各机组基本数据、网络参数、系统对负荷备用的需求;由于日内滚动计划是在日前计划的基础上作进一步修正,所以将日前计划的调度结果也作为输入数据;根据编制要求确定约束条件、优化目标和相应算法选项。

5. 根据权利要求 1 所述的一种含多类型新能源的电力系统日内滚动计划编制方法,其特征在于,所述步骤 2 中,日内滚动计划用于计算日内分时段调度计划,采用每小时滚动 1 次,调度周期为 4~6 小时的滚动策略,建立基于鲁棒调度的日内滚动模型,采用原始对偶内点算法或其他非线性规划算法求解调度模型。

6. 根据权利要求 1 所述的一种含多类型新能源的电力系统日内滚动计划编制方法,其特征在于,所述步骤 3 中,通过调用多时间尺度的电力系统鲁棒调度系统的静态安全校核服务,实现鲁棒调度日内计划的静态安全校核。当出现支路或断面潮流越限时,采用安全校正算法调整发电计划以消除支路及断面的潮流约束。

7. 根据权利要求 1 所述的一种含多类型新能源的电力系统日内滚动计划编制方法,其特征在于,所述步骤 4 中,实时计划用于计算未来 5 分钟发电计划,根据日内滚动出力计划、新能源超短期功率预测数据、超短期负荷预测数据、联络线计划,以平衡有功功率偏差最小为优化目标,调度 AGC 超前控制的计算服务,安排未来 5 分钟各 AGC 超前控制机组的出力。

8. 根据权利要求 1 所述的一种含多类型新能源的电力系统日内滚动计划编制方法,其特征在于,所述步骤 4 中,采用多时间尺度的电力系统鲁棒调度系统将经过安全校核的鲁棒调度计划以文件方式或者自动发布的方式发布到能量管理系统,每小时发布 1 次日内滚动计划,包括未来 4~6 小时各常规机组的出力计划,时间分辨率为 15 分钟。

9. 根据权利要求 1 所述的一种含多类型新能源的电力系统日内滚动计划编制方法,其特征 在于,所述多时间尺度的电力系统鲁棒调度系统,包括以下步骤:

步骤 (1)、将调度框架分为日前计划、日内滚动计划、实时计划三个时间尺度,搭建多时 间尺度的调度系统平台;

步骤 (2)、在已知机组初始状态、联络线交换计划及当天的开关状态的基础上,基于次 日负荷预测数据、新能源的短期预测数据进行日前计划编制,通过建立含水、火、风、气、光、 核、抽水蓄能多类型能源的鲁棒调度模型,优化出未来 24 个小时各机组的启停方案及出力 计划;

步骤 (3)、在日前计划的基础上,基于预测精度更高的超短期负荷预测及超短期新能源 功率预测进行日内滚动计划编制,采用每小时滚动一次,以 4~6 个小时为调度周期的滚动 模式,建立滚动调度模型,当采用日前计划的启停方案无法满足调峰要求时,需要根据最新 的新能源及负荷预测数据重新计算当前时段到最终时段的启停方案;

步骤 (4)、在日内滚动调度的基础上,基于超短期功率预测数据进行实时计划编制,进 一步细化调度方案,修正调度计划与预测结果的偏差,该部分偏差由参与 AGC 调整的火电 机组承担,从而减少其他 AGC 机组的调节负担,避免发电调整滞后于新能源及负荷的变化, 保证其他 AGC 机组具有足够的调节容量;

所述步骤 (1) 中,将调度框架分为日前计划、日内滚动计划、实时计划三个时间尺度, 搭建多时间尺度的调度系统平台,调度系统采用表现层、业务逻辑层、数据访问层三层架构 进行开发设计,表现层主要是 UI 设计,以客户端为外壳内嵌 web 的形式与用户形成友好交 互界面,用户根据自身的需求通过表现层提交请求,表现层针对用户的请求接受调用业务 逻辑层来作出响应,业务逻辑层通过数据访问层获取数据库中的数据,以此作为核心算法 库的必要数据输入,业务逻辑层再根据数据访问层获取的数据进入鲁棒计算,得出的结果 返回来表现层中,表现层再根据所获得的结果,以用户有需要的形式展现给用户,从而完成 鲁棒调度算法的展现,使得用户可以根据系统所作出的调度方案为参考进行实际电力调度 的实施,所述数据访问层主要是针对数据库的访问,对相关数据进行各项操作;

所述步骤 (2) 中,日前计划用于计算次日的分时段调度计划,根据新能源短期功率预 测、日前负荷数据、备用容量要求情况、联络线功率交换计划,安排各机组次日分时段 的启停方案和发电计划;

所述步骤 (3) 中,日内滚动计划用于计算日内分时段调度计划,根据日前调度结果、新 能源超短期功率预测数据、超短期负荷预测数据,安排各机组日内未来各时段的发电计划, 并实时滚动刷新发电计划。

## 一种含多类型新能源的电力系统日内滚动计划编制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种含多类型新能源的电力系统日内滚动计划编制方法，属于电力技术领域。

### 背景技术

[0002] 目前，随着全球气候变暖，生态环境的不断恶化，非可再生能源的消耗日益增长，发展新能源成了全球的热点，能源格局在世界范围内都正在发生着重大的变革。风电、光伏发电等新能源具有间歇性及随机性，无法对其进行有效控制，所以在电网调度过程中，一般直接将间歇性能源全额上网。但传统的电网经济调度建立在对负荷的准确预测上，以风电为代表的间歇性能源的功率预测精度远远低于负荷预测，并不能满足工程上的需求。因此，大规模间歇性能源并网后给传统电力系统经济调度带来了新的技术难题。

[0003] 传统的调度策略采用日前计划直接与自动发电控制 (AGC) 相结合的调度方法。日前计划是基于精度较低的短期功率预测进行的，因此，按日前计划安排次日的机组出力将产生较大的功率缺额，该功率缺额全部由 AGC 机组承担。当间歇性能源的渗透率较高时，容易出现 AGC 调节容量不足的情况，对系统的安全、经济运行造成影响。文献资料 1，张伯明、吴文传、郑太一发表在电力系统自动化，2011，35(1):1-6，名称为消纳大规模风电的多时间尺度协调的有功调度系统设计 [J] 提出一种消纳大规模风电的多时间尺度有功调度方法，即在日前计划与 AGC 之间加入日内滚动计划及实时计划两个时间尺度，实现多级协调，逐级优化的效果。基于文献资料 1 的调度框架。文献资料 2，沈伟、吴文传、张伯明发表在电力系统自动化，2011，35(22):136-140，名称为：消纳大规模风电的在线滚动调度策略与模型 [J]，具体描述了日内滚动计划的模型与策略。该方法为确定性的多时间尺度调度方法，能逐级降低新能源的不确定性对系统的冲击作用，但仍无法从理论上保证调度方案完全适应间歇性电源的不确定性。目前消纳间歇性电源的常规方法是留有足够的旋转备用，但足以保证系统安全的备用量不易精确获取。文献资料 3，周玮、彭昱、孙辉等发表在中国电机工程学报，2009. 29(25):13-18，名称为含风电场的电力系统动态经济调度 [J]；文献资料 [4] Aidan Tuohy, Peter Meibom, Eleanor Denny, Mark O' Malley. Unit Commitment for Systems With Significant Wind Penetration. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2):592-601；文献资料 5 Wang JH, Shahidehpour M, Li ZY, Security-constrained unit commitment with volatile wind power generation. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3):1319-1327；文献资料 6，龙军、莫群芳、曾建，发表在电网技术. 2011. 35(9):133-138，名称为：基于随机规划的含风电场的电力系统节能优化调度策略 [J]；文献资料 7，徐立中、杨光亚、许昭发表在电力系统自动化，2011，35(9):53-60，名称为：考虑风电随机性的微电网热电联合调度 [J]，采用随机优化技术处理间歇性能源的不确定性，但该方法需要知道间歇性能源出力的概率分布。近年来，鲁棒调度受到广泛关注。鲁棒调度综合考虑了系统可能出现的各种场景，通过建立鲁棒调度模型，寻找适应系统随机扰动的最优解即为鲁棒最优解。文献资料 8，叶荣，陈皓勇，

王钢等发表在电力系统自动化, 2010, 34(5):1-5, 名称为:多风电场并网时安全约束机组组合的混合整数规划解法 [J], 提出了一种基于极限场景法的鲁棒调度方式, 该方法很好地解决了当风电场数目变多时模型复杂度急剧上升的问题, 但是该文章涉及的能源结构较为简单, 且没有将鲁棒调度结果与传统调度结果进行对比。

## 发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供一种能够克服上述技术问题的含多类型新能源的电力系统日内滚动计划编制方法, 本发明能够减小新能源的不确定性对电网造成的影响并提高电网对新能源的消纳能力, 本发明一方面基于预测精度更高的超短期功率预测数据进行日内滚动计划编制, 与日前计划构成多时间尺度的调度方式, 逐级削减新能源的不确定性; 另一方面, 采用鲁棒调度方法从理论上保证系统具备消化新能源不确定性的能力。本发明适用于在风电间歇性电源大规模并网的情况下如何制定保证电网安全、经济运行的调度方案的领域。

[0005] 本发明一种含多类型新能源的电力系统日内滚动计划编制方法包括以下步骤:

[0006] 步骤 1: 为编制日内滚动计划准备输入数据, 根据编制要求确定约束条件、优化目标和相应算法选项;

[0007] 步骤 2: 采用每小时滚动一次, 调度周期为 4 ~ 6 小时的滚动策略, 建立基于鲁棒调度的日内滚动模型, 采用原始对偶内点算法或其他非线性规划算法求解调度模型;

[0008] 步骤 3: 通过采用多时间尺度的电力系统鲁棒调度系统的静态安全校核服务, 实现鲁棒调度日内计划的静态安全校核, 当出现支路或断面潮流越限时, 采用安全校正算法调整发电计划以消除支路及断面的潮流约束;

[0009] 步骤 4: 采用多时间尺度的电力系统鲁棒调度系统将经过安全校核的滚动调度计划以文件方式或者自动发布的方式发布到能量管理系统, 每小时发布 1 次日内滚动计划, 包括未来 4 ~ 6 小时各常规机组的出力计划, 时间分辨率为 15 分钟。

[0010] 所述能量管理系统 (EMS) 是对现代电网调度自动化系统的总称, 所述能量管理系统包括: 计算机、操作系统、支撑系统、数据采集系统、能量管理和网络分析系统。所述能量管理系统具体包括以下模块: 数据采集和监控系统模块 (SCADA 系统)、自动发电控制 (AGC) 和经济调度控制模块 (EDC)、电力系统状态估计模块 (State Estimator)、安全分析模块 (Security Analysis)、调度员模拟培训系统模块 (DTS)。

[0011] 所述步骤 1 中, 为编制日内滚动计划准备基础数据, 包括实时更新的负荷及新能源的超短期功率预测数据、各机组基本数据、网络参数、系统对负荷备用的需求; 由于日内滚动计划是在日前计划的基础上作进一步修正, 所以将日前计划的调度结果也作为输入数据; 根据编制要求确定约束条件、优化目标和相应算法选项。

[0012] 所述步骤 2 中, 日内滚动计划用于计算日内分时段调度计划, 采用每小时滚动 1 次, 调度周期为 4 ~ 6 小时的滚动策略, 建立基于鲁棒调度的日内滚动模型, 采用原始对偶内点算法或其他非线性规划算法求解调度模型, 所述步骤 2 具体步骤如下:

[0013] 1) 描述调度场景:

[0014] 对于含多类型电源的调度问题, 关键在于如何合理安排常规机组的备用来满足间歇性电源的不确定性, 以风电为例, 假设有  $J$  个风电场, 在某调度时段各风电场出现的一组

出力集合记为场景  $s_i$ , 即

$$[0015] \quad s_i = [P_w(1), \dots, P_w(j), \dots, P_w(J)] \\ (P_w(j) \in [P_{w,\min}(j), P_{w,\max}(j)]) \quad (1)$$

[0016] 其中,  $P_w(j)$ 、 $P_{w,\max}(j)$ 、 $P_{w,\min}(j)$  为第  $j$  个风电场的实际出力及其置信区间的上下限; 由于间歇性电源的出力在波动范围内是连续随机的, 假设有  $N_s$  个误差场景, 则  $N_s \rightarrow \infty$ , 记  $s_0$  为预测场景,  $S$  为误差场景集, 即  $S = [s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_{N_s}]$ ;

[0017] 在时段  $t$ , 假设间歇性电源的出力偏离预测值, 即发生误差场景  $s_i$ , 如果仍采用预测场景  $s_0$  下的发电计划  $P(s_0, t)$ , 系统将产生功率缺额。故应调整常规机组的出力, 调整后的发电计划为  $P(s_i, t)$ , 此时场景  $s_i$  下满足功率平衡。为保证对新能源具备足够强的跟随能力, 场景之间的过渡将受到爬坡速率的约束, 包括从预测场景过渡到任意一个误差场景以及任意两个误差场景之间的过渡。

[0018] 2) 建立调度模型:

[0019] 假设某电网的火电机组数为  $N(n = 1, 2, L, N)$ , 水电站个数为  $M(m = 1, 2, L, M)$ , 气电机组数为  $R(r = 1, 2, L, R)$ , 核电机组数为  $D(d = 1, 2, L, D)$ , 抽水蓄能电站个数为  $C(c = 1, 2, L, C)$ , 风电场个数为  $J(j = 1, 2, L, J)$ , 光伏电站个数为  $K(k = 1, 2, L, K)$ , 除风电、光伏以外, 其他机组统称为常规机组, 常规机组台数  $G = N+M+R+D(g = 1, 2, L, G)$ ; 调度周期为  $T(t = 1, 2, L, T)$ 。

[0020] 鲁棒调度的解为预测场景下最优并能适应所有的误差场景, 因此, 调度模型的目标为预测场景下的运行成本, 约束包括预测场景下的约束、误差场景下的约束、场景过渡的约束三个部分。

[0021] ①目标函数:

[0022] 目标函数采用预测场景下火电、气电、核电的运行成本之和。式 (2) 中,  $F_g(n, t)$ 、 $F_q(r, t)$ 、 $F_e(d, t)$  分别为时段  $t$  内火电机组  $n$ 、气电机组  $r$ 、核电机组  $d$  的运行成本, 其成本函数均以机组实际出力为决策变量的二次函数, 其系数通过实际运行或实验获得。

$$[0023] \quad \text{Min}: F = \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{n=1}^N F_g(n, t) + \sum_{r=1}^R F_q(r, t) + \sum_{d=1}^D F_e(d, t) \right] \quad (2)$$

[0024] ②预测场景下的约束:

$$[0025] \quad \sum_{n=1}^N P_g(n, t) + \sum_{m=1}^M P_v(m, t) + \sum_{r=1}^R P_q(r, t) + \sum_{d=1}^D P_e(d, t) + \\ \sum_{c=1}^C P_x(c, t) + \sum_{j=1}^J P_w(j, t) + \sum_{k=1}^K P_f(k, t) = P_L(t) \quad (3)$$

$$[0026] \quad P_x(c, t) = P_{x,\text{pm}}(c, t) + P_{x,\text{gen}}(c, t) \quad (4)$$

$$[0027] \quad \sum_{g=1}^G (P_{\max}(g) - P(g, t)) \geq P_L(t) \times L\% \quad (5)$$

$$[0028] \quad P_{\min}(g) \leq P(g, t) \leq P_{\max}(g) \quad (6)$$

$$[0029] \quad -R_d(g) \times T_{15} \leq P(g, t) - P(g, t-1) \leq R_u(g) \times T_{15} \quad (7)$$

$$[0030] \quad \sum_{t=1}^T P_v(m, t) \leq W_v(m) \quad (8)$$

$$\sum_{t=1}^T P_q(r, t) \leq W_q(r) \quad (9)$$

$$[0031] \quad W_{\min}(c) \leq W_0(c) - L(c) \times \Delta P_x(c, t) \leq W_{\max}(c) \quad (10)$$

$$[0032] \quad \Delta P_x(c, t) = \sum_{h=1}^t P_{x, \text{gen}}(c, h) - \eta \times \sum_{h=1}^t P_{x, \text{pm}}(c, h) \quad (11)$$

$$[0033] \quad \sum_{t=1}^T \Delta P(c, t) = 0 \quad (12)$$

$$[0034] \quad \left| \sum_{g=1}^G \gamma(g, l) P(g, t) + \sum_{g'=1}^{G'} \gamma(g', l) P(g', t) \right| \leq L(l) \quad (13)$$

[0035] 式 (3) 为功率平衡方程,  $P_g(n, t)$ 、 $P_v(m, t)$ 、 $P_q(r, t)$ 、 $P_e(d, t)$ 、 $P_x(c, t)$ 、 $P_w(j, t)$ 、 $P_f(k, t)$  分别为时段  $t$  内火电机组  $n$ 、水电站  $m$ 、气电机组  $r$ 、核电机组  $d$ 、抽水蓄能电站  $c$ 、风电场  $j$ 、光伏电站  $k$  的出力,  $P_L(t)$  为时段  $t$  的负荷; 抽水蓄能机组包含抽水、发电两种状态。当处于抽水状态时, 等效为一台运行的虚拟电动机, 输出功率为  $P_{x, \text{pm}}(c, t)$ ,  $P_{x, \text{pm}}(c, t) < 0$ 。当处于发电状态时, 等效为一台运行的虚拟发电机, 输出功率为  $P_{x, \text{gen}}(c, t)$ ,  $P_{x, \text{gen}}(c, t) > 0$ , 如式 (4) 所示。显然, 任意时刻最多只能有一台虚拟机在运行; 式 (5) 为旋转备用约束, 其中  $L\%$  为负荷对旋转备用的需求,  $P_{\max}(g)$  为常规机组  $g$  的出力上限; 式 (6)、式 (7) 分别为常规机组的上下限约束及爬坡速度约束,  $R_d(g)$ 、 $R_u(g)$  分别为常规机组  $g$  的向下、向上爬坡速度, 调度时段  $T_{15} = 15$  分钟。通常抽水蓄能机组为满功率抽水, 仅在发电状态时允许调节出力, 此时需满足上下限约束。水电机组及抽水蓄能机组调节速度快, 不考虑调节速率约束; 式 (8)、式 (9) 分别为水电站及气电厂的总电量约束, 由于水量、气量的限制, 水电站  $m$ 、气电厂  $r$  在调度周期内的允许发电量分别为  $W_v(m)$ 、 $W_q(r)$ ; 式 (10) 要求抽水蓄能电站的上水库在每个时段都应满足库容约束,  $W_0(c)$ 、 $W_{\min}(c)$ 、 $W_{\max}(c)$  分别为抽水蓄能电站  $c$  的初始库容及库容的上下限,  $\Delta P_x(c, t)$  为抽水蓄能电站  $c$  从初始时刻到  $t$  时刻的累积发电量, 与库容 - 电量转换系数  $L(c)$  相乘后表示  $t$  时刻的累积耗水量; 从式 (11) 知,  $\Delta P_x(c, t)$  是综合了抽水、发电两个过程的等效的累积发电量,  $\eta$  为抽水电站的转换效率, 一般取 80%; 式 (12) 表示抽水蓄能电站在整个调度周期内等效的累积发电量为零, 即要求调度结束后上水库恢复到初始水位; 式 (13) 为线路潮流约束,  $\gamma(g, l)$ 、 $\gamma(g', l)$  分别为常规机组  $g$ 、新能源机组  $g'$  在线路  $l$  上的功率分布因子,  $L(l)$  为线路流量限制。

[0036] ③ 误差场景下的约束;

[0037] 误差场景下的约束与预测场景下的约束相似, 区别在于式 (1)-(13) 的约束方程中, 各类型机组出力全部为误差场景下的出力。式 (14) 为误差场景  $s_i$  下满足功率平衡约束, 与式 (3) 对应,  $P_g(s_i, n, t)$  为误差场景  $s_i$  下时段  $t$  内火电机组  $n$  的出力, 同理得到误差场景下其余的约束方程, 此处不再赘述。

$$\begin{aligned}
[0038] \quad & \sum_{n=1}^N P_g(s_i, n, t) + \sum_{m=1}^M P_v(s_i, m, t) + \sum_{r=1}^R P_q(s_i, r, t) + \sum_{d=1}^D P_e(s_i, d, t) \\
& + \sum_{c=1}^C P_x(s_i, c, t) + \sum_{j=1}^J P_w(s_i, j, t) + \sum_{k=1}^K P_f(s_i, k, t) = P_L(t) \quad (14)
\end{aligned}$$

[0039] ④场景过渡约束；

$$[0040] \quad -R_d(g) \times T_c \leq P(g, t) - P(s_i, g, t) \leq R_u(g) \times T_c$$

$$[0041] \quad (15)$$

$$[0042] \quad (i = 1, 2, L, N_s ; g = 1, 2, \dots, G ; t = 1, 2, \dots, T)$$

$$[0043] \quad -R^d(g) \times T_c \leq P(s_i, g, t) - P(s_i', g, t) \leq R_u(g) \times T_c$$

$$[0044] \quad (16)$$

$$[0045] \quad (i, i' = 1, 2, L, N_s ; g = 1, 2, \dots, G ; t = 1, 2, \dots, T)$$

[0046] 式中,  $T_c$  为场景过渡时间 ; 式 (15) 要求系统在调整时间  $T_c$  内从预测场景下的运行点  $P(g, t)$  过渡到误差场景下的运行点  $P(s_i, g, t)$ 。式 (16) 要求系统在调整时间  $T_c$  内完成任意两个误差场景下运行点之间的过渡。

[0047] 3) 简化调度模型；

[0048] 为保证系统安全稳定运行, 发电计划需适应所有可能出现的误差场景。由于误差场景个数太多, 需要从中刷选出有效的场景, 否则无法进行计算。如果场景中每个新能源的出力都处于置信区间的上限或下限, 则称之为极限场景。证明只要调度模型的解能适应极限场景, 则必然能适应置信区间内所有的误差场景。换言之, 极限场景集在应对新能源的波动区间时具有完全的代表性。

[0049] 4) 日内滚动计划策略与模型；

[0050] 本发明采用的滚动计划的计算周期与超短期功率预测周期相同, 即周期为 4 ~ 6 小时。每个调度时段为 15 分钟, 即调度周期内共有 16 ~ 24 个调度时段。以 4 小时调度周期为例, 每小时滚动 1 次, 首次滚动为 1 ~ 4 小时, 第二次滚动为 2 ~ 5 小时, 以此类推。为实现该调度策略, 需在上述的调度模型上作如下两点补充：

[0051] ①第一次滚动计划与日前计划的偏差控制在一定的范围内, 第  $k (k > 1)$  次滚动计划与第  $k-1$  次滚动计划的偏差控制在一定的范围内。

$$[0052] \quad -\Delta P_{(1)}(g) \leq P_{(1)}(g, t) - P_{(0)}(g, t) \leq \Delta P_{(1)}(g) \quad (17)$$

$$[0053] \quad -\Delta P_{(k)}(g) \leq P_{(k)}(g, t) - P_{(k-1)}(g, t) \leq \Delta P_{(k)}(g) \quad (18)$$

[0054] 式中,  $P_{(0)}(g, t)$  为日前计划的机组出力值,  $P_{(1)}(g, t)$  为第一次滚动的机组出力值,  $\Delta P_{(1)}(g)$  为第一次滚动机组  $g$  的最大允许偏差 ; 式中,  $P_{(k)}(g, t)$  为第  $k$  次滚动的机组出力值,  $P_{(k-1)}(g, t)$  为第  $k-1$  次滚动的机组出力值,  $\Delta P_{(k)}(g)$  为第  $k$  次滚动的最大允许偏差值。

[0055] ②第  $k (k > 1)$  次滚动的首时段机组出力考虑爬坡率约束。即从第  $k-1$  次滚动的第 4 个时段过渡到第  $k$  次滚动的第 1 个时段时需要考虑爬坡率的约束。则有：

$$[0056] \quad -R_d(g) \times T_{15} \leq P_{(k)}(g, t=1) - P_{(k-1)}(g, t=4) \leq R_u(g) \times T_{15} \quad (19)$$

[0057] 式中,  $P_{(k)}(g, t=1)$  为第  $k$  次滚动时段 1 的出力,  $P_{(k-1)}(g, t=4)$  为第  $k-1$  次滚动时段 4 的出力。

[0058] 5) 采用原始对偶内点算法或其他非线性规划算法求解调度模型；

[0059] 日内滚动发电计划为在线计算, 对算法的计算速度要求较高。本发明采用具有二



阶收敛性的原始对偶内点算法或其他非线性规划算法求解调度模型。

[0060] 所述步骤 3 中,通过调用多时间尺度的电力系统鲁棒调度系统的静态安全校核服务,实现鲁棒调度日内计划的静态安全校核。当出现支路或断面潮流越限时,采用安全校正算法调整发电计划以消除支路及断面的潮流约束;所述步骤 3 的步骤具体为:

[0061] 1) 输入该次滚动的发电计划及相关基础参数;

[0062] 2) 调用多时间尺度的电力系统鲁棒调度系统的静态安全校核服务,实现鲁棒调度日内计划的静态安全校核;

[0063] 3) 判断是否出现支路或断面潮流越限情况,如果没有出现越限情况,则停止计算并输出发电计划;

[0064] 4) 采用安全校正算法调整发电计划,并返回步骤 1。

[0065] 其中,所述安全校正的模型如下所示:

[0066] 假设 L 条线路在时段 h 出现功率越限,则安全校正模型如下:以调整量最小为优化目标函数,如式 (20) 所示,式中  $\Delta P(g, h)$  为时段 h、机组 g 的出力调整量,  $\Delta P(g, h)$  大于 0 为增加出力,小于 0 为减小出力。约束方程包括:式 (21) 所示的功率平衡方程;式 (22) 所示的机组上下限约束;式 (23)、(24) 所示的爬坡率约束;式 (25) 所示的支路潮流约束,  $P_{l, \max}(i)$  为支路 i 的最大输出功率;式 (26) 所示的系统备用约束。

$$[0067] \quad \min f = \sum_{g=1}^G |\Delta P(g)| \quad (20)$$

$$[0068] \quad \sum_{g=1}^G \Delta P(g) = 0 \quad (21)$$

$$[0069] \quad P_{\min}(g) - P(g) \leq \Delta P(g) \leq P_{\max}(g) - P(g) \quad (22)$$

$$[0070] \quad -R_d(g) \times T_{15} - [P(g) - P(h-1, g)] \leq \Delta P(g) \leq R_u(g) \times T_{15} + [P(g) - P(g, t-1)] \quad (23)$$

$$[0071] \quad -R_d(g) \times T_{15} - [P(g) - P(g, t+1)] \leq \Delta P(g) \leq R_u(g) \times T_{15} + [P(g) - P(g, t+1)] \quad (24)$$

$$[0072] \quad -P_{l, \max}(i) - P_l(i) \leq \Delta P(i) \leq P_{l, \max}(i) - P_l(i) \quad (i = 1, 2, \dots, L) \quad (25)$$

$$[0073] \quad \sum_{g=1}^G (P_{\max}(g) - P(g, h)) \geq P_L(h) \times L\% \quad (26)$$

[0074] 所述步骤 4 中,采用多时间尺度的电力系统鲁棒调度系统将经过安全校核的鲁棒调度计划以文件方式或者自动发布的方式发布到能量管理系统,每小时发布 1 次日内滚动计划,包括未来 4 ~ 6 小时各常规机组的出力计划,时间分辨率为 15 分钟。

[0075] 所述多时间尺度的电力系统鲁棒调度系统,包括以下步骤:

[0076] 步骤 (1)、将调度框架分为日前计划、日内滚动计划、实时计划三个时间尺度,搭建多时间尺度的调度系统平台;

[0077] 步骤 (2)、在已知机组初始状态、联络线交换计划及当天的开关状态的基础上,基于次日负荷预测数据、新能源的短期预测数据进行日前计划编制,通过建立含水、火、风、气、光、核、抽水蓄能多类型能源的鲁棒调度模型,优化出未来 24 个小时各机组的启停方案及出力计划;

[0078] 步骤 (3)、在日前计划的基础上,基于预测精度更高的超短期负荷预测及超短期新能源功率预测进行日内滚动计划编制,采用每小时滚动一次,以 4 个小时为调度周期的滚

动模式,建立滚动调度模型,当采用日前计划的启停方案无法满足调峰要求时,需要根据最新的新能源及负荷预测数据重新计算当前时段到最终时段的启停方案;

[0079] 步骤(4)、在日内滚动调度的基础上,基于超短期功率预测数据进行实时计划编制,进一步细化调度方案,修正调度计划与预测结果的偏差,该部分偏差由参与 AGC 调整的火电机组承担,从而减少其他 AGC 机组的调节负担,避免发电调整滞后于新能源及负荷的变化,保证其他 AGC 机组具有足够的调节容量。

[0080] 所述步骤(1)中,将调度框架分为日前计划、日内滚动计划、实时计划三个时间尺度,搭建多时间尺度的调度系统平台。调度系统采用表现层、业务逻辑层、数据访问层三层架构进行开发设计。表现层主要是 UI 设计,以客户端为外壳内嵌 web 的形式与用户形成友好交互界面,用户根据自身的需求通过表现层提交请求,表现层针对用户的请求接受调用业务逻辑层来作出响应。业务逻辑层通过数据访问层获取数据库中的数据,以此作为核心算法库的必要数据输入,业务逻辑层再根据数据访问层获取的数据进入鲁棒计算,得出的结果返回来表现层中,表现层再根据所获得的结果,以用户有需要的形式展现给用户,从而完成鲁棒调度算法的展现,使得用户可以根据系统所作出的调度方案为参考进行实际电力调度的实施,所述数据访问层主要是针对数据库的访问,对相关数据进行各项操作,其具体步骤为:

[0081] 1) 表现层的架构采取的是客户端 +WEB 网页嵌套的方式呈现,电网系统内部算法模块需要大量数据做交换,而且调用频繁,利用 C/S 模式专用性、交互性强,响应速度快等特点,在电网系统中能够达到高速、安全的数据交换,大大提高系统的实用性、安全性,对于信息量交换不大的模块,利用 B/S 模式能够及时的根据需求发布和获取信息。

[0082] 前端控制组件的主要功能是对客户端的 UI 进行设置,并提供数据输入接口和系统可更改参数的设置接口,通过界面的功能引导协助用户执行系统的各项功能、获取用户输入的各项信息、收集用户请求的处理信息并将各项信息通过计划执行管理器发送至服务端,服务端根据请求做出响应,回传处理后的信息到客户端,客户端根据用户所要的呈现方式对服务端返回的数据进行二次处理,形成表格、图形等多种形式反馈给用户。

[0083] 2) 业务逻辑层主要处于服务端,包括系统管理组件、系统安全组件、前端控制组件、核心算法库组件;①系统管理组件主要包括线程管理、网络通信管理、系统日志管理、事务管理、日常维护;②系统安全组件主要包括:应急处理、用户信息安全、数据安全;③核心算法组件包括:日前计划、日内计划、实时计划、算法选择控制器、算法库接口五个部份组成。

[0084] 3) 数据访问层所做的操作是直接访问数据库,对数据库中的内容进行添加、删除、修改、查找等操作,同时,数据访问层提供丰富的接口供业务逻辑层调用。

[0085] 所述步骤(2)中,日前计划用于计算次日的分时段调度计划,根据新能源短期功率预测、日前负荷数据、备用容量要求情况、联络线功率交换计划,安排各机组次日分时段的启停方案和发电计划,其步骤具体为:

[0086] 1) 前期准备:

[0087] 为编制日前计划准备基础数据,包括短期负荷预测数据、新能源短期功率预测数据、各机组的初始状态及基本参数、次日的开关状态及网络参数、系统对事故备用及负荷备用的需求;根据编制要求确定约束条件、优化目标和相应算法选项。

[0088] 2) 日前计划编制：

[0089] 日前计划编制为离线计算模块，具有足够的计算时间。在日前计划的调度模型中，考虑了机组启停状态的变化和支路及断面潮流约束，并采用鲁棒调度方式消化新能源出力的不确定性，建立起多场景、高维度、非线性的混合整数规划模型。

[0090] 首先，本发明根据新能源的实际出力将调度场景分为预测场景、误差场景、极限场景。预测场景指新能源出力等于其预测值。误差场景指新能源出力与预测值不相等，极限场景指各新能源出力均处于置信极限，预测场景只有一个，误差场景有无穷多个，而极限场景的个数取决于新能源的个数。

[0091] 其次，采用极限场景法识别有效场景。当发生某误差场景  $s_i$  时，在调整时间约束内通过调整常规机组的出力能使系统功率恢复平衡，则认为该调度方案能适应该误差场景  $s_i$ 。显然，为保证系统安全稳定运行，调度方案需适应可能出现的所有误差场景。由于误差场景无穷多个，需要从中刷选出有效的场景，否则无法进行计算；只要调度方案能适应极限场景，则必然能适应波动区间内所有的误差场景。因此，本发明将采用极限场景作为有效场景建立鲁棒调度模型。

[0092] 再次，建立含多类型新能源的鲁棒调度模型。鲁棒调度方式旨在满足两点：其一，预测场景下实现目标函数最优；其二，当发生误差场景  $s_i$  时，系统能在调整时间约束内过渡到与之对应的可行运行点  $P(s_i)$ 。本发明的调度模型以预测场景最优作为目标函数。约束方程包括：要求系统在预测场景及极限场景下均满足功率平衡并留有一定量的负荷备用及事故备用；要求预测场景及极限场景下各常规机组满足相应的物理特性约束，即各常规机组满足上下限约束，火电、气电、核电满足爬坡速率约束，气电、水电满足总电量约束，核电不停机并具备一定的调节能力，抽水蓄能机组在一定效率的基础上保证抽水满抽，发电可调两种工作状态；此外，为保证对新能源具有足够强的跟随能力，场景之间的过渡将受到爬坡速率的约束。

[0093] 最后，采用优化软件求解模型，得出次日的启停方案及发电计划。

[0094] 3) 日前计划发布：

[0095] 由多时间尺度的电力系统鲁棒调度系统将审批通过的鲁棒调度计划以文件方式或者自动发布的方式发布到 EMS 系统，每日凌晨时刻发布一次日前计划，包括次日各常规机组的启停方案及出力曲线，时间分辨率为 1 小时。

[0096] 所述步骤 (3) 中，日内滚动计划用于计算日内分时段调度计划，根据日前调度结果、新能源超短期功率预测数据、超短期负荷预测数据，安排各机组日内未来各时段的发电计划，并实时滚动刷新发电计划，其步骤具体为：

[0097] 1) 前期准备：

[0098] 为编制日内滚动计划准备基础数据，除了日前计划所需的基础数据外还包括实时更新的超短期负荷预测数据及超短期新能源功率预测数据，由于日内滚动计划是在日前计划的基础上作进一步修正，所以将日前计划的调度结果也作为输入数据；根据编制要求确定约束条件、优化目标和相应算法选项。

[0099] 2) 日内计划编制：

[0100] 日内计划为在线滚动计算，采用每小时滚动一次，周期为 4 ~ 6 小时的滚动策略，时间分辨率为 15 分钟，日内滚动计划是在日前计划给出的机组启停方案下进行的，采用基

于极限场景法的鲁棒调度方式安排常规机组出力,保证系统具备消化新能源不确定性的能力,因此,日内滚动模型是一个多场景、高维度、非线性的连续规划模型。

[0101] 首先,参照步骤(2)所述的极限场景法,根据超短期新能源功率预测数据,选择合适的置信区间,选取极限场景集作为有效场景。

[0102] 其次,在日内的时间尺度上建立滚动调度模型,滚动调度模型与日前计划的调度模型有如下几点区别:1、采用日前计划的启停方案,日内滚动计划不考虑机组启停变化;2、在线滚动计算对运算时间要求高,日内滚动模型不考虑支路及断面潮流约束,而是在编制日内滚动计划后加一个安全校核与校正环节;3、第一次滚动发电计划与日前计划的偏差控制在一定的范围内,第 $k(k>1)$ 次滚动发电计划与第 $k-1$ 次滚动发电计划的偏差控制在一定的范围内;4、第 $k(k>1)$ 次滚动的首时段机组出力考虑爬坡率约束。

[0103] 最后,采用原始对偶内点法或其他非线性规划算法求解日内滚动模型。

[0104] 3) 安全校核与校正环节:

[0105] 首先,通过调用多时间尺度的电力系统鲁棒调度系统的静态安全校核服务,实现鲁棒调度日内计划的静态安全校核;其次,基于交流潮流算法,利用网络拓扑结构数据、发电计划数据、节点负荷预测数据以及检修计划数据,计算该滚动计划的系统潮流,并根据安全限额数据,判断是否出现支路或断面潮流越限情况,当出现支路或断面潮流越限时,采用安全校正算法调整发电计划以消除支路及断面的潮流约束;最后,输出满足支路及断面潮流约束的日内滚动计划。

[0106] 4) 判断是否出现调峰不足:

[0107] 如果负荷及新能源出力的次日预测数据与超短期预测数据相差较大,采用日前计划的启停方案可能无法满足调峰要求,此时需重新计算从当前时段到最终时段的启停方案。假设出现调峰不足,则采用最新的功率预测数据,重新调用日前计划模块即可,修正启停方案后返回步骤(1)重新进行日内计划编制。

[0108] 5) 日内滚动计划发布:

[0109] 由多时间尺度的电力系统鲁棒调度系统将经过安全校核的鲁棒调度计划以文件方式或者自动发布的方式发布到EMS系统,每小时发布一次日内滚动计划,包括未来4个小时各常规机组的出力计划,时间分辨率为15分钟。

[0110] 所述步骤(4)中,实时计划用于计算未来5分钟发电计划,根据日内滚动出力计划、新能源超短期功率预测数据、超短期负荷预测数据、联络线计划,以平衡有功功率偏差最小为优化目标,调度AGC超前控制的计算服务,安排未来5分钟各AGC机组出力,其步骤具体为:

[0111] 1) 前期准备:

[0112] 为编制实时计划准备基础数据,除了日内滚动计划所需的基础数据外还包括日内滚动计划的调度结果,根据编制要求确定约束条件、优化目标和相应算法选项。

[0113] 2) 实时计划编制:

[0114] 实时计划为在线实时计算,采用周期为30分钟,时间分辨率为5分钟的调节策略,实时计划是在日内滚动计划的基础上对AGC机组出力方案的进一步优化。

[0115] 首先,准备日内滚动计划的出力计划、新能源超短期功率预测数据、超短期负荷预测数据、联络线计划,还有各AGC机组的调节模式和机组参数。

[0116] 其次,根据准备的数据和算法方案,计算出未来 5 分钟参与 AGC 调节的火电机组的出力增量。

[0117] 最后给出各 AGC 机组的调整情况。

[0118] 3) 实时计划发布:

[0119] 由节能发电调度技术支持系统将经过安全校核的鲁棒调度计划以文件方式或者自动发布的方式发布到 EMS 系统的 AGC 功能模块,每 5 分钟发布一次实时计划,包括未来 5 分钟各 AGC 机组的调整情况,时间分辨率为 5 分钟。

[0120] 本发明相对于现有技术具有如下的优点及效果:

[0121] (1) 本发明建立的含多类型新能源的日内滚动计划编制方法,在日前计划的基础上进行日内滚动计划编制,逐步降低了新能源的不确定性对电网的冲击作用,减小了 AGC 的调节难度;

[0122] (2) 采用鲁棒调度从理论上保证了系统具备消化新能源不确定性的能力,使调度方案具有较强的鲁棒性;

[0123] (3) 本发明综合考虑了水、火、风、气、光、核、抽水蓄能的多种能源结构,因此,本发明提出的调度方式适应范围广,能应用于含各种能源结构的实际电网;

[0124] (4) 本发明制定的有功调度策略兼具鲁棒性、经济性和环保性,适应当前安全生产、节能减排及环境保护的发展趋势。

#### 附图说明

[0125] 图 1 是本发明所述含多类型新能源的电力系统日内滚动计划编制方法的日内滚动计划编制功能流程图;

[0126] 图 2a、图 2b 分别是本发明所述含多类型新能源的电力系统日内滚动计划编制方法的单风场及双风场时选取极限场景集的示意图;

[0127] 图 3 是本发明所述含多类型新能源的电力系统日内滚动计划编制方法的日内滚动策略示意图;

[0128] 图 4 是本发明所述含多类型新能源的电力系统日内滚动计划编制方法的安全校核与校正的流程图;

[0129] 图 5 是本发明所述含多类型新能源的电力系统日内滚动计划编制方法的日前与日内时间尺度下间歇性电源的出力概率密度分布曲线示意图;

[0130] 图 6 是本发明所述含多类型新能源的电力系统日内滚动计划编制方法的风电功率预测曲线示意图;

[0131] 图 7 是本发明所述含多类型新能源的电力系统日内滚动计划编制方法的日内滚动计划结果示意图;

[0132] 图 8a、图 8b 分别是本发明所述含多类型新能源的电力系统日内滚动计划编制方法的不同调度方案下线路的潮流状况示意图。

#### 具体实施方式

[0133] 以下结合附图对本发明的实施方式做进一步详细说明。

[0134] 图 1 是日内滚动计划编制功能流程图。首先,为编制日内滚动计划准备输入数据,

根据编制要求确定约束条件、优化目标和相应算法选项；其次，制定滚动策略，建立基于鲁棒调度的日内滚动模型，采用原始对偶内点算法或其他非线性规划算法求解调度模型；再次，通过安全校核与校正环节调整发电计划以消除支路及断面的潮流约束；最后，由多时间尺度的电力系统鲁棒调度系统将经过安全校核的鲁棒调度计划以文件方式或者自动发布的方式发布到能量管理系统，每小时发布 1 次日内滚动计划，包括未来 4~6 小时各常规机组的出力计划，时间分辨率为 15 分钟。

[0135] 图 2a、图 2b 分别是单风场及双风场时选取极限场景集的示意图。如果场景中每个新能源的出力都处于置信区间的上限或下限，则称之为极限场景。通过极限场景法能简化鲁棒调度模型。

[0136] 图 3 是日内滚动策略示意图。本发明采用的滚动计划的计算周期与超短期功率预测周期相同，即周期为 4~6 小时。每个调度时段为 15 分钟，即调度周期内共有 16~24 个调度时段。以 4 小时调度周期为例，每小时滚动 1 次，首次滚动为 1~4 小时，第二次滚动为 2~5 小时，以此类推。图 3 所示为第二滚动的计算时段。

[0137] 图 4 是安全校核与校正的流程图。首先，通过调用多时间尺度的电力系统鲁棒调度系统的静态安全校核服务，实现鲁棒调度日内计划的静态安全校核；其次，基于交流潮流算法，利用网络拓扑结构数据、发电计划数据、节点负荷预测数据以及检修计划数据，计算该滚动计划的系统潮流，并根据安全限额数据，判断是否出现支路或断面潮流越限情况。当出现支路或断面潮流越限时，采用安全校正算法调整发电计划以消除支路及断面的潮流约束；最后，输出满足支路及断面潮流约束的日内滚动计划。

[0138] 以下是本发明所述含多类型新能源的电力系统日内滚动计划编制方法的一个实际算例，以 2014 年国内某省级电网为例进行仿真计算。

[0139] 其中，火电占 47.1%，气电占 11.4%，水电占 7.7%，核电占 15.4%，抽水蓄能占 3%，风电占 13.2%，光伏发电占 2.5%。算例包括 5 个风电场和 1 个光伏电站。图 5 是日前与日内时间尺度下间歇性电源的出力概率密度分布曲线。取 95% 的置信概率，新能源出力在日前时间尺度的波动区间为预测值的  $\pm 30\%$ ，新能源在日内时间尺度的波动区间为预测值的  $\pm 10\%$ 。给定实际出力，根据图 5 的概率分布特性生成的两个时间尺度的预测曲线如图 6 所示。

[0140] 日前计划优化出未来一天的机组启停方案及出力曲线，然后采用基于鲁棒调度的日内滚动计划作进一步计算。

[0141] 图 7 是日内滚动计划的计算结果。1) 核电出力保持为 800MW 的额定功率，承担部分基荷；2) 火电出力曲线较为平缓，避免频繁调整火电出力保持高效发电，与核电机组共同承担绝大部分的基荷；3) 气电机组的变化趋势与负荷一致，主要应对负荷曲线的陡坡变化；4) 水电机组负责应对新能源出力的随机性与负荷峰谷差，通过频繁调节水电机组出力保证系统功率平衡；5) 抽水蓄能在负荷高峰时发电，负荷低估时抽水，系统峰谷差由原来的 1563MW 削减为 1215MW，起到了削峰填谷的作用，如图 4 所示。这种含多类型能源联合调度的方式能优势互补，达到削峰平谷的效果并且提高了接纳新能源的能力。

[0142] (1) 经济性评估

[0143] 定义如下的五种调度方案：方案 1 为基于传统调度方法的日前计划，即单时间尺度，旋转备用容量为新能源预测出力的 30%；方案 2 在方案 1 的基础上进行基于传统调度方

法的日内滚动修正,即两时间尺度;方案3与方案2类似,但其旋转备用容量增大至新能源预测出力的60%,即两时间尺度;方案4为基于鲁棒机组组合的日前计划,即单时间尺度;方案5在方案4的基础上进行基于鲁棒调度的日内滚动修正,即两时间尺度。

[0144] 调度方案的鲁棒性通过弃风成本与切负荷成本衡量。弃风成本的计算式为  $F_w = f_w \times Q_w$ , 其中  $Q_w$  为弃风电量,  $f_w$  为单位弃风电量的损失成本。所损失的风电  $Q_w$  将由常规机组承担, 将  $f_w$  估算为常规机组的平均发电成本, 即  $f_w = 0.5 \text{RMB/MWh}$ 。缺电成本的计算式为  $F_m = f_m \times Q_m$ , 其中  $Q_m$  为切负荷量,  $f_m$  为单位切负荷量的损失成本。 $f_m$  的大小与负荷类型有关, 取  $f_m = 20 \text{RMB/MWh}$ 。则计及应对措施的总成本  $F' = F + F_w + F_m$ , 其中  $F$  为式1所示的发电成本。定义  $F_{em}$  为应对成本, 即  $F_{em} = F_w + F_m$ 。计算结果如表1所示。

[0145] 根据表1, 方案1与方案2预留相同的备用容量, 发电成本  $F$  相差不大。但日内滚动计划的预测曲线  $S_2$  偏离实际出力较小, 因此方案2的鲁棒性较强, 即弃风量及切负荷量较小,  $F_{em}$  较方案1小; 方案4与方案5均采用鲁棒调度方式满足新能源在置信区间内的波动,  $F_{em}$  均较小。与方案4相比, 方案5的预测精度高, 误差场景个数少, 松弛了约束条件, 使调度的经济性得到改善。综上, 多时间尺度的调度策略能降低传统调度的应对成本  $F_{em}$  和鲁棒调度的发电成本  $F$ 。

[0146] 与方案2相比, 方案5的经济性较差, 但鲁棒调度能较好地避免弃风及切负荷带来的成本损失, 因此计及应对措施的总成本较低, 即  $F_5 > F_2$ ,  $F'_5 < F'_2$ 。此外, 方案3通过直接增加备用容量也能获得较好的鲁棒性, 但足够保证系统安全的备用容量不易精确计算。本发明提出的鲁棒调度方法在全时段统一优化机组旋转备用和出力, 跟踪间歇性能源波动的爬坡备用, 实现了对不同时段备用之间关系的精细优化。因此, 方案5的优化结果比方案3好, 即  $F_5 < F_3$ ,  $F'_5 < F'_3$ 。综上, 计及弃风及切负荷措施时, 方案5的经济效益最好。

[0147] 表1 五种调度方案的比较

[0148]

方案编号	$Q_w$ (MWh)	$Q_m$ (MWh)	$F_{em}$ (RMB)	$F$ (RMB)	$F'$ (RMB)
1	8.94	39.77	83937	6870493	6954432
2	3.22	17.97	37516	6875418	6912933
3	1.36	5.52	11709	6900090	6911803
4	0.55	0.32	914	6911809	6912725
5	0	0.23	459	6890338	6890796

[0149] (2) 线路的安全性评估

[0150] 以线路  $l_1$  为例分析调度方案的安全性。设置  $l_1$  的最大功率传输功率为 300MW, 使  $l_1$  的潮流约束起作用。当新能源出力为预测值时, 上述五种方案均能满足线路潮流约束。为方便比较调度方案的安全性, 定义  $\delta(l_1, t)$  为  $l_1$  在  $t$  时刻的潮流裕度,  $\delta_{sum}(l_1)$  为  $l_1$  在所有时段的潮流裕度之和, 如式 27、式 28 所示。其中,  $P_{l,max}(l_1)$  为  $l_1$  的有功传输极限,  $P_l(l_1, t)$  为  $l_1$  在  $t$  时刻的有功传输功率。

[0151] 
$$\delta(l, t) = \frac{P_{L,max}(l) - P_l(l, t)}{P_{L,max}(l)} \quad (27)$$

$$[0152] \quad \delta_{sum}(l) = \sum_{t=1}^T \delta(l, t) \quad (28)$$

[0153] 预测场景下五种调度方案的线路潮流裕度如表 2 所示。方案 1、方案 2 与方案 3 的总裕度较小,当负荷高峰时  $l_1$ 潮流触界,无法保证新能源出力波动后潮流不越限;方案 4 的总裕度最大,负荷高峰时也具有足够的调节裕度,能应对新能源较大的出力波动;方案 5 留有一定量的潮流裕度,应对新能源较小的出力波动。

[0154] 表 2 五种调度方案的线路裕度比较

[0155]

方案编号	$\delta(l_1, t)$ 峰荷时段	$\delta_{sum}(l_1)$
1	0	12.14
2	0	11.39
3	0	11.33
4	0.23	31.14
5	0.07	18.86

[0156] 考虑新能源为实际出力的线路潮流情况,图 8a、图 8b 分别是不同调度方案下线路  $l_1$ 的潮流状况。方案 1、方案 2、方案 3 在某些时段都出现了潮流越限,因此传统调度方式即使留有足够的备用也无法保证线路的实际潮流不越限;方案 4 与方案 5 均能保证  $l_1$ 在各时段潮流不越限,但方案 5 付出的经济代价更低。

[0157] 由以上实施方式示例证明:1) 传统调度方法的鲁棒性较差,考虑弃风及切负荷的总成本较高,即使留有足够的备用也无法保证线路的实际潮流不越限;2) 鲁棒调度方法经济性较差,鲁棒性较强,能较好地避免弃风及切负荷带来的成本损失,总成本比传统调度方法小,能保证线路的实际潮流不越限;3) 采用多时间尺度的调度方法能降低新能源的不确定性对系统的影响,两时间尺度的鲁棒调度框架(即方案 5)的总成本最低,并能保证线路的潮流安全,体现了该策略在应对新能源的不确定性时具有优越性。

[0158] 上述实施例为本发明较佳的实施方式,但本发明的实施方式并不受上述实施例的限制,其他的任何未背离本发明的精神实质与原理下所作的改变、修饰、替代、组合、简化,均应为等效的置换方式,都包含在本发明的保护范围之内。



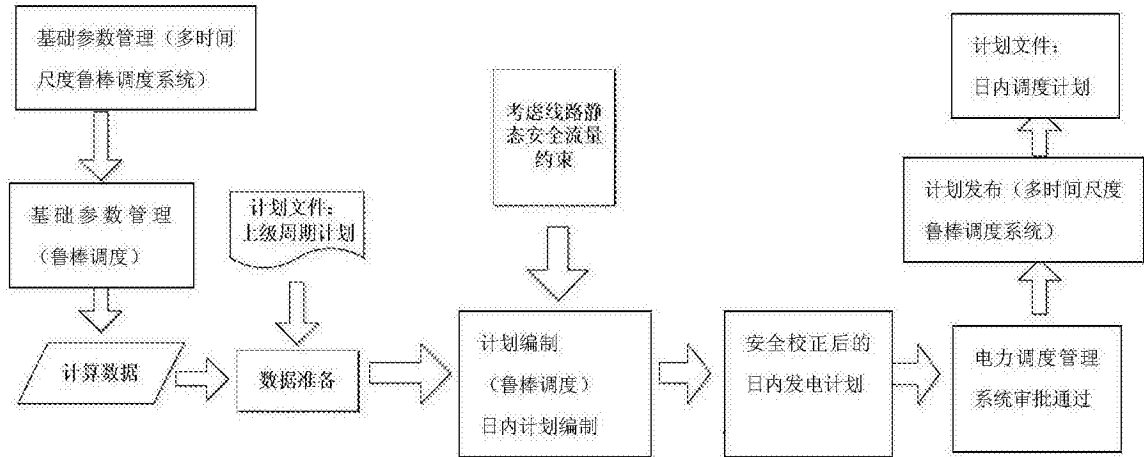


图 1

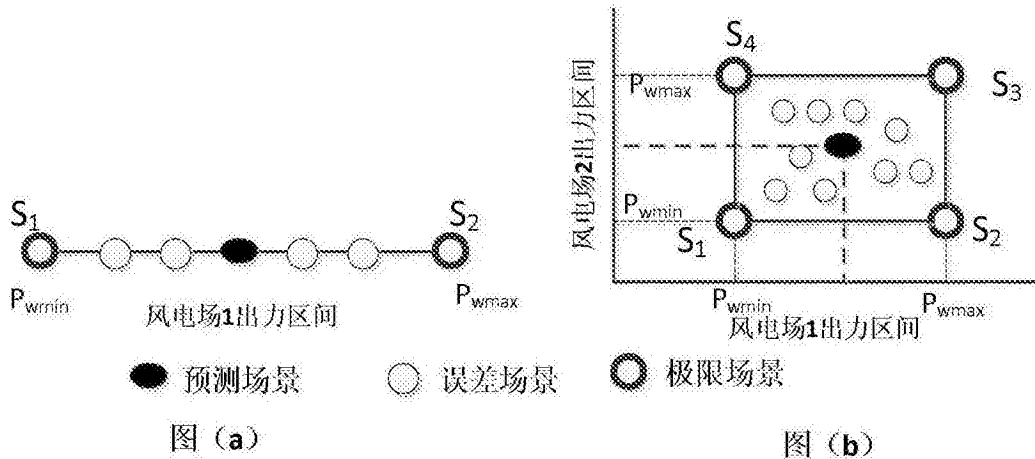


图 2

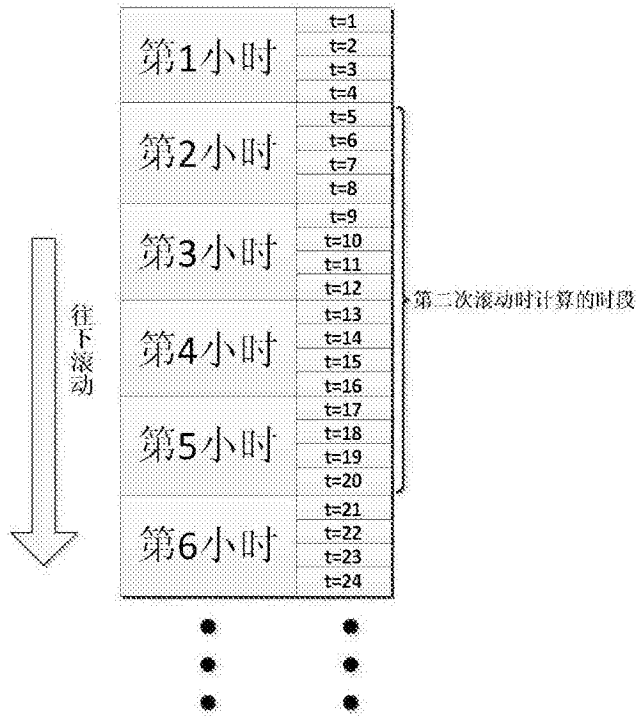


图 3

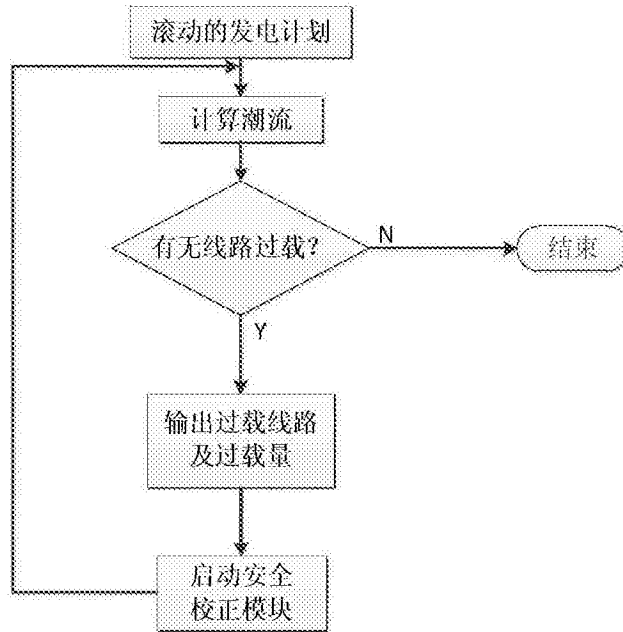


图 4

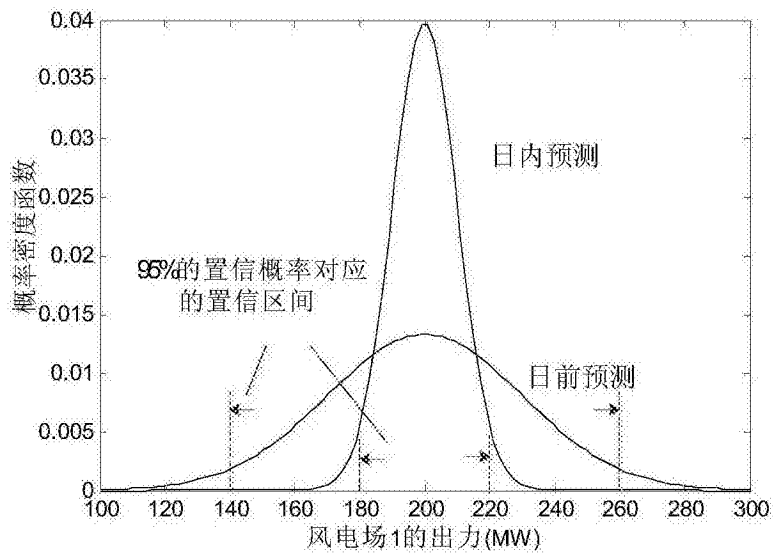


图 5

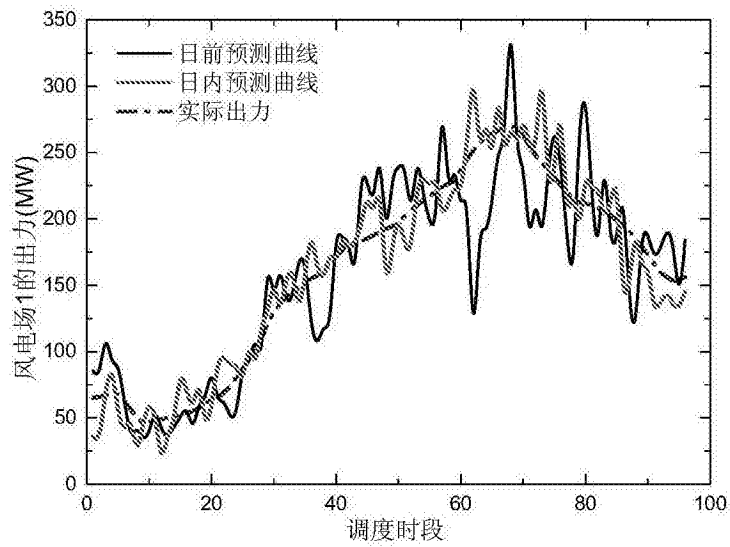


图 6

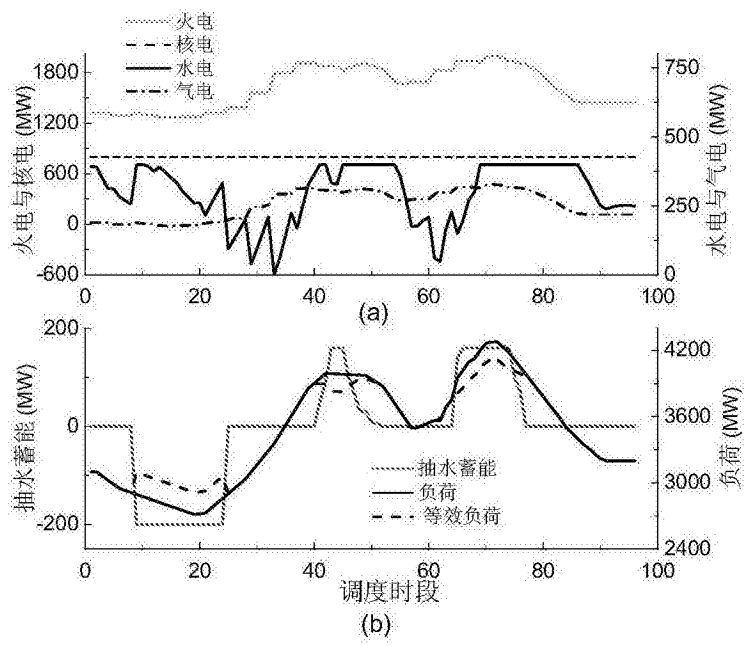


图 7

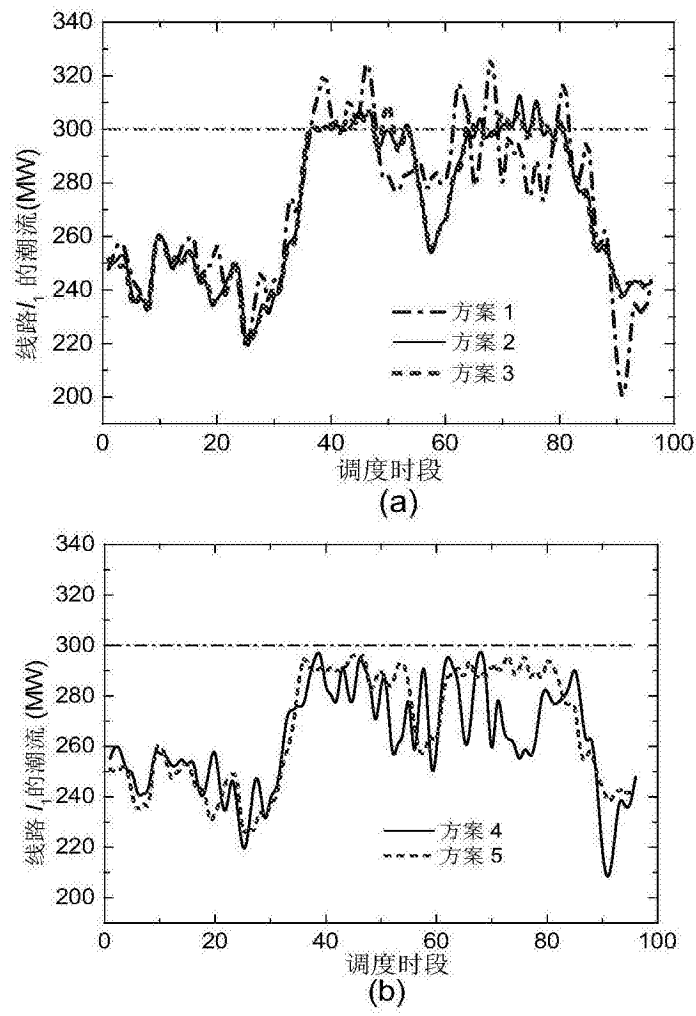


图 8