

大规模风电接入下的机组组合最优校正策略

不断增大的风电并网容量对电网消纳风电提出了重大挑战，尤其在以火电机组为主的发电运行环境下，不考虑起停优化的日发电计划编制流程加剧了风电接纳的难度。提出了一种日前发电计划阶段的机组组合最优校正策略，可以在调整机组出力无法满足风电消纳的情况下，进一步有序调整机组的组合状态来接纳风电，从而提升了机组组合对大规模风电接入的适应性。实际系统算例分析证明了算法的有效性，在此基础上开发的调度计划系统已成功应用于某省级电网。

李利利 丁 怡 涂孟夫 戴则梅/国电南瑞科技股份有限公司



李利利/工程师

风力发电具有无污染、零消耗等显著优点，成为应对能源危机与气候变化的有效途径，近年来在世界范围内得到快速发展。与常规电源相比，风电出力具有间歇性、不完全可预测性和低可控性等调度运行特点^[1]。这些特点要求风电并网后大量利用常规电源进行相应的调整配合，来保证全系统功率平衡与电网安全^[2]。

相对国外，我国的电源结构以大火电为主，日前发电计划编制基本不考虑起停优化，而是在中长期机组组合确定的开停机基础上，进行出力分配^[3]。大规模低可控性的风电接入，使得满足系统平衡与电网安全的前日发电计划编制难度加大^[4]。在负荷低谷时段因风电出力水平过高而导致调峰困难，或因风电出力水平过高而导致输电线路功率越限时，往往需要限制风电出力，从而影响

风电消纳水平^[5, 6]。

因此，为满足大规模风电接入电网的要求，在中长期机组组合与短期出力分配之间，需要架起一座桥梁。通过日前发电计划阶段基于短期风功率预测的机组组合再调度，拓展短期发电计划优化空间，提升电网消纳风电能力。

为此，本文在分析目前国内发电调度流程的基础上，建立了适应大规模风电接入的机组组合校验模型，以判断当前开停机方案能否满足大规模风电并网需求，并进一步基于线性加权惩罚函数提出了机组组合状态的最优校正策略，可以在校验结果的基础上有序调整部分机组起停来提升风电接纳能力。实例分析表明文中所述策略切实可行且有效。

目前国内调度计划主要流程

发电计划的关键内容为机组的起停优化与出力分配^[7]。中国是以火电机组为主的国家，随着节能发电调度的实施，逐步淘汰了高耗能的小火电机组，形成了以大火电机组为主的发电运行环境。火电机组的起停费用高昂，且起停过程复杂，决定了机组不宜采用频繁起停优化的调度经营模式^[8]。

因此，目前国内调度计划的主要流程，从时序上进行区分，在中长期范围内，采用中长期安全约束机组组合（SCUC）优化确定每日的机组起停方案，满足系统充裕性需求；在短期范围内，不再考虑起停优化，在确定的开停机基础上，采用安全约束经济调度

关键词/Keywords

日前发电计划·
机组组合·
风电·
松弛约束·
组合状态调整·

国家自然科学基金项目（51177019），国家高技术研究发展计划（863计划）资助项目（2011AA05A118）。

(SCED) 优化决策日前各时段机组有功计划, 满足系统可靠性需求, 如图1所示。

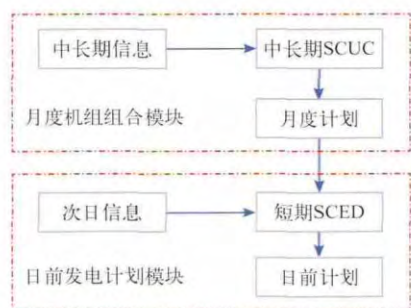


图1 调度计划流程

机组组合在中长期范围内编制, 目前在此时间跨度内尚无有效的风电预测数据支撑, 因此机组组合优化一般不考虑风电。日前发电计划阶段在确定的开机方式基础上分配有功出力。随着低可控性风电渗透率的不断提高, 受系统电力平衡及电网安全因素的影响, 中长期范围内确定的开停机方案往往难以满足日前阶段的风电并网需求。当前技术手段主要通过弃风来实现发电计划的顺利编制, 从而造成风电接纳受限^[9]。为此, 要求在短期发电计划编制阶段考虑机组组合状态的调整, 以提升电网风电接纳能力。

机组组合适应性校验

适应性校验主要用于检验初始开停机方案在预测风功率全部并网条件下是否具有可行性。不可行性主要由电网的安全问题所导致, 表现在违反了发用电平衡约束或运行约束。为此, 引入非负的松弛变量 S_{1t} 、 S_{2t} 、 S_{3t} 和 $S_{4n,t}$ 以保证优化问题的可行性, 优化目标为松弛变量之和最小。机组组合适应性的校验模型如下

$$\min v^s = \sum_{t=1}^{NT} (S_{1t} + S_{2t} + S_{3t}) + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{n=1}^{NN} S_{4n,t} \quad (1)$$

约束条件为

$$\sum_{i=1}^{NG} p_{i,t} + \sum_{w=1}^{NW} p_{w,t} + S_{1t} - S_{2t} = L_t \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{NG} r_{i,t} + S_{3t} \geq R_t \quad (3)$$

$$\left| \sum_{m \in M} [p_{m,t} - l_{m,t}] S_{m,n,t} \right| - S_{4n,t} \leq p_{n,\max} \quad (4)$$

$$-\Delta_i \leq p_{i,t} - p_{i,t-1} \leq \Delta_i \quad (5)$$

$$p_{i,\min} u_{i,t} \leq p_{i,t} \leq p_{i,\max} u_{i,t} \quad (6)$$

式中, NT 为调度期间的时段数; NN 为电网监视元件数目; NG 为常规机组数; NW 为风电机组数; $p_{i,t}$ 为常规机组 i 在时段 t 的出力; $p_{w,t}$ 为风电机组 w 在时段 t 的出力; L_t 为系统 t 时的总负荷; $r_{i,t}$ 为常规机组在时段 t 提供的旋转备用; R_t 为系统在时段 t 的旋转备用需求; $p_{i,\max}$ 和 $p_{i,\min}$ 分别为发电电动机 i 输出功率的上下限; $u_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的组合状态; Δ_i 为机组 i 每时段爬坡速率的最大值; $p_{n,\max}$ 为支路 n 的潮流上限; M 为电网计算节点集合; $p_{m,t}$ 为节点 m 的发电注入量; $l_{m,t}$ 为节点 m 的负荷注入量; $S_{m,n,t}$ 为节点 m 的注入功率对支路 n 的灵敏度。式(2)为系统功率平衡约束, 式(3)为系统旋转备用约束, 式(4)为电网安全约束, 式(5)为机组爬坡速率约束, 式(6)为机组出力上下限约束。

若校验模型的目标结果为正值, 表明在当前机组组合方案下, 调整机组出力难以满足预测风功率并网需求。日前发电调度不改变机组组合状态, 若开停机方案不合理, 会导致安全约束经济调度优化模型无解, 并造成弃风现象, 将会对调度运行带来极大的干扰。因此, 本文在校验模型的基础上, 加入机组出力限值的松弛约束, 在日前发电调度中实现机组组合状态的调整。

机组组合校正

机组组合校正的主要功能是: 在对初始开停机方案进行适应性校验后, 如果当前起停方案无法满足预测风功率并网的需求, 则对机组起停进行修正, 给出机组组合的最优调整策略。

1. 松弛约束模型

在模型中对机组出力上、下限进行松弛, 引入非负松弛变量 $p_{u,i,t}$ 和 $p_{d,i,t}$, 将式(6)改写为

$$p_{i,t} \leq p_{i,\max} u_{i,t} + p_{u,i,t} \quad (7)$$

$$p_{i,t} \geq p_{i,\min} u_{i,t} - p_{d,i,t} \quad (8)$$

同时, 在优化目标中增加惩罚分量

$$\sum_{i=1}^{NG} \sum_{t=1}^{NT} p_{u,i,t} + \sum_{i=1}^{NG} \sum_{t=1}^{NT} p_{d,i,t} \quad (9)$$

根据上述模型，通过松弛，若机组状态为停机但存在出力，可以认为此机组需要开机以满足约束；若机组状态为开机但出力低于下限，可以认为此机组需要停机以满足约束要求。

进一步，为避免出现开机机组出力高于其上限、停机机组出力为负值的不合理情况，将式（7）、式（8）改写为

$$p_{i,t} \leq p_{i,\max} u_{i,t} + p_{u,i,t} (1 - u_{i,t}) \quad (10)$$

$$p_{i,t} \geq p_{i,\min} u_{i,t} - p_{d,i,t} u_{i,t} \quad (11)$$

2. 校验模型重构

增加机组出力上下限的松弛，可以改善系统发电的灵活性，恢复日前发电计划在大规模风电并网条件下的可行性。因此，该约束条件的松弛能够取代校验模型中的松弛条件。

但在有些情况下，由于输电通道受限等原因，即使调整了机组组合状态，仍可能无法实现风功率的全部并网，造成优化模型无解。为此，在增加对出力上下限的松弛的基础上，保留适应性校验模型中的松弛约束，来提高算法鲁棒性。同时，引入具有明显差异的松弛惩罚系数 β_1 、 β_2 ，优先松弛出力上下限约束，以实现各类约束松弛的优先级控制。松弛约束优先级控制详见文献[10]，本文不再赘述。

校验模型目标函数可以改写为

$$\min v = \beta_1 v^s + \beta_2 \sum_{i=1}^{NG} \sum_{t=1}^{NT} (p_{u,i,t} + p_{d,i,t}) \quad (12)$$

式中， β_1 明显大于 β_2 。约束条件包括式（2）～式（5）、式（10）和式（11）。

3. 组合状态最优校正

如果优化机组出力能够满足发电计划的所有约束，为降低优化目标，可知所有松弛变量的优化结果为0；一旦有机组在某时段的 $p_{u,i,t}$ 或 $p_{d,i,t}$ 大于0，表示在仅改变机组出力的条件下，找不到满足所有约束的可行解，则需要调整机组的起停状态。

基于松弛约束模型，若优化后得到非零的 $p_{u,i,t}$ 和 $p_{d,i,t}$ ，按下式确定机组组合调整措施

$$u_{i,t} = \begin{cases} 0 \rightarrow 1 & p_{u,i,t} > 0 \\ 1 \rightarrow 0 & p_{d,i,t} > 0 \end{cases} \quad (13)$$

然而，在求解中可能会出现为满足风电接入下的平衡约束，同时松弛了多台机组出力约束，但松弛量均很小的情况。这是由于优化目标中各机组的松弛惩罚因子相同，导致松弛量在机组间的随机分配。而同时调整多台机组的组合状态又不太合理。文献[11]采用按松弛变量值由大到小的原则，逐步调整机组的组合状态。但该方法并未避免分配的随机性，逐步迭代调整的过程中容易产生解的振荡。

为避免机组组合校正过程中，在同类机组间的松弛量分配存在的随机性，并尽量减少机组松弛的个数，需要构造合适的松弛罚函数。在运筹学领域，平方根罚函数^[12]与线性加权罚函数^[13]可以实现此应用需求。

平方根罚函数是对每一个机组的松弛量计算二次方根，然后将所有松弛量求和后作为罚函数

$$\min v = \beta_1 v^s + \beta_2 \sum_{i=1}^{NG} \sum_{t=1}^{NT} (\sqrt{p_{u,i,t}} + \sqrt{p_{d,i,t}}) \quad (14)$$

该函数对各机组松弛量的微增曲线为递减形式，在决策方向为最小化的优化模型中，它的优化效果与平方惩罚函数相反，其尽可能使松弛量趋于集中，从而实现机组状态的调整数目最少。但优化模型中加入平方根惩罚函数后，原始问题的性质由线性规划转变为非线性规划，实际应用时解的质量与求解效率往往难以保证。

线性加权惩罚函数是对各机组赋予一定的权系数 λ ，然后将所有松弛量加权求和后作为惩罚函数

$$\min v = \beta_1 v^s + \beta_2 \sum_{i=1}^{NG} \sum_{t=1}^{NT} (\lambda_1 p_{u,i,t} + \lambda_2 p_{d,i,t}) \quad (15)$$

该函数对各机组松弛量的微增曲线为固定值，通过不同的权系数实现了对机组的有效区分，其优化效果为按照权系数的大小逐个调整机组起停状态，避免松弛量趋于分散，从而尽可能减少所调整的机组数目。同时，加入线性加权惩罚函数后，模型仍然是一个线性规划问题，可以

利用成熟的求解器（如CPLEX）高效求解，计算准确度与计算速度能够满足应用要求。

采用线性加权惩罚函数模型，需要对调管范围内的所有机组设置对应的权系数，权系数小的机组将优先被调整。权系数的设置可以依据各调度机构的实际情况，赋予相应的物理意义。譬如，可以从经济性的角度参照机组的发电成本进行设置，或是从厂网和谐的角度参照各电厂的起停调整意愿进行设置。

实例分析

以国内某省级电力系统为例进行分析。系统包括40台统调（省调调度管辖）火电机组，总装机容量为10 700 MW；35台风电机组（每个风电场等值为1台风电机组），总装机容量为4 060 MW。

系统同时通过固定的联络线计划获取外部电力。在获得日前96点负荷与风功率预测数据后，对计划日的初始机组组合方案进行适应性校验与校正。为测试算法的适应性，设定计划日风电小发与风电大发两种情况，对算法的效果进行分析。风电小发时的风功率曲线如图2所示，风电大发功率在其基础上增加25%。

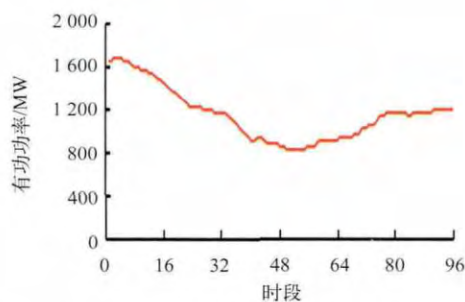


图2 系统风功率预测曲线

1. 风电小发场景

在风电小发场景下，基于机组组合方案的系统发电空间如图3所示。其中，发电下限为开机机组出力下限、联络线计划和风电出力三者总加，发电上限为开机机组出力上限、联络线计划和风电出力三者总加。系统负荷预测曲线位于发电上限与发电下限之间，说明电力平衡可以得到满足。

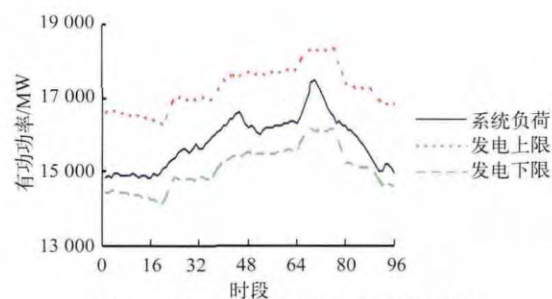


图3 风电小发情况下的发电空间

校验后，火电机组出力与输电断面潮流均在限值以内，模型的目标函数值为零，松弛变量全部为零。因此，无须改变机组组合状态，在该开停机方案下，通过机组出力的调整就可以消纳全部风电。

2. 风电大发场景

在风电大发场景下，基于初始机组组合方案的系统发电空间如图4所示。由于风电出力显著增大，在多个时段系统负荷预测曲线低于发电下限，即在多个时段系统的电力平衡受限。此时，仅依靠调整系统内开机火电机组的出力将无法满足调峰要求。

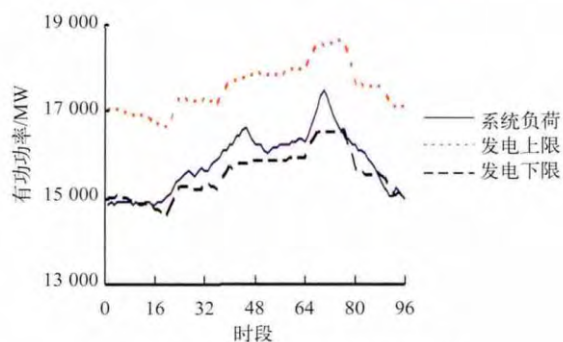


图4 风电大发情况下的发电空间

优化后，模型的目标函数值大于零，且存在1台开机机组的松弛变量 $p_{a, i, t}$ 在风电高峰时段大于零，如图5所示。正值的松弛变量表明在不改变机组开停机方案的条件下，需要通过弃风才能满足平衡要求。这也意味着需要将其状态由开机修正为停机，才能改善风电的并网情况。

根据松弛变量优化结果，调整此机组停机，将此改更新到开停机计划中。此时，系统发电空间如图6所示。系统负荷预测曲线位于发电上限与发电下限之间。

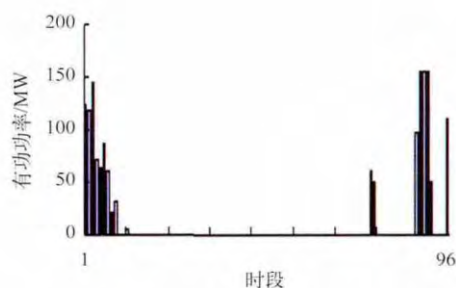


图5 机组松弛变量的96时段优化结果

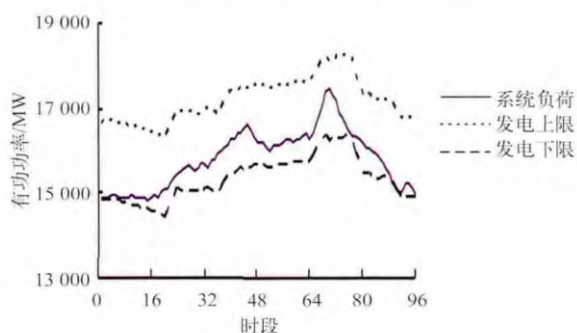


图6 机组组合校正后的发电空间分析

执行校验程序, 优化后松弛变量全部为零, 表明在此开停机方案下, 通过机组出力的调整可以消纳全部风电, 机组组合校正过程结束。

结束语

本文在目前国内发电调度的“月度机组组合、短期经济调度”流程的基础上, 针对大规模风电接入下机组组合的适应性问题, 提出了一种日前发电计划阶段的机组组合校验与最优校正策略。机组组合校验模型可以判断当前开停机方案能否满足大规模风电并网需求, 而机组组合校正策略则可以在校验结果的基础上有序调整部分机组的起停来消纳风电。通过日前发电计划阶段对机组组合的再调度, 拓展了短期发电计划的优化空间, 有效提升了电网消纳风电的能力与发电计划编制的精益化水平。

参考文献

[1] 党晓强, 沈晓东, 陈树恒. 分布式发电系统中风力发电机组的运行技术分析[J]. 电气应用, 2012, 31 (8): 101-104.

[2] Ummels B C, Gibescu M, Pelgrum E, et al. Impacts of wind power on thermal generation unit commitment and dispatch [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22 (1): 44-51.

[3] 管益斌, 王岗, 李强. 江苏电网月度机组组合系统设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (13): 106-109.

[4] 刘斌, 张涛, 周京阳. 大规模风电接入下的发电计划制订方法研究[J]. 电气应用, 2012, 31 (24): 111-117.

[5] 韩自奋, 陈启卷. 考虑约束的风电调度模式[J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (2): 89-92.

[6] 周玮, 彭昱, 孙辉. 含风电场的电力系统经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (25): 13-18.

[7] 张智刚, 夏清. 智能电网调度发电计划体系架构及关键技术[J]. 电网技术, 2009, 33 (20): 1-8.

[8] 李利利, 管益斌, 耿建, 等. 月度安全约束机组组合建模及求解[J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (12): 27-31.

[9] 陈卓, 王帆, 杨康怡. 面向网源协调的大型风电场闭环控制框架[J]. 电气应用, 2012, 31 (24): 27-33.

[10] 杨争林, 唐国庆, 李利利. 松弛约束发电计划优化模型和算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (14): 53-57.

[11] 李利利, 姚建国, 杨争林, 等. 计及机组组合状态调整的发电计划安全校正策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (11): 98-102.

[12] Meng Z Q, Dang C Y, Yang X Q. On the smoothing of the square-root exact penalty function for inequality constrained optimization [J]. Computational Optimization and Applications, 2006, 35 (2): 375-398.

[13] 黄红选, 韩继业. 数学规划[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

(收稿日期: 2014-01-22) EA