

DOI: 10.7667/PSPC180336

计及多类型电源协调的有功控制策略

王昊昊^{1,2}, 徐泰山^{1,2}, 马彦宏³, 汪宁渤³, 汪马翔^{1,2}, 朱燕芳⁴, 张秀丽⁴, 陈钊³

(1. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211106; 3. 国网甘肃省电力公司, 甘肃 兰州 730030; 4. 国网山西省电力公司, 山西 太原 030002)

摘要: 高新能源占比对多类型电源协调的有功控制提出了更高要求。分析市场、政策、“三公”调度等因素对于多源协调有功控制的挑战。对新能源调度公平性进行了严格的数学描述, 提出了多源协调有功控制模型及求解策略。该模型以市场环境下新能源最大化消纳为目标, 以调峰、安全稳定与公平调度为约束。其求解策略能够实现适应复杂电网工况与风/光资源条件的新能源最大化消纳, 并实现市场交易电量的合理分摊。开发的控制系统已在多个省级电网投入应用, 运行结果证明了策略的正确性与有效性。

关键词: 有功控制; “三公”调度; 多源协调; 实时控制

A novel active power control strategy considering multi-resource coordination

WANG Haohao^{1,2}, XU Taishan^{1,2}, MA Yanhong³, WANG Ningbo³, WANG Maxiang^{1,2},
ZHU Yanfang⁴, ZHANG Xiuli⁴, CHEN Zhao³

(1. NARI Technology Co. Ltd., Nanjing 211106, China; 2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China; 3. State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730030, China; 4. State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030002, China)

Abstract: To achieve high renewable power penetration level grid integration, higher requirements for the multi-resource power generation active power control must be set. This paper analyzes the challenges of multi-resource coordinated active power control, such as power market, policy and “equality, equity and publicity” dispatch. With fairness of renewable energy dispatch described mathematically, a multi-resource coordinated active power control model is proposed. This model aims at maximizing the renewable energy consumption in power market environment with constraints of power system security and stability, peak load regulation and fairness power dispatch. The control strategy adapts to the complex network conditions and maximizes the renewable energy consumption, especially wind and solar, and implements reasonable allocation of electric power market transactions. The control system has been applied in several provincial power grids. Correctness and effectiveness are proved during system operation.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902204), Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGGSKY00FJJS1700007), and Six-Talent-Peak Project of Jiangsu Province (No. XNY-050).

Key words: active power control; “equality, equity and publicity” dispatch; multi-resource coordinated control; real-time control

0 引言

近年来, 随着风、光等新能源装机占比不断提

高, 弃风弃光量也逐年递增。通过提升调度控制水平提高可再生能源的消纳能力已迫在眉睫^[1]。《电力发展“十三五”规划》明确指出, 多能互补是提高可再生能源消纳能力的重要手段。因此, 挖掘多类电源的协调控制潜力, 实现多类电源的实时协调控制成为当务之急。

已有的风电、光伏等新能源的实时调度控制是实现多类电源协调控制的基础。文献[2]设计了多时

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFB0902204); 国家电网公司科技项目资助(SGGSKY00FJJS1700007); 江苏省六大人材高峰项目资助(XNY-050); 国网山西省电力公司科技项目“特高压直流及多电压等级交流外送通道的新能源并网智能控制关键技术研究及示范”

间尺度逐级修正的大规模风电有功调度系统。文献[3-4]提出以集中控制为目标、分级协调控制过渡的风电和光伏并网有功调度与控制方案,文献[5]提出考虑辐射型多级嵌套断面约束进行风电实时控制的策略。基于集群控制的理念^[6],文献[7]设计了风电、光伏并网集群协调控制系统框架、整体功能和分层分区控制体系,文献[8]给出了其基于甘肃电网的有功实时控制的应用实例。文献[9]根据自动发电控制机组的负备用、联络线功率调整偏差计算风电消纳空间,提出计及网络约束的校正控制方法以及最大化风电消纳的最小弃风控制方法。文献[10]提出实时计算新能源场站控制性能、预测性能和控制性能代价比指标的方法,并依据这些指标对新能源场站进行分群分组控制。上述文献尚未涉及不同类型新能源的“三公”调度对控制策略的需求以及新能源与其他类型电源的协调控制。

在新能源与常规电源协调控制方面,文献[11]提出适应新能源高渗透率地区电网频率偏差特点的分分布式调频策略,文献[12-13]提出以风电出力最大化为目标的风电场间协调控制策略以及风火打捆外送控制策略。关于多能互补控制,现有研究大多侧重微网及分布式电源的互补控制^[14-16],对于多类电源大规模多时空互补协调调度控制的研究,目前大多集中在探讨长周期的优化调度技术^[17-18],较少涉及不同自动化系统间的协调以及实时控制架构,目前关于实际大电网中多类新能源与常规能源进行实时互补发电控制的报道也较少,目前多源环境下的风、光等新能源控制,一般是全额消纳或通过设置固定的发电上限、固定发电优先级次序等方式来限风、限光,严重依赖于人工控制,调度运行人员的压力大且策略容易偏于保守,导致不必要的弃风、弃光。

此外,市场环境^[19-20]和保障性消纳要求^[21-22]对新能源控制策略提出了新需求^[23],需要考虑市场交易电量,如大用户直购电、外送、现货等多种电量目标的执行,既保证交易电量按期完成,又不影响保障性电量目标的完成。文献[24]针对电力市场环境发电权交易面临的电量交易结算与实时有功功率控制的平衡等问题进行探索。文献[25]以目标场站实时控制指令加权和最大为目标函数,并引入电量目标的完成进度因子,以使进度因子小的场站获得更大的权重,为相关研究提供了有益的思路。

本文提出一种计及多类型电源协调的实时有功控制解决方案,包括控制系统模型、框架及控制策略,并给出应用实例。该策略以新能源最大化消纳为目标,能够实现不同电网工况与风、光资源条件

下的“三公”调度,能够实现适应多级复杂环网断面约束的多类电源协调控制策略,并实现市场交易电量合理分摊与执行,目前已在西北地区的多个省份投入实际工程应用。

1 问题描述

1.1 数学模型

考虑市场交易电量的多类电源协调控制是计及电网安全稳定约束和调峰约束的优化问题,一般以风、光等新能源的实时控制指令和最大为目标,也可以加入其他类型的可再生能源,如水电,以适应水电富集地区减少弃水的控制需求。本文在文献[25]模型的基础上,结合实际的输入信息进行简化并增加实时指令公平性约束,采用如下数学模型进行描述。

$$\max(\sum_{i \in C} \frac{r_{n,i} P'_{n,i}}{\alpha_{n,i}}) \quad (1)$$

$$\text{s.t. } P_{\min,i} \leq P'_{n,i} \leq P_{\max,i} \quad (2)$$

$$\sum_{i \in C} P'_{n,i} \leq P'_{n,\max} \quad (3)$$

$$P_{\text{tl},j} + \sum_{i \in C} [S_{j,i}(P'_{n,i} - P_{n,i})] + \quad (4)$$

$$\sum_{i \in D} [S_{j,i}(P'_{c,i} - P_{c,i})] \leq P_{\text{tl},j,\max}$$

$$f(P_{\text{ZZH}}^{\text{K}}, P_{\text{pre}}^{\text{J}}, P_{\text{e}}^{\text{J}}, \eta_j^{\text{K}}) \leq 0 \quad (5)$$

式(1)为目标函数,式中: C 为参与实时控制且优先消纳的新能源场站和常规电厂的集合(以下简称优先电源); $P'_{n,i}$ 、 $P_{n,i}$ 分别为 C 中第 i 个新能源场站/常规电厂的并网有功功率实时控制指令值和实时出力; $\alpha_{n,i}$ 、 $r_{n,i}$ 分别为 C 中第 i 个新能源场站/常规电厂的电量目标进度因子和优先级指标, $\alpha_{n,i}$ 的计算方法参见文献[25],该值越大,电量完成进度越快, $r_{n,i}$ 为人工设定,值越大,优先级越高,通过 $r_{n,i}$ 可以灵活设置各类电源或各发电厂、机组的优先级; $r_{n,i}/\alpha_{n,i}$ 称为综合系数。

式(2)一式(5)为约束条件,式(2)为参与控制的新能源场站/常规电厂的指令约束, $P_{\min,i}$ 、 $P_{\max,i}$ 分别为 C 中第 i 个电源的实时指令上、下限。

式(3)为电网调峰约束, $P'_{n,\max}$ 为考虑调峰约束得出的优先电源的总出力上限,其计算方法详见3.1.1节。

式(4)是输电断面约束,输电断面按有功送出方向分级,最接近电源的定义为最低一级断面,依此类推; $P_{\text{tl},j}$ 、 $P_{\text{tl},j,\max}$ 分别为断面 j 的实时有功潮流和

限额; D 是参与实时控制且非优先消纳的电源(一般为火电厂)集合; $P'_{c,i}$ 、 $P_{c,i}$ 分别为 D 中第 i 个电源的并网有功功率实时控制指令值和实时出力; $S_{j,i}$ 为 C 、 D 中第 i 个电源的并网有功功率对第 j 个输电断面有功功率的实时灵敏度。

式(5)为使实时指令满足“三公”调度要求的公平性约束, 是复杂的非线性不等式约束, 其中 P_{ZZH}^k 为由式(3)和式(4)所决定的消纳空间向量; P_{pre}^j 、 P_e^j 为新能源场站/常规电厂的发电能力向量和装机容量向量; η_j^k 为灵敏度矩阵。

1.2 实时控制指令的公平性约束

以风电、光伏为例, 其公平性约束是由弃风/弃光问题引发的, 即在无法全额消纳的情况下, 如何以各新能源场站能够接受的调控规则合理地弃风、弃光。此外, 风/光资源的随机波动特性、电力市场环境以及复杂交织的电网调峰约束与安全稳定约束, 使得公平性约束更加复杂。为此, 提出控制指令计算的两类公平性原则。

1) 电力公平原则: 只考虑实时指令的公平, 实时资源(发电能力)优先、兼顾固定的指令公平规则。按预测评估发电能力, 在发电能力差异较大的情况下, 发电能力强的场站优先获得较大的指令, 若发电能力接近则按固定的指令公平规则计算控制指令。

2) 电量公平原则: 在 1) 的基础上引入(某一时段)电量公平, 优先考虑各新能源场站的电量进度趋于一致, 兼顾资源和指令公平规则。这种原则优先保证各站电量完成进度趋于一致, 也兼顾电力公平原则, 尽可能增加总体的发电量。

对于弃风/弃光较少或无明确电量目标的地区, 一般适用于第 1) 类原则。对于限电严重地区, 或有基数电量目标和市场电量目标地区, 一般适用于第 2) 类原则。下文将公平性原则转化为公平性约束。

首先根据场站对断面的灵敏度将场站分群, 对同一断面灵敏度接近的场站分为一群; 以群为单位保证群内公平性, 不同群之间只有在所关联的断面受限情况均相同时才可以比较公平性; 多级断面的场站群也相应分为多级群, 以其中任意一群为例:

1) 若 $P_{ZZH}^k > \sum_{i \in C} P_{pre,i}$, 即最大接纳能力大于当前发电能力之和, 则该群整体不限电, 其中, $P_{pre,i}$ 为第 i 个场站的超短期预测值; P_{ZZH}^k 为该群的总指令上限^[12]。

此时, 公平性约束是保证各场站具备一定的空闲空间, 如式(6)所示, 空闲控制指令大于当前超短期预测值的部分。

$$a_1 P_{pre,i} \leq P'_{n,i} \leq a_2 P_{pre,i} \quad (6)$$

式中, a_1 为大于 1 的系数, $a_2 > a_1$ 。通过本约束条件保证给予各场站的空闲空间, 保证电力公平。若对于综合系数大的场站进一步放大 a_2 , 则可以同时起到促进电量公平的作用。

2) 若 $P_{ZZH}^k \leq \sum_{i \in C} P_{pre,i}$, 则整体限电, 此时的公平

性原则是各场站的实时指令满足固定规则, 本文采用各场站的实时指令比例与其装机比例趋于一致的规则。增加公平性约束如式(7)。

$$a_3 L_{p,b} \leq P'_{n,i} / P_{e,i} \leq a_4 L_{p,b} \quad (7)$$

式中: a_3 为略小于 1 的系数, 例如 0.9~0.99; a_4 为略大于 1 的系数, 如 1.01~1.2; $P_{e,i}$ 为第 i 个场站的装机容量; $L_{p,b}$ 为基准负载率。

$$L_{p,b} = P_{ZZH}^k / \sum_{i \in C} P_{e,i}$$

若各场站均满足 $P_{pre,i} / P_{e,i} \geq a_3 L_{p,b}$, 则式(7)既能够被新能源场站所接受, 也不会浪费电网消纳空间。

若存在场站 $P_{pre,i} / P_{e,i} < a_3 L_{p,b}$, 则可能浪费消纳空间, 同时某些场站 $P_{pre,i} / P_{e,i} > a_4 L_{p,b}$, 二者之间若能进行消纳空间的调剂, 则可最大化利用整体的消纳空间, 也不妨害公平。

因此, 计算各站的理想负载率 $L'_{p,i}$, $L'_{p,i} = P_{pre,i} / P_{e,i}$, 取其中的最小值 $L'_{p,\min}$ 和最大值 $L'_{p,\max}$, 在区间 $[L'_{p,\min}, L'_{p,\max}]$ 中按较小的步长 σ_1 逐步搜索, 直到搜索到一个负载率值 $L_{p,d}$, 使得理想负载率低于 $L_{p,d}$ 的场站可留有空闲; 理想负载率高于 $L_{p,d}$ 的场站将负载率降到 $L_{p,d}$ 后所有场站的总指令等于 P_{ZZH}^k 。

此时, 对于理想负载率大于 $L_{p,d}$ 的集合 C_h , 约束条件公式为

$$a_3 L_{p,d} \leq P'_{n,i} / P_{e,i} \leq a_4 L_{p,d} \quad i \in C_h \quad (8)$$

对于理想负载率小于 $L_{p,d}$ 的集合 C_l , 约束条件公式为: $P_{pre,i} \leq P'_{n,i} \leq a_5 P_{pre,i}$, a_5 为略大于 1 的系数。

电量公平主要针对各时点的指令, 但长期运行的发电量仍可能存在明显差异。因此, 进一步引入长期电量公平, 用 $\alpha_{n,i}$ 修正实时指令的上、下限系数, 使得进度慢的场站优先获得更大的指令, 保证电量目标的同时也兼顾电力公平。

如优先电源中包含水电厂, 根据来水预测信息评估水电厂的发电能力后, 仍适用于上述公平性约束。

2 控制系统框架

为解决上述问题, 结合我国省级以上调度自动

化系统现状,设计了图1所示的多类电源协调控制系统框架。将风、光以及参与断面越限实时控制的水、火电纳入独立的多源互补有功控制系统(简称有功系统),其他水、火电等常规电源仍然保留在现有的水、火电自动发电控制系统(简称AGC系统)中,包括跟踪调度计划和参与实时调节的电源(简称动态调节电源)。新能源场站侧可部署控制装置,在实际出力超过控制指令时进行强制控制,防止输电断面越安全稳定限额。有功系统与现有SCADA、风/光功率预测系统、AGC、电力交易平台、在线安全分析系统(DSA)和调度计划系统建立实时的数据接口,并通过控制装置与场站侧进行互动,共同构成多能源闭环控制系统。

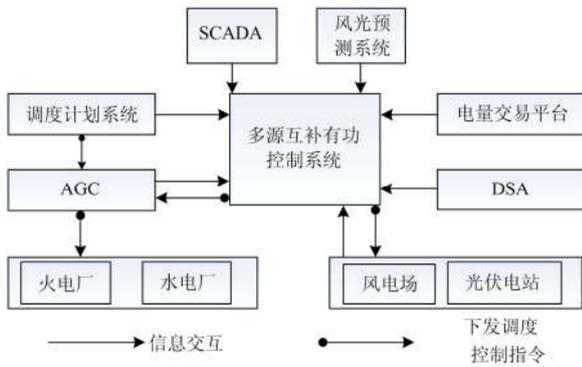


图1 多类电源协调控制系统框架

Fig. 1 Multi-resource coordinated control framework

各系统间接口如下:

1) 有功系统从 SCADA 获取水、火电厂或新能源场站的实时出力,以及输电断面组成元件的实时潮流。

2) 从功率预测系统获取新能源场站的超短期功率预测。

3) 新能源场站可人工上送加出力申请,替代超短期预测。

4) 从电力交易平台获取交易合同信息,包括场站名、交易电量、交易起止时间、交易类型、价格等信息。

5) 从 DSA 获取输电断面在线限额与各类电源出力对输电断面的在线灵敏度。

6) 从调度计划系统获取水、火电机组的发电计划。

7) 从 AGC 系统获取实时的 ACE、总调节功率及其所处区间(负区需降总发电功率,正区需增加总发电功率)、动态调节电源的正、负备用等信息。

根据从 AGC 系统和调度计划系统获取的信息,实时计算调峰约束下的优先电源总出力上限 $P'_{n,max}$,

实现多源协同调峰。有功系统实时计算满足调峰、断面约束和公平性约束的优先电源和非优先电源控制指令,并将常规电源指令通过 AGC 下发,新能源场站指令则直接下发。

3 控制策略

3.1 多源互补有功控制策略

3.1.1 计算调峰约束下的优先电源指令上限

根据动态调节电源的正、负备用以及AGC系统提供的实时信息,自动计算优先电源满足调峰约束的出力上限 $P'_{n,max}$,计算策略如下。

1) 正、负备用均充足时,除 ACE 位于负紧急区外,优先电源均优先增加出力,按式(9)计算其指令上限,动态调节电源优先降出力;若位于负紧急区,则优先电源保持当前出力,按式(10)计算指令上限,由动态调节电源承担总调节功率。

$$P'_{n,max} = \sum_{i \in C} P_{n,i} + k_1((B_- - B_{lim-}) + P_{res}) \quad (9)$$

式中: k_1 为比例系数; B_- 为当前负备用; B_{lim-} 为当前负备用下限; P_{res} 为 AGC 计算出的剩余调节功率,即总调节功率减去已分摊给常规电源的调节功率。

$$P'_{n,max} = \sum_{i \in C} P_{n,i} \quad (10)$$

2) 仅负备用不足时,若 ACE 位于负区,优先电源降低出力,按式(11)计算指令上限;若 ACE 位于正区,优先电源优先增出力,按式(11)计算指令上限;若 ACE 位于死区,优先电源保持当前出力,按式(10)计算指令上限。

$$P'_{n,max} = \sum_{i \in C} P_{n,i} + k_1 P_{res} \quad (11)$$

3) 仅正备用不足时,若 ACE 位于负区,优先电源保持当前出力,按式(10)计算指令上限,动态调节电源降出力,恢复正备用;若 ACE 位于正区或死区,优先电源均优先增出力,按式(9)计算其指令上限。

3.1.2 考虑调峰、断面与公平性约束的求解策略

在调峰约束的基础上,进一步考虑断面约束和公平性约束。由于前述多级群以及同级群的场站存在重叠的情况,使得公平性约束难以用线性的不等式描述,因而无法用线性规划或灵敏度类方法求解该模型,同时由于断面和场站维数较高,规划类方法的收敛性难以保证,因此,本文采用如下策略求解。

步骤 1: 若新能源场站 S_i 的超短期功率预测值 $P_{p,i}$ 小于上轮指令 $P_{n,i}^{last}$,则认为相应的风、光伏电站发电能力不足,风、光伏电站以上轮指令作为指令初

值 $P'_{n0,i}$, 其集合设为 C_1^n 。

步骤 2: 若 S_i 的超短期功率预测值 $P_{p,i}$ 大于上轮指令 $P_{n,i}^{\text{last}}$, 则认为相应的风、光伏电站的发电能力充足, 这些风、光伏电站指令初值 $P'_{n0,i}$ 为 $\max\{P_{n,i}^{\text{last}} + \sigma_1, P_{p,i}\}$, 其集合设为 C_2^n , σ_1 为指定步长; 若 C_1^n 中场站数超过设定阈值, 则水、火电厂以调度计划为指令初值, 否则以上轮指令为指令初值。

步骤 3: 若 C_1^n 和 C_2^n 中风、光伏电站的指令初值之和大于调峰上限 $P'_{n,\max}$, 则消减各风、光伏电站的指令, 先消减至空闲下限, 再消减超过标杆指令部分, 最后按标杆指令等比例消减, 直到满足调峰约束为止, 进入步骤 4; 若指令初值之和小于等于调峰上限 $P'_{n,\max}$, 则将各站指令初值等比例提升, 直至指令初值和等于 $P'_{n,\max}$, 进入步骤 4。

1) 空闲下限计算方法

若风、光伏电站 $i \in C_1^n$, 则其空闲下限为

$$P_{\text{idle},i} = P_{p,i}$$

若风、光伏电站 $i \in C_2^n$, 则其空闲下限为

$$P_{\text{idle},i} = P_{n,i}^{\text{last}} + \sigma_1$$

2) 标杆指令计算方法

首先, 根据每个新能源电站的实时发电能力、综合评价指标以及分配系数, 可得出每个可调新能源电站的实时指令占总指令的比例, 称之为实时分配比, 计算方法如式(12)所示。

$$\alpha_{k,i} = P_{p,\max,i} A_{k,i,\text{eva}} / \sum_{i \in C} (P_{p,\max,i} A_{k,i,\text{eva}}) \quad (12)$$

式中: $P_{p,\max,i}$ 为新能源电站 i 的实时开机容量; $A_{k,i,\text{eva}}$ 为针对第 i 个场站针对第 k 个约束(步骤 3 中为调峰约束, 后续步骤中为断面限额约束)的综合评价指标, 综合考虑新能源电站的安全指标 A_{safe} 、控制性能 A_{ctrl} 、预测精度 A_{fore} , 采用加权的方式计算得到。

$$A_{\text{eva}} = \lambda_1 A_{\text{safe}} + \lambda_2 A_{\text{ctrl}} + \lambda_3 A_{\text{fore}} \quad (13)$$

式中: $0 \leq \lambda_i \leq 1$; $\sum \lambda_i = 1$; $A_{\text{safe}} = 2 - \eta$, η 为场站有功出力对断面实时有功变化的灵敏度, $0 \leq \eta \leq 1$; $0 \leq A_{\text{ctrl}} \leq 1$; $0 \leq A_{\text{fore}} \leq 1$ 。 A_{ctrl} 与 A_{fore} 的计算参见文献[10]。

由

$$\sum_{i \in C} \eta_{k,i} (\alpha_{k,i} P_{\text{plansum},k} - P_{0,i}) = P_{\text{inflim},k} - P_{\text{infcurp},k} \quad (14)$$

得出

$$P_{\text{plansum},k} = (P_{\text{inflim},k} - P_{\text{infcurp},k} + \sum_{i \in C} \eta_{k,i} P_{0,i}) / \sum_{i \in C} \alpha_{k,i} \eta_{k,i} \quad (15)$$

式中: $C = C_1^n \cup C_2^n$; $\eta_{k,i}$ 为厂站 i 的有功出力对约束 k 的灵敏度; $P_{\text{inflim},k}$ 、 $P_{\text{infcurp},k}$ 分别为约束 k 的限额和实时有功潮流(对调峰约束是优先电源的当前总有功出力); $P_{\text{plansum},k}$ 为根据约束 k 得出的可调整的控制对象集合的总控制指令; $P_{0,i}$ 为场站 i 的实时出力值。

$\alpha_{k,i} P_{\text{plansum},k}$ 为新能源场站 i 在约束 k 下的标杆指令, 即在约束 k 所决定的消纳空间中, 各场站均发电能力充足的情况下, 按公平性原则应分配到的指令。

3) 计算出各新能源场站的标杆指令后, 消减超标指令部分的方法

计算第 i 个新能源场站发电能力利用率 $k_i = P_{\text{curplan},i} / (\alpha_{k,i} P_{\text{plansum},k})$, $P_{\text{curplan},i}$ 为迭代过程中场站的当前指令值。

按照 k_i 从高到低排序, $k_1 > k_2 > k_3 > \dots > k_{i-1} > k_i > \dots > k_n$, 从 1 到 n , 逐个代入公式, 得

$$\sum_{i \in I} (k_i - k_x) \eta_{k,i} P_{p,\max,i} = P_{\text{reduce},k}$$

得到

$$k_x = (\sum_{i \in C} k_i \eta_{k,i} P_{p,\max,i} - P_{\text{reduce},k}) / \sum_{i \in C} \eta_{k,i} P_{p,\max,i} \quad (16)$$

直至 $k_x > k_{i+1}$, 则电站 1 到 i 的控制指令变为

$$P_{\text{curplan},i} = k_x P_{p,\max,i} \circ$$

$P_{\text{reduce},k}$ 为与第 k 个约束条件对应的待消减总量, 等于该约束的当前值减去限值。

步骤 4: 如违反断面约束, 则采用文献[26]中的基态下断面越限控制方法优先控制火电机组; 如仍有断面越限, 进入步骤 5, 如消除断面越限, 则结束。

步骤 5: 若仍有断面越限, 则从当前越限的最高级断面开始, 进一步降低新能源场站指令, 采用步骤 3 的消减方法, 先消减空闲, 后消减超标指令部分, 最后按比例消减风、光指令, 直到消除当前断面越限。将下一级越限断面设置为当前最高级断面, 重复上述消减过程, 如所有断面均不越限, 结束。

3.2 市场交易电量的考虑

本文主要考虑中长期市场交易, 如大用户直购电、跨区交易电量。针对不同地区的实际情况, 本文提出以下两种考虑市场交易电量的策略。

3.2.1 策略一: 简明易行的策略

市场交易电量一般是刚性目标, 同时, 还要保

证保障性电量的消纳。为此,有些地区根据其实际情况设定电站的基数电量目标(对应保障性电量),为参与市场交易的电站设定交易电量目标(合同约定),在实时控制策略中保证这两部分电量的执行。

按动态比例将 3.1 节计算出的实时控制指令进一步分解为基数分量、市场分量,如式(17)—式(19)所示。

$$P'_{nm,i} = P'_{n,i} \beta_{nm,i} \quad (17)$$

$$\beta_{nm,i} = \beta_{nm0,i} / \alpha_{n,i} \quad (18)$$

$$P'_{nb,i} = P'_{n,i} - P'_{nm,i} \quad (19)$$

式中: $P'_{nm,i}$ 为实时指令市场分量; $\beta_{nm,i}$ 为市场占比; $\beta_{nm0,i}$ 为初始市场占比,等于市场电量目标与基数电量的比值; $P'_{nb,i}$ 为实时指令的基数分量。

根据最新一轮指令下发后的实际出力情况,用实时出力替代式(17)、式(19)中的 $P'_{n,i}$,将实际出力分解为基数出力和市场出力,并分别积分基数和市场已完成电量,计算 $\alpha_{n,i}$,根据 $\alpha_{n,i}$ 动态修正标杆指令,从而保证进度慢的场站在风、光资源好的情况下可以多发电,以调节各场站的电量完成进度,使其趋于一致,有效避免无法完成电量目标的问题。

3.2.2 策略 2: 考虑限电因素并注重激励的策略

策略 1 需要既定的基数电量目标,而在很多地区,能源主管部门并未发布该目标。此外,在限风(光)严重地区,为更好地激励新能源电站参与市场交易,需要对基数和市场分量的分摊和结算有更加清晰的界定,更加易于解释,同时还需要考虑限风(光)的影响和公平调度原则。因此,提出策略如下。

1) 不限风(光)时段的计算策略同 3.1 节,计算出的指令中不含市场分量。即在该时段,对各电站同等对待,不去分摊、结算市场电量(其电价低于基数电量价格),保障参与交易电站的利益。

2) 在限风(光)时段,按照“市场优先保留、基准力求公平”的原则,首先按式(20)和式(21)计算各电站实时指令的市场分量 $P'_{nm,i}$ 和基数分量初值 $P'_{nb0,i}$ 。

$$P'_{nm,i} = P'_{p,i} \beta_{nm,i} \quad (20)$$

$$P'_{nb0,i} = P'_{n0,i} - P'_{nm,i} \quad (21)$$

然后从 $P'_{n,\max}$ 中减去各电站的实时指令市场分量,得到 $P'_{nb,\max}$; 从 $P_{\text{plansum},k}$ 中减去约束 k 对应的各电站的实时指令市场分量,得到 $P^m_{\text{plansum},k}$,以 $P'_{nb,\max}$ 和 $P^m_{\text{plansum},k}$ 为调峰约束和断面约束对应的指令上限,以 $P'_{nb0,i}$ 为指令初值,按 3.1.2 节策略计算各站的实时指令基数分量。

根据该策略,参与市场交易的电站一方面能够

保障其完成市场电量目标,同时在同等条件下的发电量优于未参加市场交易电站,从而能够激励电站参与市场交易。

3.3 预测精度不满足要求的处理方法

在线实时评估各新能源电站的超短期功率预测精度,根据预测精度在线动态决定是否取用预测值,若预测精度不满足要求,场站可人工提交加出力申请;若无加出力申请,则实时判断场站侧跟踪主站指令的能力,以当前出力加设定步长代替预测,该步长一般较小,不利于提升新能源场站的指令,以激励其改进预测精度。

3.4 控制周期

有功系统可与 AGC 异步运行,计算周期一般设定为 1~5 min,较短的计算周期对于风、光电站的控制性能要求较高,但能够提升对于频率和联络线偏差的响应速度。

4 实际算例

根据上述算法研发有功控制系统应用于多个省级电网,系统控制省调调管的风、光电站,AGC 系统控制水、火电,在火电备用充足的情况下由火电调节联络线偏差。为验证本文的自动调峰策略,设定风电与火电实时协同自动调峰计算,光伏不参与,但计算有功控制指令所使用的风电调峰上限仍由调度员人工设定,并与自动计算出的调峰上限进行对比。根据 AGC 系统和风电运行信息,实时计算风电的总指令上限。有功系统计算周期为 5 min,按照 3.2.1 节策略分摊市场分量。

风电与火电协同自动调峰运行的效果以及与人工调峰指令的对比如图 2 所示。由于风、光资源充裕时段调峰极度困难, T_0 时刻之后的时段内 AGC 系统给出的火电指令均为最小技术出力。尤其是在 T_3 时刻之后的时段,可以看出系统能够将电网实时出现的消纳空间,分配给风电,所以火电指令始终维持在最低,保证风电优先消纳。

从图 2 可以看出,根据自动调峰指令,应从 T_0 开始降低风电出力,但人工指令从 T_1 开始才降低风电指令,从而导致 ACE 有产生较大偏差,并且由于人工调峰指令大多依靠经验,容易过控或欠控,本案例中就明显过控,导致人工指令生效后,风电出力从 T_2 开始急剧下降,又产生了较大的反方向上的偏差。

因此自动调峰比人工调峰响应速度更快、控制量更精确,能够避免 ACE 的较大偏差。当人工调峰指令维持在 500 MW 的时段(T_3 时刻之后),自动调峰能够充分利用电网短暂的消纳空间,及时抬高新能源指令,最大限度促进新能源消纳。

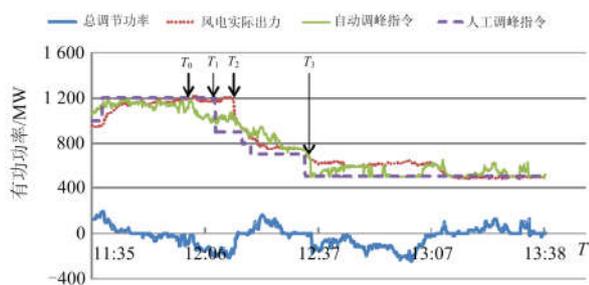


图 2 自动调峰与人工调峰指令对比

Fig. 2 Contrast of auto peak-shaving and manual peak-shaving control instructions

图 3 给出了一个闭环执行自动调峰上限的实例, 根据火电负备用的情况可分为 3 个阶段。第 1 阶段是 T_0 之前, 负备用充足, 提高风电指令, 同时保证 ACE 的平稳, 避免其产生坏点。第 2 阶段, T_0-T_1 之间, 在负备用为 0 后, 风电承担调峰控制量, 根据调峰需要, 逐步降低风电指令同时维持 ACE 平稳。第 3 阶段, T_1-T_2 之间, 负备用略有抬升, 则又开始恢复风光指令。第四阶段, T_2 之后, 正负备用均为 0, 则由风电承担调峰量。

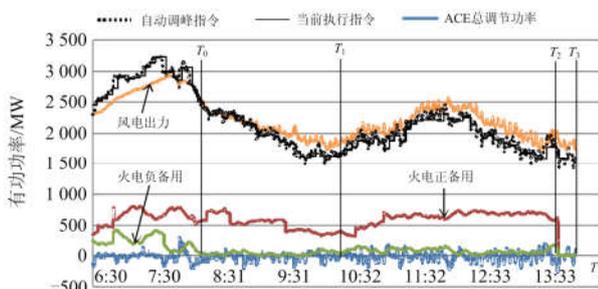


图 3 自动调峰控制实例

Fig. 3 An example of auto peak-shaving control

图 4 是同时存在调峰约束与断面约束的总指令曲线, 在 T_0-T_1 之间, 某输电断面受限, 有功系统能够兼顾调峰和断面约束, 并考虑电量完成进度, 控制该断面不越限的同时合理分配新能源场站指令, 充分利用全网和断面的消纳空间。图 5 是通过该断面上网的新能源场站中 4 个风电场的指令分摊结果, 4 个风场装机容量分别为: 100 MW、100 MW、120 MW、105 MW。图 6 是 4 个风场的月度电量进度曲线, 月初电量进度滞后的风场 1 和 3 中, 风场 3 当日的风资源较好, 因此优先获得更大的发电指令, 缩小了与风场 2 的电量差距, 而风场 1 由于其当日风资源不足并且全网处于受限状态, 因此并未给予较大指令, 其电量进度相比于风场 2、4 也并未明显缩小。

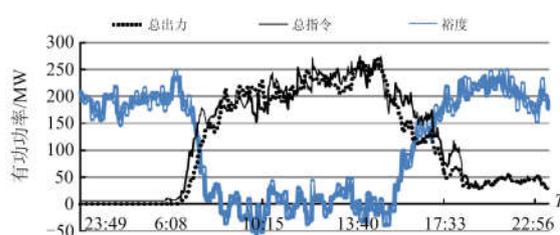


图 4 某输电断面实时运行曲线

Fig. 4 Real-time operation of a transmission section

从图 5 和图 6 可以看出, 除风场 1 外, 风场 2、3、4 的实时风资源都很充足。风场 2 和风场 3 的电量进度因子接近, 但风场 3 装机容量较大, 因此根据标杆指令分配, 风场 3 的控制指令总体上高于风场 2。风场 4 的装机与风场 2 接近, 但其初始的电量完成进度较风场 2、风场 3 慢, 因此指令较大, 使其逐渐缩小与风场 2、风场 3 的完成进度差距。

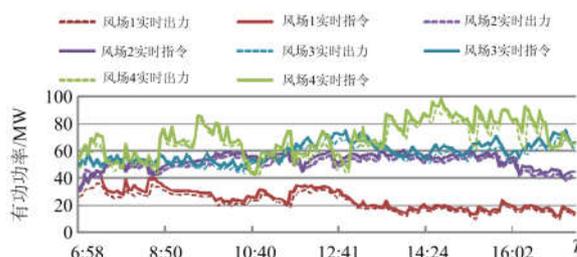


图 5 风电场实时运行曲线

Fig. 5 Real-time operation of wind farms

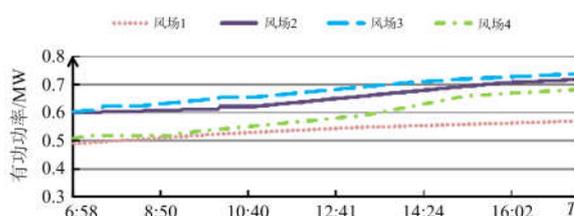


图 6 电量进度曲线

Fig. 6 Total power-schedule-factor curves of wind farms

对于风场 1, 其初始进度最慢, 但实时风资源差, 因此实时指令值没有大幅提升, 而是将电网的消纳能力优先分配给风、光资源充足的场站。

因此, 系统分配的控制指令能够兼顾(基准和市场)总电量的完成进度和实时资源情况, 从而兼顾风、光资源情况和公平性要求, 并且能够较好地调节各场站的完成进度, 使各场站的总电量进度较为均匀。

5 结语

本文针对我国新能源发展所面临的消纳难题和电力市场化趋势, 提出适用于三北地区大规模风光

集群并网省份的考虑多类型电源协调控制的新能源有功控制方法。该方法支持在线计算新能源场站、常规机组对于输电断面功率的灵敏度并用于实时控制,因而能够适应复杂送出断面的控制需求,并对市场交易电量进行合理分摊,为新能源参与多层次的电力市场,利用市场手段促进消纳奠定技术基础。本文所提出的控制架构和控制策略对现有自动化系统影响较小,便于实施,具有较好的可靠性、实时性和控制精度。

为进一步适应更多的电源结构与网架结构特点,需要研究提高风、光、水、火等多类电源的协调控制水平,进一步考虑电源控制性能的差异、考虑水电调节空间的挖掘与利用、考虑输电计划的弹性及其利用,最大限度促进新能源消纳。

参考文献

- [1] 周强,汪宁渤,何世恩,等. 高弃风弃光背景下中国新能源发展总结及前景探究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 146-154.
ZHOU Qiang, WANG Ningbo, HE Shien, et al. Summary and prospect of China's new energy development under the background of high abandoned new energy power[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 146-154.
- [2] 张伯明,吴文传,郑太一,等. 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]. 电力系统自动化, 2011, 35(1): 1-6.
ZHANG Boming, WU Wenchuan, ZHENG Taiyi, et al. Design of a multi-time scale coordinated active power dispatching system for accommodating large scale wind power penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(1): 1-6.
- [3] 高宗和,滕贤亮,张小白. 适应大规模风电接入的互联电网有功调度与控制方案[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 37-41.
GAO Zonghe, TENG Xianliang, ZHANG Xiaobai. Solution of active power dispatch and control scheme for interconnected power grids with large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 37-41.
- [4] 徐瑞,滕贤亮,张小白,等. 大规模光伏有功综合控制系统设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 24-29.
XU Rui, TENG Xianliang, ZHANG Xiaobai, et al. Design of integrated active power control system for large-scale photovoltaic system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 24-29.
- [5] 王靖然,王玉林,杨志刚,等. 考虑嵌套断面约束的大规模集群风电有功控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 16-21.
WANG Jingran, WANG Yulin, YANG Zhigang, et al. An active power control strategy for large-scale cluster of wind power considering constraints on nested transmission sections[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 16-21.
- [6] ROHIG K, SCHLOGL F, JURSA R. Advanced control strategies to integrate German offshore wind potential into electrical energy supply[C] // Proceedings of 5th International Workshop on Large Scale Integration of Wind Power and Transmission Systems for Offshore Wind Farms, April 7-8, 2005, Glasgow, UK.
- [7] 薛峰,常康,汪宁渤. 大规模间歇式能源发电并网集群协调控制框架[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 45-53.
XUE Feng, CHANG Kang, WANG Ningbo. Coordinated control frame of large-scale intermittent power plant cluster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 45-53.
- [8] 李雪明,行舟,陈振寰,等. 大型集群风电有功智能控制系统设计[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 59-63.
LI Xueming, XING Zhou, CHEN Zhenhuan, et al. Design of large clusters of wind power active intelligent control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 59-63.
- [9] 王彬,孙勇,吴文传,等. 应用于高风电渗透率电网的风电调度实时控制方法与实现[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 23-29.
WANG Bin, SUN Yong, WU Wenchuan, et al. A real-time wind power control method for power systems with high wind power penetration and its implementation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 23-29.
- [10] 徐泰山,汪宁渤,马明,等. 基于预测调节性能和安全约束的新能源并网功率控制方法: 中国, ZL 201310174543.0 [P]. 2013-10-17.
- [11] LUND H, HVELPLUND F, ØSTERGAARD P A, et al. System and market integration of wind power in Denmark[J]. Energy Strategy Reviews, 2013, 1(3): 143-156.
- [12] 行舟,陈永华,陈振寰,等. 大型集群风电有功智能控制系统控制策略: (一)风电场之间的协调控制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 20-23.
XING Zhou, CHEN Yonghua, CHEN Zhenhuan, et al. A control strategy of active power intelligent control system for large cluster of wind farms: part one: coordination control for wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 20-23.
- [13] 陈振寰,陈永华,行舟,等. 大型集群风电有功智能控

- 制系统控制策略(二)风火电“打捆”外送协调控制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21): 12-15.
- CHEN Zhenhuan, CHEN Yonghua, XING Zhou, et al. A control strategy of active power intelligent control system for large cluster of wind farms: part two: coordination control for shared transmission of wind power and thermal power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 12-15.
- [14] 杨秀媛, 黄丹, 申洪. 多能源互补独立电力系统的控制策略仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 156-162.
- YANG Xiuyuan, HUANG Dan, SHEN Hong. Research on control strategy of multi-energy complementary isolated power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 156-162.
- [15] 李文锋, 张健, 卜广全, 等. 抽蓄电站和经多端柔性直流电网接入的大规模新能源间的协调互补优化控制方案[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 130-135.
- LI Wenfeng, ZHANG Jian, BU Guangquan, et al. A coordinate complementary optimization control scheme between pumped storage station and large-scale new renewable integrated through VSC-MTDC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 130-135.
- [16] LI Han, ESEYE A T, ZHANG Jianhua, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewable[J]. Protection and Control of Modern Power Systems 2017, 2(2): 122-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0040-6.
- [17] 宋卓然, 赵琳, 张子信, 等. 热电联产与风电机组联合运行滚动优化调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 110-116.
- SONG Zhuoran, ZHAO Lin, ZHANG Zixin, et al. Rolling optimal model for multiple heating source and wind turbine unit[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 110-116.
- [18] 张建新, 李中豪, 张沛超. 基于 MPC 的风燃协调滚动调度运行策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 18-23.
- ZHANG Jianxin, LI Zhonghao, ZHANG Peichao. A MPC-based rolling dispatch strategy of the wind-gas coordinated system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 18-23.
- [19] CAILLIAU M, OGANDO J A, EGELAND H, et al. Integrating intermittent renewable sources into the EU electricity system by 2020: challenges and solutions[EB/OL]. [2010]. <https://www.researchgate.net/publication/258402979>.
- [20] XIE L, CARVALHO P M S, FERREIRA L A F M, et al. Wind integration in power systems: operational challenges and possible solutions[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 214-232.
- [21] 国家发展改革委. 可再生能源发电全额保障性收购管理办法: 发改能源(2016)625号[S]. 2016.
- [22] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于做好风电、光伏发电全额保障性收购管理工作的通知: 发改能源[2016]1150号[S]. 2016.
- [23] 徐熙林, 宋依群. 市场环境区域电网调峰的直调机组网际出力优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 49-56.
- XU Xilin, SONG Yiqun. Study on power generation allocation of regional plants for peak operation in partly deregulated electricity market environment[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 49-56.
- [24] 于昌海, 吴继平, 王运, 等. 适应发电权交易的可再生能源有功控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 71-76.
- YU Changhai, WU Jiping, WANG Yun, et al. Active power control strategy for renewable energy generation adapted to generation right trade[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 71-76.
- [25] 徐泰山, 王昊昊, 汪马翔, 等. 计及电量交易计划的发电厂并网有功功率实时控制方法: 中国, CN106655279A [P]. 2017-05-10.
- [26] 马明, 刘强, 沈凤杰, 等. 输电设备过载与断面功率越限在线控制决策[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(6): 26-32.
- MA Ming, LIU Qiang, SHEN Fengjie, et al. On-line auxiliary decision-making for overload control of power transmission equipment and sections[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(6): 26-32.

收稿日期: 2018-03-27; 修回日期: 2018-05-18

作者简介:

王昊昊(1979—), 男, 通信作者, 研究员级高级工程师, 硕士生导师, 主要研究方向为新能源并网控制与电网灾害防御; E-mail: wanghaohao@sgepri.sgcc.com.cn

徐泰山(1968—), 男, 研究员级高级工程师, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制;

马彦宏(1975—), 男, 硕士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化、风电预测预报。

(编辑 周金梅)