

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005577

# 面向集群风电的运行断面自适应控制方法

李 伟

(东营科技职业学院 东营 257300)

**摘要:** 为提高风电接纳水平,解决计入风电的自动发电控制问题,结合大规模风电场群接入电网断面的特点设计风电集群断面有功控制策略。基于有功响应的特性对集群风电有功控制时延作相应修正,得到断面裕度的动态计算方法,并进行以信息物理系统 CPS 为基础的集群风电断面自适应控制架构的构建,最后结合断面裕度动态计算结构完成对有功控制实施策略的最终设计。仿真结果显示,所设计方法可降低风电机组磨损及运行成本,对风电场出力调节速率提供保证,同时,减小低风速下降出力过调;此外,还能对风电接纳容量进行充分的利用,减小集群有功功率线损,经济效益明显。

**关键词:** 集群风电;运行断面;信息物理系统;有功控制

**中图分类号:** TM71;TP311 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

## Fracture surface self-adaptation control method that facing cluster wind

Li Wei

(Dongying Vocational College of Science &amp; Technology, Dongying 257300, China)

**Abstract:** In order to improve the acceptance level of wind power and solve the problem of automatic generation control included in wind power, by combining with the characteristic of large-scale wind farms group access to grid section, the paper formulates wind power cluster section active power control strategy, and amends its ctive power control delay based on active response characteristic, gets the calculate method of section margin. Then, it builds fracture surface self-adaptation control frame that facing cluster wind based on cyber-physical systems framework, and complish the optimizing of active power control strategy based on dynamic section margin calculation structure. Simulation results show that, the design method in this paper can reduce the wind turbine wear and operation cost, provide a guarantee for the wind farm output regulation rate, and reduce the output overregulation at low wind speed. In addition, the capacity of wind power can be fully utilized to reduce the line loss of cluster active power, and the economic benefit is obvious.

**Keywords:** cluster wind;operation section;CPS;active control

## 0 引 言

与化石能源的短缺以及环境问题的凸显相伴随,风电<sup>[1]</sup>这一技术相对成熟的清洁发电方式在电网中得到越来越多的渗透,在一定程度上实现了对传统、老旧火电机组的能源替代<sup>[2]</sup>。基于风电发展战略“建设大基地、融入大电网”<sup>[3]</sup>的指导,我国在对风能的开发与利用中开始实施“规模化开发、远距离集中送出”<sup>[4]</sup>的模式。目前,“三北”地区在我国大型风电基地建设中取得比较优秀的成果,多数风电场均在电网的末端集中,有分散式接入的风电机组同时存在,它们集中起来一起接入汇集变电站,形成风电集群(wind farm cluster, WFC)。而所谓风电集群,是指具有相

同或者接近的地理位置,位于同一风资源带,风力特性一致且集中接入相同并网点的风电场集合<sup>[5]</sup>。在风电集群内部,风电场的出力变化有较强的相关性与较高的同时率,时空互补性比较独特<sup>[6]</sup>,在电压等级不同的外送通道支持下,它们向主网与负荷中心输送,并最终由负荷中心消纳。然而,在外送通道输电容量这一限制性因素的影响下,风电场存在长期限电的问题,弃风情况急需解决。此外,受到不合理风功率的控制以及出力波动等的影响,断面越限问题的发生率也比较高,这也成为对电网安全与稳定运行形成威胁的一个重要因素。

统一调度、协调控制风电集群,能够在较大程度上实现对风电场出力随机性、波动性及间歇性的平衡与抑制,不管

收稿日期:2020-12-21

是在装机规模上,还是在外部调控特性上,均能形成接近于常规电厂的电源,同时,赋予其较为突出的响应电网调度及控制的能力<sup>[7]</sup>。乔颖等<sup>[8]</sup>研究并提出以断面潮流裕度划分为基础的集群风电控制方法,通过相应安全裕度的预设,避免由于风电出力波动而引起的断面越限问题发生;以此为基础,王靖然等<sup>[9]</sup>对单一断面潮流裕度划分进行拓展,将其应用于断面嵌套的场景中;通过对集群风电控制响应时延的把握,同时,结合对时延期间风功率波动的考虑,Zhan等<sup>[10]</sup>对断面裕度算法作出进一步的修正。而为了保证风电接纳水平,解决计入风电的自动发电控制(automatic generation control, AGC)<sup>[11]</sup>问题,又需要通过调整叶面转向等改变风机的有功出力,对此,徐玉琴等<sup>[12]</sup>以响应速率最高、响应成本最小为出发点,进行风电场有功响应模型的构建。但是,现有针对风电集群控制展开的研究并未对风电场有功响应特性作较多考虑,在一定程度上对有功控制指令下达至执行机构的过程中风电场有功出力变化有所忽略。究其原因,在于传统有功控制方法欠缺针对物理系统的建模研究,不能在信息与物理系统间有效传递与深层次分析相关数据。出于对这一问题的考虑,本文将信息物理系统引入,结合大规模风电场群接入电网断面的特点设计风电集群断面有功控制策略。

## 1 相关研究基础

### 1.1 风电出力时空特性

在小时间尺度下的时间尺度范围内,具有不同地理分布的风电集群会适当地将互补性增强,同时,风电出力的相关性也会在一定程度上减弱。以地理位置相对集中的酒泉风电基地为例,当受到大面积的来风影响时,如果风速越大,基地各风场的出力变化会越趋于相同,它们所表现出来的相关性会越明显,如此一来,累加的集群出力波动也会越大,而在小时间尺度上,风电场之间的波动会在一定程度上被抵消,这会降低集群出力的变化率;如果风速维持在一般的水平上,风在经过不同的风电场之时会有较大的时刻差距,此时互补性会比较明显,可相应减小风电总出力的波动。总得来说,存在于风电场之间的分散效应会适当地将风电基地总出力变化率减小,提高集群出力平滑性。此即总结出来的风电基地总出力特性,对于某一风电场来说,表现出来的特征也是大体相似的。

就某一区域中的多个风电场来说,由于受到区域地理分布因素的影响,其风速的相关性也存在差异。相关研究指出,地理位置是影响风电片区间风速相关性的一个重要因素,它们之间具有负指数关系,如式(1)所示。此外,地理位置的不同也导致一些风电场出力之间有一定的延迟特性。

$$c = e^{-\frac{d}{M}} \quad (1)$$

式中:  $c$  为风速相关系数;  $d$  为两个风电片区之间的地理距

离;  $M$  为相关系数随距离衰减因子。

### 1.2 集群风电断面有功控制思路

在实际的运行过程中,为了使电网始终做到在一个安全、可靠的环境中运行,电网调控机构一般会以外送断面表现出来的热稳极限或电压稳定极限为参考依据,进行断面具体传输功率极限值的提前制定。当风电外送受到限制时,各风电场会结合断面功率极限以及自身的装机容量来确定其有功发电指标,超过固定发电指标运行是被禁止的。

传统的以固定指标为基础的有功控制方法有明显的不足存在,表现为当相同断面下的各个风电场有不同的风况条件时,无风状态下的风电场发电能力为 0,有风状态下的风电场亦无法做到超指标发电,此时,断面裕度的充分利用是无法被保证的。为了将此问题解决,在断面下的所有或部分风电场投入 AGC 运行之后,应遵循以下思路对风电进行有功控制:与断面裕度的实际情况相结合对各个风电场的出力指令进行实时的调整,尽可能地将风况条件好的风电场发电量增加,以此保证在断面潮流不越限的基础上实现对更多风电的接纳。

## 2 信息物理系统 CPS

CPS 属于下一代工程系统<sup>[13]</sup>,能够实现计算、通信与控制技术等深层次融合,主要包括物理与信息 2 大系统,前者是遵循自然的物理原则运行,对现实世界产生直接影响的物理实体;后者则能够将控制意图反映出来,对相关物理实体产生影响,令其按照意图进行。作为系统性理论同计算机科学的深层次结合<sup>[14]</sup>,CPS 在广义层面被视作以感知环境为根本基础的网络化物理设备综合系统,其基本架构如图 1 所示。在物理进程与计算进程之间的相互作用之下,会有反馈信息形成,CPS 便利用这些反馈信息深层融合计算、通信与控制等功能,安全、高效而又可靠地控制与监测物理实体。分析 CPS 的最终目标,在于完全融合信息与物理 2 个世界,通过对可控、可信、可扩展的网络的安全与有效构建,从根本上将人类构建工程物理系统的方式改变<sup>[15-16]</sup>。

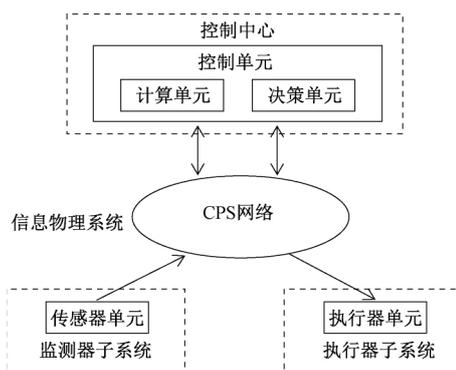


图 1 信息物理系统结构

### 3 基于信息物理系统的集群风电断面有功控制

#### 3.1 集群风电断面自适应有功控制 CPS 框架构建

与 CPS 的实施要求相结合,在对集群风电断面进行有功控制时必须将物理系统的监测对象与物理量以及信息系统的传输途径及实施策略梳理清楚。图 2 所示为本文构建的以 CPS 为基础的集群风电断面有功控制架构,物理系统对风电场与主要断面的实时运行信息进行监测,信息系统则以电力通信网络为支持,在计算中心输入物理系统监测到的实时信息,并在此基础上下达相应的控制指令。

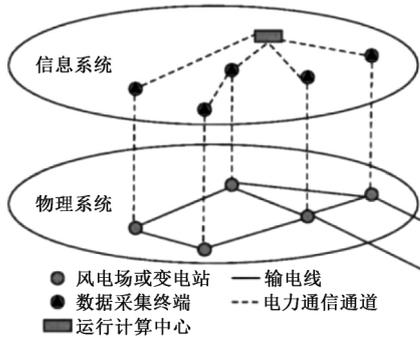


图 2 集群风电 CPS 架构

物理系统层是集群风电物理信息系统的一次系统,该层对风电场有功出力、输变电设备的有功潮流等数据进行监测;信息系统与运行计算中心是集群风电物理信息系统的二次系统,其计量装置在各个变电站与电厂均有布置,对物理系统的实时运行情况进行采集与监测;通信系统的功能在于向运行计算中心传输物理系统与信息系统监测到的数据信息;运行计算中心在接收到各项数据信息之后,通过相应分析得到控制策略,最终将其经通信系统向变电站与电厂下达,完成对一次系统控制与调整。

相较于煤电与水电等传统的电源而言,集群风电断面自适应有功控制的特殊点为风电场中安有的风机数量太过庞大<sup>[17]</sup>,这会为运行计算中心的工作增加难度,使其很难通过对机组的直接调控实现集群风电有功调控,因而,调控工作需要将风电场作为控制单元。不同于传统电源发电机组,集群风电断面有功控制必须将其有功响应特性的影响作为一个重点考虑因素。

#### 3.2 基于 CPS 的集群风电断面有功控制策略设计

以风电断面裕度的不同作为参考依据,将断面状态划分为安全、预警与紧急 3 大类。若断面传输有功功率比其限值的 90% 还要小,则将其视作处于安全状态下;若其传输功率大于限值的 90%,但比限值的 95% 小,则将其视作处于预警状态下;若其传输功率比自身限值的 95% 还要大,则视其已达到紧急运行状态<sup>[18]</sup>。断面处于不同状态之时,采取的出力控制策略存在差异,以 CPS 为基础的集群风电断面有功控制策略表述如下:

1) 如果断面所处状态为安全,为了实现对面裕度的

最大限度利用,保证全部风电场均能够正常上调出力,用  $P_{i,t}^{ref}$  表示风电场  $i$  在周期  $t$  的出力指令,则有式(2):

$$P_{i,t+1}^{ref} = \alpha P_{i,t}^{ref} \quad (2)$$

式中:  $P_{i,t+1}^{ref}$  为周期  $t+1$  内风电场  $i$  的出力指令情况;  $\alpha$  为出力指令增加系数,就没有上调能力的风电场而言,  $1 \leq \alpha \leq 1.1$ ; 而就有上调能力的风电场而言,  $\alpha$  通过计算断面裕度得到,但需满足断面潮流不越限的前提条件,即  $\sum_{i \in N} P_{i,t+1}^{ref} \leq P_{t+1}^{obj}$ , 其中,  $P_{t+1}^{obj}$  表示的是周期  $t+1$  断面的总目标出力,用断面极限值  $P_{lim}$  来表示,有  $P_{t+1}^{obj} = 0.95 P_{lim}$ ,  $N$  表示的则是断面下全部风电场的集合。

基于信息物理系统,该状态下运行计算中心不会向各个风电场下达有功功率调控指令,集群风电不会受到相应限制。

2) 如果断面所处状态为预警,为了实现对断面潮流不越限的保证,针对全部没有上调能力的风电场,将其出力指令设定为当前的出力值,有式(3):

$$P_{i,t+1}^{ref} = P_{i,t}^{rea}, i \in N_b \quad (3)$$

式中:  $P_{i,t}^{rea}$  为风电场  $i$  在周期  $t$  的出力;  $N_b$  为无上调能力的风电场的集合。

有一点需要指出,在某一持续时间在十几个小时至几天的来风过程中,若风电场实际出力可达到某指令周期的出力指令值,那么在下一周期,该风电场至少可以维持当前出力,有时还会有出力上调的空间。所以,此处在对风电场是否具有上调能力进行判断时,以其实际出力能否达到上周期出力指令值作为评测指标,直观上讲,即如果  $|P_{i,t}^{rea} - P_{i,t}^{ref}| < P_\epsilon$ , 其中,  $P_\epsilon$  表示的是事先设定好的阈值,则视风电场在周期  $t+1$  是具有上调出力的能力的。

作为一种具有惩罚性质的控制措施,全部具有上调能力但是出力超过周期  $t$  出力指令值较多的风电场将维持出力指令不变,亦即针对那些超发的风电场,令其周期  $t+1$  出力指令与周期  $t$  相同,有式(4):

$$P_{i,t+1}^{ref} = P_{i,t}^{ref}, i \in N_c \quad (4)$$

式中:  $N_c$  表示的是具有上调能力,但是存在超指标发电情况的风电场集合。此处需要强调,风电场的跟踪指令是可以有一定的误差的,其超指标发电指的是实际出力情况超过指令值大于某一阈值。

除此之外,具有上调能力的风电场的出力通过式(5)计算得到:

$$P_{j,t+1}^{ref} = (P_{t+1}^{obj} - \sum_{i \in N_b \cup N_c} P_{i,t+1}^{ref}) \frac{P_{j,t}^{rea}}{\sum_{i \in N_s} P_{j,t}^{rea}}, j \in N_s \quad (5)$$

式中:  $N_s$  表示的是可继续上调出力的风电场集合。

这一状态下,断面总目标出力  $P_{t+1}^{obj}$  依旧用  $0.95 P_{lim}$  来表示,且有  $N = N_b \cup N_c \cup N_s$ 。

基于信息物理系统,该状态下运行计算中心会进行相关指令的下达,就各个风电场对当前有功功率的保持提出要求,避免由于集群风电有功功率的增加引起的断面越限

问题的发生。

3)如果断面所处状态为紧急,为了在尽可能短的时间内恢复断面到安全状态,则用  $0.9P_{lim}$  来表示断面总目标出力  $P_{t+1}^{obj}$ ,此情况下全部风电场指令值通过式(6)计算得到:

$$P_{i,t+1}^{ref} = P_{t+1}^{obj} \frac{P_{i,t}^{rea}}{\sum_{i \in N} P_{i,t}^{rea}}, i \in N \quad (6)$$

同样有一点需要强调,虽然风电场有功功率会发生变化,但其变化幅度不能超过国家规定的有功功率变化限值。所以,若求得的周期  $t+1$  的指令值同风电场实际出力差值大于规定允许值,则需采取相应措施修正指令:针对周期  $t+1$  将增加出力的风电场,若  $P_{i,t+1}^{ref} - P_{i,t}^{rea} > P_{lim}$ ,则令  $P_{i,t+1}^{ref} = P_{i,t}^{rea} + P_{lim}$ ;针对周期  $t+1$  将减小出力的风电场,若  $P_{i,t+1}^{ref} - P_{i,t}^{rea} < -P_{lim}$ ,则令  $P_{i,t+1}^{ref} = P_{i,t}^{rea} - P_{lim}$ 。

基于信息物理系统,该状态下运行计算中心不会再对控制环节风电调整量最小的优化目标作过多的关注,其会将重点放于各风电场的最大有功调整能力上,通过指令的下达让断面潮流在最短的时间内返回到低于限值的水平。

#### 4 仿真分析

基于已有学者的研究,结合我国 A 地区某 GW 级别的风电集群运行数据,对本文所提方法的有效性进行验证。该风电场集群的风电场数量有 5 个,用 WF1~WF5 表示,总的装机容量为 910 MW,表 1 所示为其基本参数。

表 1 风电场集群基本参数

风电场	WF1	WF2	WF3	WF4	WF5
装机容量/MW	203	299	203	101	113
预测功率约束限值/MW	40.3	59.5	40.3	20.5	22.6
联络线电阻/ $\Omega$	0.299	0.053	3.27	3.27	3.03

借助 Cybercontrol 工业组态平台测试本文控制方法,集群主站下达决策与指令,主动调控风电场出力,在此基础上,调度中心工作人员的工作量被有效降低。以 6 月份某一天风电集群的有功出力为例,采用本文方法的集群有功出力曲线与传统的人工调度出力曲线对比结果如图 3 所示。

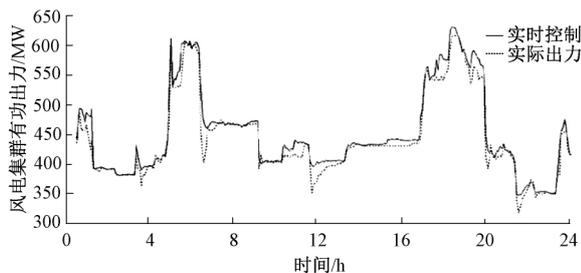


图 3 本文方法与传统人工调度对比

根据图 3,人工调度下风电集群存在资源管理分散、协调难度大以及调度指令合理性欠缺等问题,致使存在比较

明显的弃风限电情况;采用本文方法可科学而又合理地分配各风电场风电机组的容量,达到连续而又柔性调节集群出力的目的。在安全而又稳定运行的条件下,集群有功出力与风电计划更加接近,当天集群的整体出力大约增加了 210 MWh,表现出明显的经济效益。

进一步地,表 2 所示为本文方法与按预测功率比例进行加权分配的控制方法应用效果的对比。

表 2 方法应用结果对比

时段	风电出力		集群网损		关口有功功率	
	本文	对比	本文	对比	本文	对比
	方法	方法	方法	方法	方法	方法
1	400.27	400	0.81	0.87	399.53	398.65
2	400.47	400	0.64	0.75	399.77	398.75
3	397.93	390	0.68	0.72	399.25	398.78
4	390.38	390	0.55	0.61	399.57	399.01
5	390.30	390	0.46	0.53	389.19	389.05

根据表 2,按预测功率比例进行加权分配的控制方法容易造成风电机组多次启停,使得处理目标值比启停约束限值低,本文方法可将这一问题避免,在降低风电机组磨损与运行支出、保证风电场出力调节速率等方面均具有明显的优势;另外,本文方法对集群网损的最小化目标加以考虑,不仅能对风电接纳容量进行充分的利用还可以将集群内有功功率线损降低,表现出来的经济性也较之对比方法更加明显。

#### 5 结 论

本文对风力出电所具有的时空特性进行了分析,并以信息物理系统架构为基础完成了对集群风电断面自适应有功控制框架的制定,提出计算断面潮流调控能力以及判定裕度的方法。最终结果显示,本文方法可使风电集群更加有效地对调度中心控制指令进行响应,在对风电接纳容量的利用上优势明显,虽然该方法算法上相对复杂,但能够精细分配风电集群有功功率,增加风电出力的同时将集群网损减少,因而有较高的应用价值。但是,由于受到时间、研究深度等因素的限制,尽管本文所提方法在仿真实验中取得结果比较理想,但依旧需要通过实际的应用对其有效性进行进一步地验证。

#### 参考文献

[1] 曲正伟,张坤,王云静,等.基于小波-原子分解的超短期风电出力预测模型[J].仪器仪表学报,2016(10):2251-2258.

[2] 孙皓皓,汤涌,叶林,等.基于分层分布式模型预测控制的多时空尺度协调风电集群综合频率控制策略[J].中国电机工程学报,2019,39(1):155-167.

[3] 周金辉.基于价值评估的含大规模风电的电力规划[D].

- 天津:天津大学,2012.
- [4] 冯鑫源.限风情况下风电场群有功分层协调控制策略研究[D].吉林:东北电力大学,2017.
- [5] 行舟,李雪明,陈振寰,等.甘肃酒泉大型集群风电有功智能控制系统的开发[J].电力科学与技术学报,2011,26(1):48-52.
- [6] 肖创英,汪宁渤,丁坤,等.甘肃酒泉风电功率调节方式的研究[J].中国电机工程学报,2010,30(10):1-7.
- [7] 林俐,朱晨宸,郑太一,等.风电集群有功功率控制及其策略[J].电力系统自动化,2014,38(14):9-16.
- [8] 乔颖,鲁宗相.考虑电网约束的风电场自动有功控制[J].电力系统自动化,2009,33(22):88-93.
- [9] 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.
- [10] ZHAN S, XIN Z L, YU H, et al. Real-time active power control method of regional power fluctuations under CPS framework[C]. International Conference on Power System Technology,2018:69-75.
- [11] 刘志坚,陈潇雅.基于 AGC 的高压互联网络频率协调控制[J].电子测量技术,2019,42(5):11-17.
- [12] 徐玉琴,刘丹丹.基于两步分群法的双馈机组风电场等值建模[J].电力系统保护与控制,2017,45(6):108-114.
- [13] 应怀樵,沈松,李旭杰,等.“云智慧仪器”结合“互联网+”和“工业 4.0”、CPS 的发展趋势,是面向“中国制造 2025”的典型代表[J].国外电子测量技术,2016,35(1):1-6.
- [14] LEE E A, SESHIA S A. Introduction to Embedded Systems: A Cyber-Physical Systems Approach[M]. Beijing: China Machine Press,2012.
- [15] RAJKUMAR R, LEE I, SHA L, et al. Cyber-physical systems: The next computing revolution[C]. Proceedings of the 47th ACM/IEEE Design Automation Conference. Anaheim, CA, IEEE,2010:731-736.
- [16] 刘东,盛万兴,王云,等.电网信息物理系统的关键技术及其进展[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3522-3531.
- [17] 葛维春,刘前卫,刘富家,等.高比例清洁能源电网灵活调节方法[J].沈阳工业大学学报,2018,40(5):481-485.
- [18] 许昌,魏媛,李涛,等.大型风电机组机组层 AGC 控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(2):69-74.

#### 作者简介

李伟,硕士研究生,讲师,主要研究方向为电工电子。

E-mail:814869546@qq.com