

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181306

# 基于风火协调的闭环控制系统研究和应用

陈金, 郑亮, 谢丽军, 汪马翔, 陈堂龙

(南瑞集团有限公司/国网电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 211000)

**摘要:** 为了提高风电消纳, 降低弃风率, 研究了一种基于风火协调的闭环控制系统(以下简称闭环控制系统)。该系统根据风电上网断面的负载率设置不同区间并采取相适应的风火协调控制策略, 在保证断面安全稳定的前提下尽可能提高风电消纳, 在断面发生越限时则尽可能降低火电和适当减少部分风电。由于风电出力缺乏有效的预测技术, 系统依据风场出力能否及时跟踪上轮指令情况进行风电发电能力的预估, 同时在系统可靠性方面, 系统增加了指令防误检查和控制模式自动切换逻辑。指令防误检查在指令出口前进行各项约束条件检查, 确保下发的指令不会对系统造成较大冲击, 引发新的安全稳定问题。控制模式自动切换功能是在系统出现异常时, 风电自动跟踪新能源系统或人工控制, 火电自动跟踪调度计划系统(Optimal Planning System, OPS)或人工控制, 确保系统异常时仍能保持电网安全稳定运行。最后通过在山西电网的实际应用, 验证系统的有效性和实用性。

**关键词:** 风火协调; 闭环控制; 控制策略

## Research and application of closed loop control system based on wind-fire coordination

CHEN Jin, ZHENG Liang, XIE Lijun, WANG Maxiang, CHEN Tanglong

(NARI Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211000, China)

**Abstract:** In order to improve the consumption of wind power and reduce the abandoned wind rate, a closed loop control system based on wind-fire coordination (Hereinafter referred to as a closed loop control system) is studied in this paper. The system can set different intervals according to the load rate of transmission cross-section, and adopt different control strategies in each interval. In the premise of ensuring the safety and stability of the cross-section, the capacity of wind power utilization will be improved as much as possible. When the cross-section is overloaded, the thermal power is reduced as much as possible, and the wind power is reduced appropriately. Due to the lack of effective forecasting technology for wind power, the wind power generation capability is estimated according to whether the wind is tracking the last command. At the same time, in the aspect of system reliability, the system has increased the check of instruction error proofing and automatic switching of control modes. In order to ensure that the instruction will not make a big impact on the system, and not cause new security and stability problems, all constraints can be checked before the instruction is sent. When the system is abnormal, the wind power automatically tracks the new energy system or manual control, and the thermal power automatically tracks the Optimal Planning System (OPS) or manual control to ensure the safe and stable operation of the power grid. Finally, the effectiveness and practicability of the system are verified by the practical application in Shanxi Power Grid.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904500) and Key Research and Development Program of Ningxia (No. TZZD/NZC180152C).

**Key words:** wind-fire coordination; closed loop control; control strategy

## 0 引言

我国风电发展迅速, 2017年末, 全国风电累计装机1.64亿kW, 风电发电量3057亿kW·h, 风电

装机和发电量再创新高的同时仍有部分省的弃风率超10%<sup>[1]</sup>。弃风的主要原因是风电发展与电力系统的协调性较差。由于风电波动频繁且幅度大, 大规模的风电接入后, 系统调节负担增大, 常规电源不仅要满足当日负荷曲线变化, 还需要平衡风电实时出力波动<sup>[2-3]</sup>。当风电出力超过系统调节范围时, 必须控制出力以保证系统动态平衡从而产生弃风<sup>[4-5]</sup>。

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0904500)  
宁夏回族自治区重点研发计划(TZZD/NZC180152C)

我国采取了一系列的政策和措施来提高风电消纳,降低弃风率。李克强总理在 2017 年政府工作报告中提出“抓紧解决机制和技术问题,优先保障可再生能源发电上网,有效缓解弃水、弃风、弃光状况”<sup>[6]</sup>。国家电网公司提出了 20 项措施缓解弃风弃光问题,并表示力争到 2020 年根本解决新能源消纳问题,弃风弃光率控制在 5%以内<sup>[7]</sup>。国家能源局开始对部分燃煤机组进行改造,以便灵活地参与电网调峰调频,加大了抽水蓄能电站和气电调峰机组的建设<sup>[8-9]</sup>。通过输配电网的建设和改造,加大新能源出力外输和就地消纳。

理论研究方面,文献[10]提出了一种多时间尺度协调的有功调度模式及其关键技术,通过降低风电预测误差,提高风电消纳。文献[11]提出利用弃风提高大规模风电消纳能力的理论研究方法。文献[12]采用多时间尺度、多电源、多控制目标的协调控制策略,提出了基于大规模风电消纳的协调控制技术。文献[13]从平衡方式、控制主体、资源调配、省际交换、安全约束和通信传输等方面提出了区域电网集中控制模式。文献[14]提出了一种新的风电消纳能力计算方法,通过在电网调峰困难期少量弃风使得在非调峰困难期获得更大的风电负荷。文献[15]研究常规电源开机方式与系统调峰之间的关系,核算出电网的调峰能力以及能够接纳风、光电等新能源的规模。

现有提高风电消纳技术的研究主要通过系统调峰时的风电调整、风电预测精度提高和电网控制范围扩大来实现,未对风火协调控制开展研究。本文研究一种基于风火协调的闭环控制系统,根据风电上网断面负载率设置不同区间,各区间采取不同的风火协调控制策略,在断面安全时尽可能提高风电消纳,减少弃风情况的发生。同时在可靠性方面,系统采用了指令防误检查和控制模式自动切换逻辑,保证系统的安全可靠运行。

## 1 系统概述

闭环控制系统基于基础平台获取电网设备模型、数据采集与监视控制(Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA)实时数据、本地状态估计数据和上级状态估计 E 格式文件,通过多源数据整合形成静态安全分析的基础数据。静态安全分析扫描出电网当前断面时刻基态和预想故障下存在的越限断面和过载设备,通过辅助决策计算出消除断面越限和设备过载有效的控制措施,下发给自动发电控制(Automatic Generation Control, AGC)系统进行闭环控制。

系统根据控制逻辑可以划分为基态闭环控制、预想故障闭环控制和事故跳闸闭环控制三种形式。

基态闭环控制通过 AGC 实时下发闭环措施,根据断面负载率划分区间采取不同的风火协调控制策略。在区间 1(负载率 $\leq 0.95$ )时风电跟踪预测出力<sup>[16-17]</sup>,火电跟踪 OPS 计划值;在区间 2 时( $0.95 < \text{负载率} \leq 1.1$ )断面存在轻微越限,断面相关火电控制到 OPS 下限,若断面仍越限则继续下调风电直至断面回到区间 1;区间 3(负载率 $> 1.1$ )时断面越限严重,尽快下调火电、风电使断面负载率到区间 2。

预想故障闭环控制通过人工确认下发控制措施,预想故障辅助决策提供预想故障下的风电、火电控制措施,调度员确认后将该预想故障下的风火控制措施导出措施 E 格式文件,下发给 AGC 进行闭环控制。当电网进行全网扫描时预想故障集庞大,采用并行计算平台进行并行计算,提高计算速度。

事故跳闸闭环控制功能在接收到综合智能告警发送的事故信息时,立即触发基态闭环控制获取新的状态估计数据进行计算,并下发给 AGC 进行闭环控制,其后续的控制逻辑和基态闭环控制一致,事故下的断面限额可由调度人员进行手工修改。

## 2 系统流程

闭环控制系统的处理流程如图 1 所示。

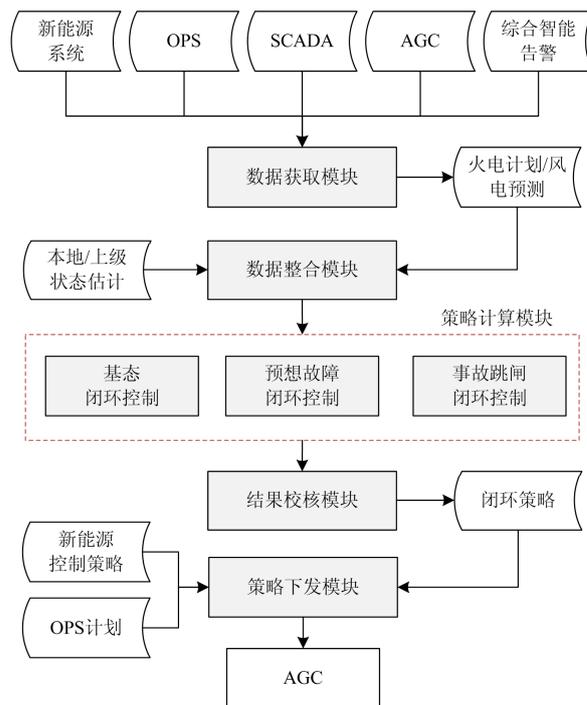


图 1 闭环控制系统流程图

Fig. 1 Flow diagram of closed loop control system

1) 数据获取模块: 从 OPS 获取火电计划和计划上下、下限值; 从新能源系统获取风电实时计划; 从 SCADA 获取机组实时出力和断面实时潮流; 从 AGC 获取机组控制模式; 从综合智能告警获取事故跳闸信息。

2) 数据整合模块: 进行数据接入、数据检查、多源数据整合, 生成后续计算所需的各类计算数据。

3) 策略计算模块分三个功能, 具体如下。

(1) 基态闭环控制: 针对电网实际运行工况下存在的断面重载/越限问题, 根据所处的控制区间计算风、火协调的控制措施。

(2) 预想故障闭环控制: 针对预想故障后存在的设备过载/断面越限问题, 考虑风电、火电的协调, 并综合考虑控制效果、控制代价、设备动作约束, 计算解决过载问题的控制措施。

(3) 事故跳闸闭环控制: 接收综合智能告警发送的事故跳闸信息和事故后的状态估计数据, 进行当前事故后的闭环控制策略计算。

4) 结果校核模块: 对闭环控制指令最终下发前进行防误检查, 校验不通过则本轮结果不刷新并告警提示。

5) 策略下发模块: 综合比较闭环控制策略、新能源控制系统的风电实时指令、OPS 火电计划, 检查通过后, 发送至 AGC 进行闭环。同时该模块可切换控制指令下发模式, 包括自动闭环控制、人工闭环控制和开环控制。开环控制时火电跟踪 OPS 计划值, 风电跟踪新能源计划值。

### 3 控制策略计算

#### 3.1 基态闭环控制策略

设监视断面  $j$  的负载率  $\lambda_j$ , 其计算公式为

$$\lambda_j = \frac{P_{Sj}}{P_{Sj,n}} \quad (1)$$

式中:  $P_{Sj}$  为断面  $j$  的当前有功;  $P_{Sj,n}$  为断面  $j$  的稳定限额。

根据断面负载率  $\lambda_j$  大小可以将控制策略分成 3 个区间, 如式(2)。

$$\eta_j = \begin{cases} \text{区间1, } \lambda_j > 0.95 \\ \text{区间2, } 0.95 \leq \lambda_j < 1.1 \\ \text{区间3, } \lambda_j \geq 1.1 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\eta_j$  为断面  $j$  的所处区间。

##### 1) 区间 1 控制策略

区间 1 时断面负载率未超稳定限额, 此时控制策略为增加风电消纳。

具体控制策略如下:

(1) 上调断面  $j$  相关风电(灵敏度>0.1)出力, 跟踪风电预估值, 风电闭环指令目标为新能源系统指令值。

现有调度系统暂无法准确进行风电预测, 因此闭环系统进行了风电能力预估。根据风场  $i$  当前出力  $P_{Wi}$  能否及时跟踪上轮指令  $P_{Wi,szl}$  判断该风场是否有风, 具体公式为

$$P_{Wi,yg} = \begin{cases} P_{Wi} \times (1 + r \times \frac{P_{Wi,n} - P_{Wi}}{P_{Wi,n}}), & P_{Wi} \geq P_{Wi,szl} \cdot k \\ \min(\frac{P_{Wi}}{k}, (1-k) \times P_{Wi,n}), & P_{Wi} < P_{Wi,szl} \cdot k \end{cases} \quad (3)$$

$$P_{Wi,zl} = \min(P_{Wi,yg}, P_{Wi,XNY}) \quad (4)$$

式中:  $P_{Wi,yg}$  为风电  $i$  的预估值;  $k$  为风电追及系数, 取值范围 0~1, 默认取 0.96;  $r$  为指令放大系数, 默认取 0.5;  $P_{Wi,n}$  为风场  $i$  装机容量;  $P_{Wi,zl}$  为风电  $i$  的闭环指令值;  $P_{Wi,XNY}$  为风电  $i$  的新能源系统指令值。

$P_{Wi} \geq P_{Wi,szl} \cdot k$  时, 认为系统有风, 风场预估值随出力增大而减小, 最大不超过系统装机容量。

$P_{Wi} \leq P_{Wi,szl} \cdot k$  时, 认为系统无风, 但预估值仍比当前出力略上浮, 考虑风场最小启动值。

(2) 风电出力无法上调时, 控制断面  $j$  相关火电(灵敏度>0.1)上调, 火电闭环指令目标跟踪到 OPS 计划值。

考虑火电回调速度较慢, 火电闭环指令增加爬坡率约束, 火电机组爬坡率取装机容量的 1%~1.5%。

$$\begin{cases} P_{Gi,OPS,min} \leq P_{Gi,zl} \leq P_{Gi,OPS} \\ |P_{Gi,zl} - P_{Gi}| = k \times P_{Gi,r} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $P_{Gi,zl}$  为火电  $i$  的闭环指令;  $P_{Gi,OPS}$  为火电  $i$  的 OPS 计划值;  $P_{Gi,OPS,min}$  为火电  $i$  的 OPS 计划下限;  $P_{Gi}$  为火电  $i$  当前出力;  $P_{Gi,r}$  为火电  $i$  的爬坡率;  $k$  为火电控制量放大倍数, 默认为 3。

##### 2) 区间 2 控制策略

区间 2 时断面已经重载或者轻微越限, 此时, 系统安全问题不突出, 控制策略采取保持风电出力, 下调断面关联火电以降低断面负载率。

具体控制策略如下:

(1) 控制断面  $j$  相关风电(灵敏度>0.1)保持当前出力, 防止风电增加断面越限更加严重。

$$P_{Wi,zl} = P_{Wi} \quad (6)$$

(2) 根据断面越限程度和火电灵敏度, 控制断面相关火电(灵敏度>0.1)下调, 最大下调到 OPS 计划下限。

$$\begin{cases} P_{Sj,OVLD} = P_{Sj} - P_{Sj,n} \times 0.95 \\ P_{Gj,C} \leq P_{Sj,OVLD} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} P_{Gj,C} = \sum_{i=1}^N |P_{Gi,zl} - P_{Gi}| \times P_{Gi,sj} \\ P_{Gi,cmin} \leq |P_{Gi,zl} - P_{Gi}| \leq k \times P_{Gi,r} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $P_{Sj,OVLD}$  为断面  $j$  超过区间 2 下限的过载量;  $P_{Gj,C}$  为断面  $j$  的火电控制总量;  $P_{Gi,sj}$  为火电  $i$  对断面  $j$  的灵敏度;  $N$  为断面  $j$  相关(灵敏度 $>0.1$ )的火电机组总数;  $P_{Gi,cmin}$  为火电  $i$  的最小控制精度, 取机组额定容量 1%;  $k$  为火电控制量放大倍数, 默认为 3。

(3) 断面相关火电控制到 OPS 下限后, 若断面负载率仍然超过 0.95, 则控制断面相关风电(灵敏度 $>0.1$ )下调, 同时设置各风场最大下调量为当前出力的 20%(可整定), 避免灵敏度靠前的风电被完全切除。

$$\begin{cases} P_{Sj,OVLD} = P_{Gj,C} + P_{Wj,C} \\ P_{Wj,C} = \sum_{i=1}^M |P_{Wi,zl} - P_{Wi}| \times P_{Wi,sj} \\ |P_{Wi,zl} - P_{Wi}| \leq P_{Wi} \times 0.2 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $P_{Wj,C}$  为断面  $j$  的风电控制总量;  $M$  为断面  $j$  相关(灵敏度 $>0.1$ )的风场总数;  $P_{Wi,sj}$  为风场  $i$  对断面  $j$  的灵敏度。

### 3) 区间 3 控制策略

区间 3 时断面已严重越限, 此时控制策略为同时控制风电、火电, 尽快解决断面越限问题。

具体控制策略如下:

(1) 同时控制断面相关风电、火电的闭环指令下调, 尽快解决断面过载。

$$\begin{cases} P_{Sj,OVLD} = P_{Sj} - P_{Sj,n} \times 1.1 \\ P_{Sj,OVLD} = P_{Gj,C} + P_{Wj,C} \end{cases} \quad (10)$$

(2) 火电闭环指令最大按照 1 倍(可整定)爬坡率下调, 实现火电快速下调。

$$\begin{cases} P_{Gj,C} = \sum_{i=1}^N |P_{Gi,zl} - P_{Gi}| \times P_{Gi,sj} \\ P_{Gi,cmin} \leq |P_{Gi,zl} - P_{Gi}| \leq P_{Gi,r} \end{cases} \quad (11)$$

(3) 风电闭环指令仍然考虑交易电量要求, 每轮最大下调量为当前出力的 20%(可整定)。

$$\begin{cases} P_{Wj,C} = \sum_{i=1}^M |P_{Wi,zl} - P_{Wi}| \times P_{Wi,sj} \\ |P_{Wi,zl} - P_{Wi}| \leq P_{Wi} \times 0.2 \end{cases} \quad (12)$$

## 3.2 预想故障闭环控制策略

预想故障闭环控制根据断面越限情况优先搜索火电控制措施, 若火电控制到 OPS 下限仍无法解决

断面越限, 则搜索风电控制措施。

具体控制策略如下:

1) 根据静态安全分析结果获取所有预想故障下监视断面的负载情况, 筛选出预想故障后存在断面越限的故障集, 定义为不安全故障集。

2) 遍历不安全故障集, 搜索每个不安全故障下各越限断面的火电、风电灵敏度并排序, 过滤灵敏度小于 0.1(可整定)的火电、风电, 形成每个故障下的控制措施空间。

3) 根据断面越限程度优先控制火电, 最低到 OPS 下限, 不再考虑爬坡率, 若所有断面相关火电已控制到 OPS 下限, 控制风电下调, 直至解决断面越限问题。

$$\begin{cases} P_{Sj,OVLD} = P_{Sj} - P_{Sj,n} \\ P_{Sj,OVLD} = P_{Gj,C} + P_{Wj,C} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} P_{Gj,C} = \sum_{i=1}^N |P_{Gi,zl} - P_{Gi}| \times P_{Gi,sj} \\ P_{Gi,OPS,min} \leq P_{Gi,zl} \leq P_{Gi,OPS} \\ P_{Wj,C} = \sum_{i=1}^M |P_{Wi,zl} - P_{Wi}| \times P_{Wi,sj} \end{cases} \quad (14)$$

4) 各不安全故障下的控制措施不直接下发至 AGC 进行闭环, 由调度员人工确认某一故障的控制措施后再将该故障下的控制措施导出 E 文件发送至 AGC 进行解析并进行闭环控制。

## 3.3 事故跳闸闭环控制策略

事故跳闸闭环控制由综合智能告警功能触发, 当综合智能告警检测到设备存在故障跳闸时, 经调度运行人员确认, 立即启动新一轮状态估计以获取跳闸后最新的潮流分布情况, 并将事故跳闸信息发送至闭环控制应用, 触发新一轮基态闭环控制计算。流程如图 2。

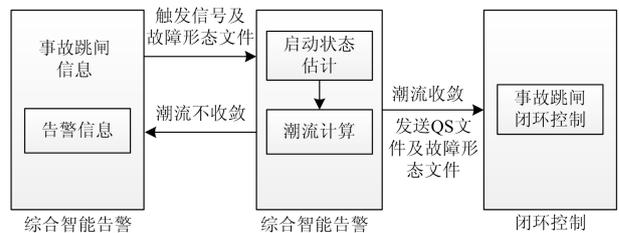


图 2 事故跳闸闭环控制流程图

Fig. 2 Flow diagram of fault-trip closed loop control

具体控制流程如下:

1) 综合智能告警模块检测到系统中发生 220 kV 以上线路故障、母线故障和变压器故障等引起电网结构发生改变时, 自动进行弹窗告警提示, 调度员

在告警页面中确认后以 E 格式文件形式记录故障形态转发至闭环控制应用,并触发状态估计应用计算;

2) 状态估计应用接收到综合智能告警的触发信号后立即启动新的状态估计,对事故后电网潮流进行计算。若收敛则导出潮流 E 格式文件发给闭环控制应用,若不收敛则发送告警信息给综合智能告警;

3) 闭环控制应用检测到综合智能告警消息后,再检测状态估计潮流收敛消息,立即停止当前轮计算,启动新一轮基态闭环控制计算,后续控制策略和基态闭环控制一致,不再累述。

## 4 指令校核和下发

### 4.1 指令防误检查

闭环控制指令下发给 AGC 前,需对指令进行防误检查,防止系统将异常指令下发给 AGC 执行,影响电网的安全稳定运行,同时对指令检查未通过的情况,需告警提示调度运行人员。

具体检查如下:

#### 1) 指令上下限检查

正常情况下,火电闭环指令不能超过 OPS 计划的上下限,风电闭环指令不能超过新能源系统提供的计划值。若该检查不通过,则对应机组/风场的指令不下发。

具体约束公式为

$$\begin{cases} P_{Gi,OPS.min} \leq P_{Gi,zl} \leq P_{Gi,OPS.max} \\ 0 \leq P_{Wi,zl} \leq P_{Wi,XNY} \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $P_{Gi,OPS.max}$  为机组  $i$  的 OPS 计划上限。

#### 2) 指令变化越限的电厂装机检查

统计检查 1 中指令越限机组/风场的装机总量,若越限的装机总量超过总装机的限定比例,则该轮所有闭环控制指令都不下发到 AGC,仍然保持上轮指令,同时告警提示调度运行人员。

具体约束公式为

$$\left( \sum_{i=1}^{M_{YX}} P_{Gi,n} + \sum_{i=1}^{N_{YX}} P_{Wi,n} \right) \leq k \times P_{GW,n} \quad (16)$$

式中:  $M_{YX}$  为越限火电总数;  $N_{YX}$  为越限风电总数;  $k$  为越限指令无效系数;  $P_{GW,n}$  为参与闭环控制的火电和风电总装机容量。

#### 3) 指令变化幅度检查

火电/风电闭环指令和当前出力的变化幅度不能超过装机容量的比例限值,该检查主要是防止指令发生突变,影响电网的安全稳定运行。

具体约束公式为

$$\begin{cases} P_{Gi,zl} - P_{Gi} \leq k \cdot P_{Gi,n} \\ P_{Wi,zl} - P_{Wi} \leq k \cdot P_{Wi,n} \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $k$  为指令突变防误系数。

#### 4) 总指令变化比例检查

统计所有火电和风电的闭环指令和当前总出力进行比较,若两者差值占总装机的比例超过限定比例,则该轮所有闭环控制指令都不下发到 AGC,仍然保持上轮指令,同时告警提示调度运行人员。

具体约束公式为

$$\left( \sum_{i=1}^{M_{ALL}} |P_{Gi,zl} - P_{Gi}| + \sum_{i=1}^{N_{ALL}} |P_{Wi,zl} - P_{Wi}| \right) \leq k \times P_{GW,n} \quad (18)$$

式中:  $M_{ALL}$  为闭环控制火电总数;  $N_{ALL}$  为闭环控制风电总数;  $k$  为限定比例。

### 4.2 下发模式切换

风电/火电闭环控制下发模式支持自动闭环控制、开环控制、人工闭环控制三种模式,其中风电开环时自动跟踪新能源系统计划,火电开环时自动跟踪 OPS 计划。

风电/火电控制模式支持手工切换和自动切换。其自动切换逻辑如图 3、图 4 所示。

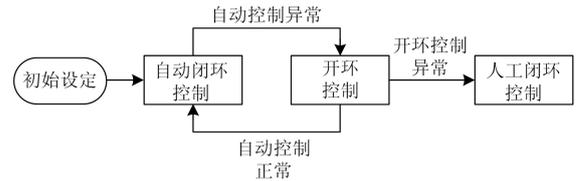


图 3 自动闭环控制切换逻辑图

Fig. 3 Logic diagram of automatic closed loop control switching

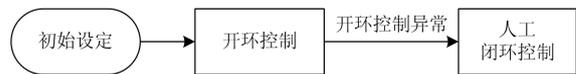


图 4 开环控制切换逻辑图

Fig. 4 Logic diagram of open loop control switching

如图,初始设定为自动闭环控制时,若自动闭环控制异常(如策略计算模块异常退出、策略计算超时等)则自动切换成开环控制。若后续自动闭环控制恢复正常,则系统自动恢复成自动闭环控制。若开环控制异常,则切换成人工闭环控制,每次闭环控制模式切换时都进行告警提示和历史采样,以便调度员及时采取控制措施。

初始设定为开环控制时,系统仅会在开环控制异常时切换成人工闭环控制,不会自动切换成自动闭环控制,若系统需自动闭环控制运行需手工切换。

## 5 应用实例

本文提出的基于风火协调的闭环控制系统已在山西电网得到实际测试并应用。

山西闭环控制系统部署在安全 I 区, 和智能调度技术支持系统(D5000)一体化建设, 共用数据库、工作站, 通过平台提供的 API 接口快速获取外部数据和结果存储展示。

山西闭环控制系统包括应用服务器和并行计算机群<sup>[18-20]</sup>, 应用服务器需要同时和基础平台、并行计算机群通信, 其网络都互相连通。并行计算机群仅需要和应用服务器通信, 与基础平台之间不发生耦合。

山西系统硬件架构图如图 5 所示。

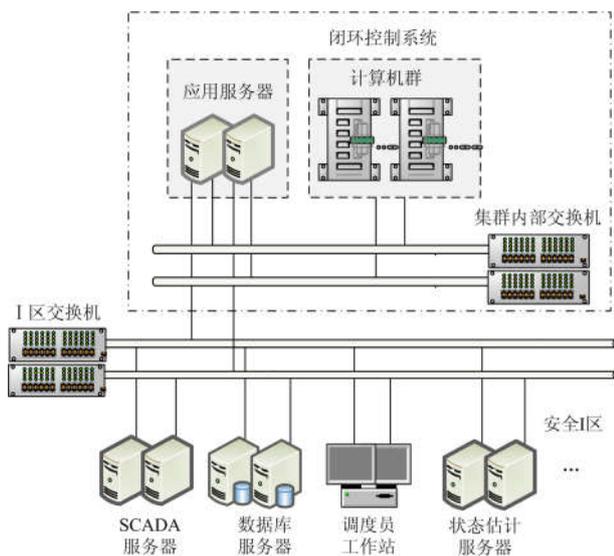


图 5 系统硬件架构图

Fig. 5 System's hardware architecture diagram

闭环控制系统软架构分工作站(客户端)、应用服务器和并行计算机群。

客户端主要负责画面浏览、计算参数维护, 主要供调度运行人员和系统维护人员使用。

应用服务器主要负责与基础平台和并行计算平台交互, 包括数据整合、计算流程组织、结果入库等功能。数据整合将基础平台获取计算数据进行有效整合, 形成基础的潮流方式。计算流程组织根据各应用功能所需的输入数据进行作业组织, 形成待计算的数据包。数据包下发后, 等待并行计算机群返回结果, 进行结果入库及历史采样。

并行计算机群包括管理节点和计算节点。管理节点具备数据包下载、计算流程组织、计算任务分解、计算结果回收、结果打包上传等功能。计算节点负责计算任务接收、应用计算、结果上传等功能。当管理节点异常时, 计算节点根据机群优先级自动切换成管理节点。

系统软件架构如图 6 所示。

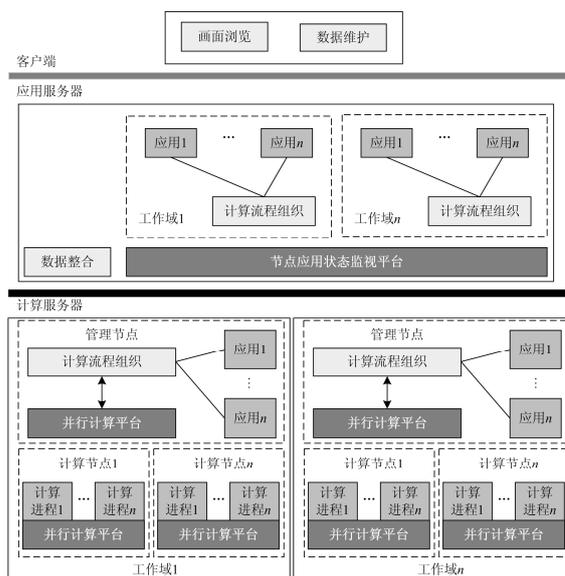


图 6 系统软件架构图

Fig. 6 System's software architecture diagram

忻侯双是山西北电南送断面的重要组成部分, 其相关的火电、风电场站数量众多。当断面越限时以往主要依靠调度运行人员手工调整机组出力, 存在着调整不及时或者过度调整的问题。

2017 年 11 月 23 日晚高峰山西直调用电负荷最大为 26 521 MW, 大同、忻州、朔州地区用电负荷总计 4 341 MW, 大同、忻州、朔州地区风电总出力达 5 280 MW, 大同、忻州、朔州供热机组基本全开(见表 1、表 2), 500 kV 忻侯双断面存在越限可能。

表 1 晋北地区 500 kV 供热机组

Table 1 500 kV heat supply unit in the north of Shanxi

500 kV 系统	轩岗	神二	神泉	河曲	塔山	恒北
容量/MW	2×660	2×500	2×600	3×600	2×660	2×330

表 2 晋北地区 220 kV 供热机组

Table 2 220 kV heat supply unit in the north of Shanxi

220 kV 系统	锦华	广宇	昱光	京玉	平朔	格瑞特
容量/MW	2×350	1×135 2×350	1×300	1×300	2×50 2×300	2×135

为避免对新能源消纳指标造成影响以及尽可能减少对火电发电计划的干预, 山西闭环控制系统仅选取对忻侯双断面灵敏度较高的 9 台火电机组(轩岗#1、#2 机, 神二#1、#2 机, 广宇#3、#4 机, 锦华#1、#2 机, 昱光#1 机)进行闭环, 其他火电机组和风电退出闭环控制。

500 kV 忻侯双断面稳定限额为 3 150 MW, 按照区间 2 的控制下限 0.95, 保证断面潮流控制在 3 000 MW 左右。如图 7 所示。

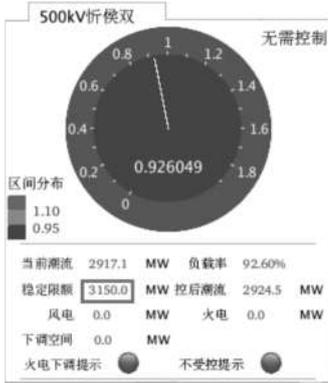


图 7 500 kV 忻侯双区间 1 潮流

Fig. 7 Power flow of 500 kV Xin-Hou double' interval 1

初始状态下, 500 kV 忻侯双负载率为 92.6%。随着晚高峰来临, 500 kV 忻侯双负载率进入区间 2(0.95≤负载率<1.1), 此时闭环控制系统监视界面(图 8)中的负载率仪表盘颜色变成黄色, 并给出了火电机组的控制量和下调空间, 开始对火电机组进行闭环控制。

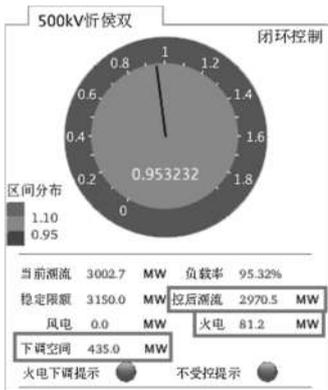


图 8 500 kV 忻侯双区间 2 潮流

Fig. 8 Power flow of 500 kV Xin-Hou double' interval 2

通过系统中的断面详细信息可以查看每个断面下具体机组的控制情况。图 9 中轩岗#1、#2 机, 昱光#1 机为跟踪网间潮流(AUTOR 模式), 不参与闭环指令, 其他机组的闭环指令按照机组爬坡率开始往下调整。

图 10 展示了 11 月 23 日投入闭环控制系统和 11 月 22 日人工控制的忻侯双断面潮流对比。通过对比发现自动闭环控制后的断面越限情况得到明显改善。23 日午高峰和晚高峰 17:00—17:30 时段和 17:50—20:30 时段内, 闭环控制系统将 500 kV 忻侯双断面潮流有效地控制在 3 000 MW 附近。同时发现 17:30—17:50 时段内, 闭环控制系统控制效果并不理想, 主要原因是部分闭环控制机组不受控, 未跟踪 AGC 指令运行。



图 9 断面详细信息

Fig. 9 Detailed information of transmission cross-section

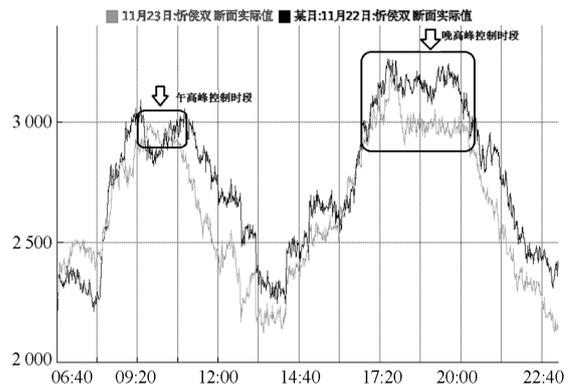


图 10 500 kV 忻侯双人工控制与自动控制对比

Fig. 10 Comparison of 500 kV Xin-Hou double manual and automatic control

17:30 分之后随着受控火电下调空间减少, 系统调节性能下降。闭环控制系统提示火电机组仍有 206 MW 下调空间, 且机组不受控告警灯亮(图 11)。



图 11 机组不受控告警提示

Fig. 11 Alarm prompt of uncontrolled unit

查看不受控火电机组指令情况, 发现神二#1、#2 机、锦华#1、#2 机一直未跟踪 AGC 指令(图 12、

图 13), 这是导致 17:30—17:50 时段内断面越限的重要原因之一。



图 12 神二#1 机组跟踪指令情况

Fig. 12 Trace command of Shen-Er #1 unit

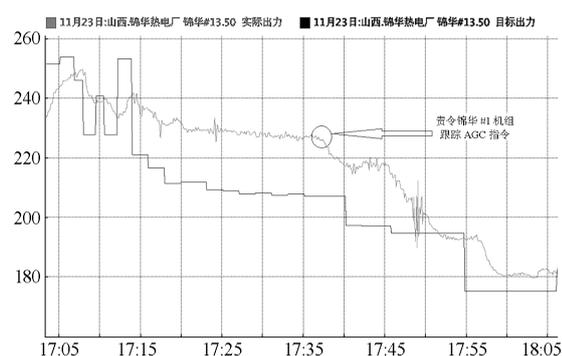


图 13 锦华#1 机组跟踪指令情况

Fig. 13 Trace command of Jin-Hua #1 unit

另外由于有三台机组(轩岗#1、#2 机/昱光#1 机)为 AUTOR 模式, 不参与断面下凋控制, 导致断面下凋能力不足, 17:53 将轩岗#2 机组退出 AUTOR 模式, 切换为 SCEHO 模式, 跟踪闭环指令。从图 11 中可以看到, 在通知神二、锦华机组跟踪指令以及退出轩岗#2 机组 AUTOR 模式后, 500 kV 忻侯双断面潮流很快控制到 3 000 MW 附近, 并长期保持稳定。

## 6 结论和展望

本文设计了一种风火协调的闭环控制系统。根据风电上网断面的负载率设置不同区间, 各区间采取不同的风火协调控制策略, 在保证断面安全稳定的前提下尽可能提高风电消纳, 在断面发生越限时则通过尽可能多地降低火电和减少部分风电, 尽快解决断面的安全稳定问题。最后通过在山西电网忻侯双断面的实际应用验证系统的有效性和实用性。

系统可以在以下方面开展进一步的研究:

1) 系统在断面潮流调整时全网平衡主要依靠

网间潮流机组的自动调整, 有可能会导导致网间潮流指标不合格。后续系统可以考虑在降低断面送端风电、火电的同时增加断面受端火电的出力, 保证系统全网平衡。

2) 系统中断面稳定限额目前主要依靠人工维护, 在设备检修或事故跳闸时断面稳定限额变化无法自动更新, 导致指令的计算和控制发生偏差。后续可进一步考虑接入限额电子化系统, 在断面稳定限额变化时自动更新到闭环控制系统中。

## 参考文献

- [1] 国家能源局发布 2017 年风电并网运行情况[EB/OL]. [2018-02-08]. [http://www.cceia.com/News\\_View.aspx?newsid=72197&classid=2](http://www.cceia.com/News_View.aspx?newsid=72197&classid=2).
- [2] 薛禹胜, 雷兴, 薛峰, 等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5029-5040.  
XUE Yusheng, LEI Xing, XUE Feng, et al. A review on impacts of wind power uncertainties on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5029-5040.
- [3] 刘巨, 姚伟, 文劲宇, 等. 大规模风电参与系统频率调整的技术展望[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 638-646.  
LIU Ju, YAO Wei, WEN Jinyu, et al. Prospect of technology for large-scale wind farm participating into power grid frequency regulation[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 638-646.
- [4] 范高锋, 张楠, 梁志锋, 等. 我国“三北”地区弃风弃光原因分析[J]. 华北电力技术, 2016(12): 55-59.  
FAN Gaofeng, ZHANG Nan, LIANG Zhifeng, et al. Analysis on the "Three Norths" region wind and PV power limitation[J]. North China Electric Power, 2016(12): 55-59.
- [5] 裴哲义, 王彩霞, 和青, 等. 对中国新能源消纳问题的分析与建议[J]. 中国电力, 2016, 49(11): 1-7.  
PEI Zheyi, WANG Caixia, HE Qing, et al. Analysis and suggestions on renewable energy integration problems in China[J]. Electric Power, 2016, 49(11): 1-7.
- [6] 新华社. 政府工作报告(全文)[EB/OL]. [2017-03-16]. [http://www.gov.cn/premier/2017-03/16/content\\_5177940.html](http://www.gov.cn/premier/2017-03/16/content_5177940.html).
- [7] 中国经济网. 国网出台 20 项措施解决限电难题 2020 年将弃风弃光率控制在 5% 以内[EB/OL]. [2017-01-26]. [http://www.ce.cn/cysc/ny/gdxw/201701/26/t20170126\\_19890644.shtml](http://www.ce.cn/cysc/ny/gdxw/201701/26/t20170126_19890644.shtml).
- [8] 潘文霞, 范永威, 朱莉, 等. 风电场中抽水蓄能系统容量的优化选择[J]. 电工技术学报, 2008, 23(3): 120-124.  
PAN Wenxia, FAN Yongwei, ZHU Li, et al. The optimal

- sizing for pumped storage system in wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(3):120-124.
- [9] 胡殿刚, 潘正婕, 徐昊亮, 等. 大规模可再生能源并网条件下天然气机组调峰空间估算[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 87-93.  
HU Diangang, PAN Zhengjie, XU Haoliang, et al. Peaking capacity estimation of natural gas unit under the condition of large-scale renewable energy connecting with power grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 87-93.
- [10] 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.
- [11] 刘新东, 方科, 陈焕远, 等. 利用合理弃风提高大规模风电消纳能力的理论研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 35-39.  
LIU Xindong, FANG Ke, CHEN Huanyuan, et al. Research on rational wind power casting theory for large-scale wind power integration improvement[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 35-39.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 刘畅, 吴浩, 高长征, 等. 风电消纳能力分析方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 61-66.  
LIU Chang, WU Hao, GAO Changzheng, et al. Study on analysis method of accommodated capacity for wind power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 61-66.
- [15] 张顺, 葛智平, 郭涛, 等. 大规模新能源接入后系统调峰能力与常规电源开机方式关系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 106-110.  
ZHANG Shun, GE Zhiping, GUO Tao, et al. Research on relationship between the capacity of systematic peak regulation and conventional power startup mode after access to large-scale new energy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 106-110.
- [16] LI Zhi, YE Lin, ZHAO Yongning, et al. Short-term wind power prediction based on extreme learning machine with error correction[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 9-16. DOI: 10.1186/s41601-016-0016-y.
- [17] ZHENG D, ESEYE A T, ZHANG J, et al. Short-term wind power forecasting using a double-stage hierarchical ANFIS approach for energy management in microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 136-145. DOI: 10.1186/s41601-017-0041-5.
- [18] 薛巍, 舒继武, 严剑峰, 等. 基于集群机的大规模电力系统暂态过程并行仿真[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 38-43.  
XUE Wei, SHU Jiwu, YAN Jianfeng, et al. Cluster-based parallel simulation for power system transient stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 38-43.
- [19] 方勇杰, 王胜明. 适应多级调度安全稳定分析资源共享的分布式计算管理平台[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(23):1-8.  
FANG Yongjie, WANG Shengming. Distributed computing management platform for sharing resource of multi-level dispatch security and stability analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 1-8.
- [20] 王胜明, 许剑冰, 邵伟, 等. 基于分级调度的资源动态优化分配方法[C] // 中国智能自动化会议, 9月27-29日, 2009, 南京, 中国: 197-202.  
WANG Shengming, XU Jianbing, SHAO Wei, et al. Optical approach for dynamic resource allocating based on hierarchy scheduling[C] // CIAC, Sept 27-29, 2009, Nanjing, China: 197-202.

收稿日期: 2018-10-19; 修回日期: 2018-12-26

作者简介:

陈 金(1983—), 男, 学士, 工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制; E-mail: chenjin@sgepri.sgcc.com.cn

郑 亮(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制;

谢丽军(1986—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。

(编辑 葛艳娜)