# 含抽水蓄能电站的可再生能源电网优化调度策略

郭志忠1,叶瑞丽1,刘瑞叶1,刘建楠2

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001;2. 国家电网公司交流建设分公司,北京 100052)

**摘要:**由于可再生能源电网发电功率的不确定性十分突出,以功率平衡为首要任务的电网调度控制必须采取 有针对性的应对措施。在电网储纳运行机制的基础上,建立含抽水蓄能电站的日前调度及实时调度的数学 模型。将电网备用分为波动性备用(即调峰备用)和不确定性备用:平衡波动性功率的备用容量主要由常规 电源承担,平衡预测误差的不确定性备用主要由抽水蓄能电站承担,2类电源分工互济实现电网功率平衡。 提出一个风电上网功率稳定性评价指标,用于衡量不同调度策略补偿失衡功率的优劣。算例分析验证了所 提调度策略是可行的。

## 0 引言

随着可再生能源装机容量的不断增大,尤其是 风电、光电(光伏发电、光热发电)等不确定性可再 生电源 UREP(Uncertainty Renewable Energy Power) 的发展,给电网带来的不确定性极大地增加了电网 安全稳定运行的难度。以 UREP 为主力电源的电网 称为可再生能源电网。可再生能源电网中, UREP 产生的失衡功率更大,用常规火电机组去消纳,响应 速度受限,同时需要众多常规火电机组压火运行以 提供备用,备用容量不足时还会影响负荷。

储能装置可有效地平抑风、光等能源产生的功率波动,将"劣质"能源转换为受端可接受的优质清洁能源,实现能量在时间上"腾挪",有效地提高UREP的可调度性。目前,抽水蓄能是电力系统中容量大、技术成熟、成本低廉的储能设施。

可再生能源电网中,抽水蓄能电站的功能与定 位将发生变化。以火电为主力电源的电网中,抽水 蓄能电站的主要功能是平衡波动性功率,由于负荷 预测较为准确,抽水蓄能电站平衡波动的时间段及 功率值是确定的;可再生能源电网中,UREP产生的 失衡功率值波动大,发生的时间也具有随机性,常规 火电机组的响应特性决定其难以应对此类不确定 性。应对 UREP 失衡功率,需充分利用抽水蓄能电 站响应速度快、可储可发的特点,同时也要求抽水蓄 能电站容量更大、状态切换更加频繁、利用小时数 更长。

针对含风电、光电及抽水蓄能电站的系统,已有 学者提出了优化调度思路,如文献[1-2]提出将风电 场与抽水蓄能电站联合调度,使综合出力跟随负荷 变化,文献[3]提出了风电-抽水蓄能电站联合运行 方式下的抽水蓄能电站容量优化方法,文献[4]考

收稿日期:2017-03-14;修回日期:2017-10-31

虑了风电场出力的波动性,设计电池储能与抽水蓄 能电站协调优化调度模式,文献[5]考虑了抽水蓄 能机组的实际运行特性对优化调度的影响。但上述 文献均未考虑风电功率预测误差对电网运行的影 响,以及抽水蓄能电站容量与调度策略之间的协调 关系。

风能资源间歇、随机的自然属性决定了风电功 率不确定性大、可预测性差的特点。对于电网的调 度人员而言,风电上网功率的不确定性主要体现为 风功率预测误差较大。基于历史数据<sup>[6]</sup>、时间序 列<sup>[7]</sup>、人工智能<sup>[8]</sup>等已有预测方法对超短期风电功 率值(0~4 h)预测较有效。对于短期预测(24~ 72 h)目前已有的方法效果较差<sup>[9-10]</sup>,均未达到调度 可完全信任的程度,对于日前计划有很大影响<sup>[11-12]</sup>。

本文基于电网失衡功率,阐述功率平衡方法及 储纳运行机制,并以抽水蓄能电站为例,建立日前发 电计划与实时调度的模型。为分析 UREP 上网功率 的稳定性以及系统备用功率调用情况,以风电为例, 提出风电上网功率稳定性评价指标。最后对四元单 母线可再生能源简单系统和张家口电网进行算例分 析,对所提储纳策略的可行性进行定性验证,并探讨 了调度策略与储能容量之间的关系。

#### 1 储纳运行机制

#### 1.1 功率平衡方法

含有 UREP 成分的电网发电功率具有不确定 性,调度运行须用含有不确定成分的发电功率去平 衡随机性的负荷。除非采取措施,否则将出现不平 衡功率,即失衡功率,UREP 比重越大,问题越严重。

将 UREP 与负荷合并为等效负荷,等效负荷的 概念将可再生能源电网功率平衡问题转化为:用确 定可控的电源平衡不确定的负荷。维系功率平衡是 电网调度运行的第一要素。消除失衡功率  $\Delta P(t)$ 的 方法主要有丢弃法、消纳法、储纳法 3 种。

## **a.** 丢弃法。

失衡功率  $\Delta P(t) < 0$ ,将多余的 UREP 弃掉;失衡 功率  $\Delta P(t) > 0$ ,将多余的负荷弃掉。弃电源、弃负荷 是电网最不愿意采取的手段。

## b. 消纳法。

消纳法是调节常规电源、主动性负荷去消化接纳 UREP 功率的方法。 $\Delta P(t) < 0$ ,减小常规电源功率、增加主动性负荷功率;失衡功率  $\Delta P(t) > 0$ ,增加 常规电源功率、减小主动性负荷功率。采用消纳法 要求电网拥有足够的常规电源、主动性负荷容量和 响应速度<sup>[13-15]</sup>。

如果常规电源以火电为主,大容量装机与节能 减排矛盾。主动性负荷依赖负荷形式,如电动汽车 充电装置,依赖有效的需求侧管理。拥有大容量的 主动性负荷是困难的。

如果常规电源以水电为主,碳排放不大、响应速 度快,消纳是很好的方法。比如丹麦电网<sup>[16]</sup>,依靠 芬兰、挪威、德国等邻国丰富的水电抑制本国风电的 功率不确定性。消纳动用电源资源,电源力量不足 时还要动用负荷资源,牵扯因素多而杂,UREP 的比 重越大,方案越复杂。

**c.** 储纳法。

储纳法是利用储能设施接纳 UREP 功率的方法。失衡功率  $\Delta P(t) < 0$  是储能状态,将多余电能存储;失衡功率  $\Delta P(t) > 0$  是发电状态,将存储的能量转换为电源功率,弥补发电功率的不足。

采用储纳法要求储能设施具有足够的功率容量 和能量容量。储能设施没有碳排放,完备的储纳过程 不依赖常规电源,不依赖主动性负荷,响应速度快,是 可再生能源电网解决失衡功率问题的有效手段。

广义地,凡有助消除失衡功率  $\Delta P(t)$ 、避免 UREP 功率损失的方法都是消纳手段。为区别于储 纳法,本文中消纳法指基于常规电源和主动性负荷 的方法。储能设施容量不足时,须采取储纳、消纳相 结合的方法。

#### 1.2 储纳运行机制

电网制定发电计划是关于功率的三步平衡过程:第一步是日前发电计划,电源功率平衡负荷功率日前预测值;第二步是实时发电计划,调整电源功率,平衡负荷实时预测值与日前预测值的差值;第三步是自动发电控制,自动发电控制装置自动平衡负荷实际值与实时预测值的差值。

储纳运行机制由日前调度、实时调度及自动发 电装置3个环节衔接而成,分别平衡等效负荷功率 的日前预测值、实时预测值与日前预测值的差值、实 际值与实时预测值的差值。

当前调度周期内抽水蓄能电站累计的失衡能量在下一个调度周期内平衡。

## 2 日前发电计划

可再生能源电网的日前调度是基于 UREP 及负荷的功率预测值安排常规电源的机组运行状态。与高精度的负荷预测相比,日前 UREP 发电功率预测精度较低,场景模糊,但也足以显示电网运行的态势。

日前调度需安排好备用。根据备用容量调节功 率的可预测性分为波动性备用和不确定性备用。波 动性备用旨在实现削峰填谷,尽可能调用常规电源; 不确定性备用旨在应对预测误差,优先调用抽水蓄 能电站。

#### 2.1 目标函数

日前计划以调度周期内火电机组运行成本最低 为目标函数,该函数中假定了风电运行成本为0,即 风电优先上网:

min  $\sum_{i=1}^{T} \sum_{i=1}^{N_{\rm G}} (a_i P_{g,i,t}^2 + b_i P_{g,i,t} + c_i I_{i,t}) + S_{{\rm U}i} y_{i,t}$  (1) 其中, *T* 为调度周期的时段总数; *N*<sub>G</sub> 为火电机组台数; *P*<sub>g,i,t</sub>为第*i* 台机组第*t* 时段的功率; *a*<sub>i</sub>、*b*<sub>i</sub>、*c*<sub>i</sub>为第*i* 台机组发电成本系数; *I*<sub>i,t</sub>为第*i* 台机组在第*t* 时段的运行状态; *S*<sub>Ui</sub>为第*i* 台火电机组启动成本; *y*<sub>i,t</sub>为第*i* 台机组在第*t* 时段的开机状态, 其值为1时表示第*i* 台机组在第*t* 时段正处于开机过程。

## 2.2 约束条件

Nc

a. 功率平衡约束。

$$\sum_{i=1}^{N_{\rm G}} P_{{\rm g},i,t} = P_{\rm L} - \sum_{j=1}^{N_{\rm W}} P_{{\rm wg},j,t} = P_{\Delta}(t)$$
(2)

其中, $N_w$  为风电场的个数; $P_{wg,j,t}$ 为第j个风电场第t时段计划上网功率; $P_{L}$ 为第t时段系统负荷; $P_{\Delta}(t)$ 为第t时段等效负荷。

**b.**正负旋转备用约束。

日前调度须预留足够的备用容量,用于平息波 动性功率和不确定性功率。系统正的旋转备用由火 电机组和抽水蓄能电站可用发电功率提供;系统负 的旋转备用由火电机组可降低发电功率、抽水蓄能 电站可用抽水功率和风电场弃风功率共同提供。抽 水蓄能电站不参与实际发电功率,仅发挥备用的作 用。能量库容不受限时,抽水蓄能电站的备用功率 为发电、抽水的最大功率,同时,其运行功率受前一 调度时段结束时的能量库容限制。其表达式如式 (3)、式(4)所示。

$$\sum_{i=1}^{N} \left( P_{g,i}^{\max} I_{i,t} - P_{g,i,t} \right) + \sum_{k=1}^{N_{p}} \left[ \min \left( P_{gen,k}^{\max}, \frac{V_{t-1} - V_{\min}}{t_{interval}} \right) \right] \ge R_{up,t} + \delta_{w} \sum_{j=1}^{N_{W}} P_{wg,j,t}$$
(3)

$$\sum_{i=1}^{N_{\rm G}} \left( P_{\rm g,i,t} - P_{\rm g,i}^{\rm min} I_{i,t} \right) + \sum_{j=1}^{N_{\rm W}} P_{\rm wg,j,t} + \\ \sum_{k=1}^{N_{\rm P}} \left[ \min \left( P_{\rm pump,k}^{\rm max}, \frac{V_{\rm max} - V_{t-1}}{t_{\rm interval}} \right) \right] \ge (4) \\ R_{\rm dn,t} + \delta_{\rm w} \sum_{i=1}^{N_{\rm W}} P_{\rm wg,j,t}$$

其中,  $P_{g,i}^{max}$ 、 $P_{g,i}^{min}$ 分别为第 i 台火电机组发电功率的 上、下限值;  $N_p$  为抽水蓄能电站机组台数;  $P_{gen,k}^{max}$ 、  $P_{pump,k}^{max}$ 分别为抽水蓄能电站第 k 台机组发电、抽水的 最大功率;  $\delta_w$ 为风电场上网功率备用率;  $t_{interval}$ 为一个 调度周期的时间长度;  $R_{up,t}$ 、 $R_{dn,t}$ 分别为负荷向上、向 下的备用需求;  $V_{max}$ 、 $V_{min}$ 、 $V_t$ 分别为抽水蓄能电站的能 量库容上限、能量库容下限及在第 t 时段能量库容值。

c. 火电机组特性约束。

火电机组的特性约束有发电功率上、下限约束, 爬坡速率约束,开停机运行状态约束。

$$P_{g,i}^{\min}I_{i,t} \leqslant P_{g,i,t} \leqslant P_{g,i}^{\max}I_{i,t}$$

$$\tag{5}$$

$$P_{g,i,t} - P_{g,i,t-1} \le U_{Ri}(1 - y_{i,t}) + P_{g,i}^{\min}y_{i,t} \quad (6)$$

$$P_{g,i,t-1} - P_{g,i,t} \le D_{\mathrm{R}i}(1 - z_{i,t}) + P_{g,i}^{\mathrm{min}} z_{i,t} \quad (7)$$

$$y_{i,t} - z_{i,t} = I_{i,t} - I_{i,t-1}$$
(8)

$$y_{i,t} + z_{i,t} \le 1 \tag{9}$$

其中, $z_{i,i}$ 为第i台火电机组第t时段的停机状态,为 0-1 变量; $U_{Ri}$ 、 $D_{Ri}$ 分别为第i台火电机组一个调度 时段向上、向下的爬坡功率。

d. 风电场上网功率约束。

风电场计划上网功率应在预测风电可发功率范围内。

$$0 \leqslant P_{_{\rm wg},j,t} \leqslant P_{_{\rm wp},j,t} \tag{10}$$

其中, $P_{wp,i,t}$ 为第j个风电场第t时段计划上网功率值。

## 3 实时调度

可再生能源电网中, UREP 日前功率预测误差 很大,实时调度的作用凸显。UREP 发电功率实时 预测相对准确,因此自动发电控制装置的功率较小, 失衡功率的主要部分由储能设施平衡。具备功率、 能量吞吐功能的抽水蓄能电站容量有限,应优先用 于实时发电计划。

实时调度过程中,优先调用抽水蓄能电站平衡 等效负荷的实时预测值与日前预测值的偏差,其次 调用常规能源,最后考虑弃风、切负荷。

实时调度的目标函数与日前调度目标函数一 致。约束条件中,火电机组运行状态确定,保留出力 上、下限约束,增加抽水蓄能电站功率与能量库容运 行约束,如式(11)—(14)所示。

$$K_{\text{gen},k,t} P_{\text{gen},k}^{\min} \leqslant P_{\text{gen},k,t} \leqslant K_{\text{gen},k,t} P_{\text{gen},k}^{\max} \quad (11)$$

$$K_{\text{pump},k,\iota}P_{\text{pump},k}^{\min} \leq P_{\text{pump},k,\iota} \leq K_{\text{pump},k,\iota}P_{\text{pump},k}^{\max}$$
(12)

$$V_{\min} - V_0 \leq \int_{t_0}^{t} \left( \eta_{\text{pump}} \sum_{k=1}^{N_{\text{P}}} P_{\text{pump},k,\tau} - \eta_{\text{gen}} \sum_{k=1}^{N_{\text{P}}} P_{\text{gen},k,\tau} \right) dt \leq V_{\max} - V_0$$
(13)

$$\sum_{k=1}^{N_{\rm p}} K_{\text{gen},k,t} \sum_{k=1}^{N_{\rm p}} K_{\text{pump},k,t} = 0$$
(14)

其中, $K_{\text{gen},k,t}$ 、 $K_{\text{pump},k,t}$ 分别为第k个抽水蓄能电站在 第t时段的发电、抽水状态,为0-1变量; $P_{\text{gen},k}^{\text{min}}$ 、  $P_{\text{pump},k}^{\text{min}}$ 分别为抽水蓄能电站第k台机组发电、抽水的 最小功率; $P_{\text{gen},k,t}$ 、 $P_{\text{pump},k,t}$ 分别为第k个抽水蓄能电 站在第t时段的发电、抽水功率; $\eta_{\text{gen}}$ 、 $\eta_{\text{pump}}$ 分别为抽 水、发电运行工况下能量库容-功率的转换效率。

## 4 风电上网功率稳定性评价指标

风能是典型的不确定性可再生能源,本文以风 力发电为例,提出风电上网功率稳定性评价指标。 风能的自然属性决定风电计划上网功率与自然发电 功率之间必然存在偏差,即产生失衡功率。风电场 上报调度控制中心的风电计划上网功率值是否能够 如期完成,是否需要常规机组、抽水蓄能电站提供备 用,备用不充足时是否会产生弃风、切负荷,都是风 电场计划上网功率可靠性的评价内容。

本文按照图1所示风电场失衡功率补偿方式对 电网调度产生的不同影响,建立风电上网功率稳定 性评价指标,表达式见式(15)。

$$f_{s} = 1 - \frac{\sum \alpha_{ps,up} P_{ps,up} + \alpha_{ps,dn} P_{ps,dn} + \alpha_{w} P_{w,d}}{\sum P_{wp,j,t}} - \frac{\sum \alpha_{g,up} P_{g,up} + \alpha_{g,dn} P_{g,dn} + \alpha_{l,d} P_{l,d}}{\sum P_{wp,j,t}}$$
(15)

其中, $P_{w,d}$ 、 $\alpha_w$ 分别为风电场实际弃风功率值及对应 的惩罚因子; $P_{ps,up}$ 、 $P_{ps,dn}$ 、 $\alpha_{ps,dn}$ 分别为抽水蓄 能电站上调、下调备用功率值及对应的惩罚因子;  $P_{g,up}$ 、 $P_{g,dn}$ 、 $\alpha_{g,up}$ 、 $\alpha_{g,dn}$ 分别为常规机组上调、下调备 用功率值及对应的惩罚因子; $P_{1,d}$ 、 $\alpha_{1,d}$ 分别为弃负荷 功率值及对应的惩罚因子。惩罚因子是根据系统中 实时调度可调整的电源及其成本来确定,其表征了 不同电源补偿风电功率偏差所支付费用与风电上网 电价的倍数。由于抽水蓄能调节速度快、成本低,其



Fig.1 Compensation methods of unbalanced power for wind farm

对应的惩罚因子较小;火电机组调度速度慢、成本 高,其对应的惩罚因子较大;负荷则是依据其重要性 来确定惩罚因子的大小。

当指标 f<sub>s</sub>=1时,表示实时预测与日前预测一 致,实时调度不需要调整发电功率,风电按照日前计 划值执行,风电上网的功率是稳定的。但实际工程 中,风电的实时预测值往往与日前预测值有较大偏 差,且更接近实际值。当风电功率预测值存在偏差 时,需调用其他电源或负荷来补偿这一偏差,此时, 稳定性指标小于1。其他电源的惩罚因子大于1,或 补偿的功率值较大时,稳定性评价指标也会出现小 于0的情况。

## 5 算例分析

## 5.1 简单系统算例分析

首先以四元单母线可再生能源简单系统为例对 本文所提储纳策略的可行性进行定性验证。四元单 母线可再生能源简单系统结构如图 2 所示,包含 2 台火电机组、1 座抽水蓄能电站、1 个风电场、1 个负 荷。就基本概念而言,此系统不失一般性。



#### 图 2 四元单母线可再生能源系统

Fig.2 Renewable energy system with four elements and single bus

选取 IEEE-RTS 96 系统负荷及 NREL 公布的某 风电场 3 月 15 日数据作为典型日数据进行分析,见 图 3。计算风电上网功率稳定性指标对应的惩罚因 子为  $\alpha_{g,up} = 1.5 \ \alpha_{g,dn} = 0.5 \ \alpha_{ps,up} = 0 \ \alpha_{ps,dn} = 0.2 \ \alpha_{w} =$ 1。假设抽水蓄能电站的额定功率  $P_{M} = 100 \ MW$ ,能 量库容  $E_{M} = 1 \ 000 \ MW \cdot h_{o} \ R$ 据文献[17]的研究结 果,假设抽水蓄能电站初始能量库容为  $0.5(E_{max} - E_{min})_{o}$ 





Fig.3 Forecasting curves of typical daily load and wind power 设计2种调度策略。

a. 策略1采用本文所提模型,即日前发电计划

中抽水蓄能电站仅作为备用,不参与调峰;实时调度 中优先调用抽水蓄能电站补偿失衡功率。

b. 策略 2 假定日前机组组合中考虑抽水蓄能, 实时调度中由抽水蓄能电站剩余库容与火电机组可 用功率参与调节不确定性电源预测误差引起的失衡 功率。

实时调度过程中,2种策略下抽水蓄能电站的 运行工况采用能量-功率图表示。在该图中抽水蓄 能电站运行轨迹具有单调性,抽水状态时存储能量 *E*<sub>st</sub>(*t*)单调上升,发电状态时存储能量*E*<sub>st</sub>(*t*)单调下 降。运行点具有时变性,总处于运动之中,除非处在 纵轴上。2种策略抽水蓄能电站运行状态见图4。



#### 图 4 抽水蓄能电站能量-功率运行图

Fig.4 Energy vs. power of pumped storage station

由图 4(a)可以看出,采用策略1,抽水蓄能电站 在 03:00—04:00、10:00—12:00 运行于功率约束边 界。采用策略 2,抽水蓄能电站在 00:00—01:00、 02:00—05:00、10:00—13:00、22:00—23:00 运行于 功率约束边界,在 05:00—06:00 达到能量库容上 限,不能继续抽水。

由图 5 可看出,采用策略 1,火电机组仅在 03:00—04:00、10:00—12:00 时段补偿失衡功率,补 偿失衡功率的最大值为 29.8 MW;采用策略 2 时,在 00:00—01:00、03:00—06:00、10:00—13:00、 22:00—23:00 等 10 个时段补偿失衡功率,且需补偿 失衡功率的最大值为 66.13 MW。

2种策略调度结果对比如表1所示。由表1可 知,策略1实时调度中明显减少了常规火电机组出 力的调整,风电上网稳定性较高。

 $N_{\rm D}$ 



图 5 2 种策略下火电机组实时调度补偿的失衡功率

Fig.5 Unbalanced power compensated by real-time dispatch of thermal unit for two strategies

表 1 2种调度策略调度结果比较

Table 1 Comparison of results between two scheduling strategies

参数	策略1	策略 2
抽水蓄能补偿失衡能量/(MW·h)	1 186.2	845.5
抽水蓄能失衡功率补偿率/%	96.57	68.37
抽水蓄能电站发电小时数/h	13	12
抽水蓄能电站抽水小时数/h	11	11
火电补偿失衡能量/(MW·h)	42.2	391.1
火电失衡功率补偿率/%	3.43	31.63
火电机组运行成本/元	127 471	126 208
风电上网功率稳定性指标/%	96.11	86.76

#### 5.2 张家口市电网典型日算例分析

张家口市风电、太阳能发电资源丰富,位于华北 负荷中心,是我国重要的可再生能源开发利用基地。 张家口市电网负荷峰值为2567 MW,外送负荷为 1500 MW,典型日负荷以及风电功率日前与实时预 测值如图6所示。该市可调火电机组15台,总装机 容量为4.4 GW,假定拟建抽水蓄能电站容量为 1.1 GW,能量容量为88 GW·h。该市的电网结构图 见附录。



图 6 张家口市负荷及风电预测值

Fig.6 Load and wind forecasting of Zhangjiakou Power Grid

设计4种调度方案,分别用于比较无抽水蓄能 电站(方案1)和有抽水蓄能电站(方案2-4)时调 度运行的优劣。

方案1:无抽水蓄能电站的情况下,对火电机组 与风电进行日前调度,仅依靠火电机组为风电提供 向上备用,火电机组和风电共同提供向下备用,实时 调度时调整火电机组发电功率和弃风量。

方案2:有抽水蓄能电站,日前调度时抽水蓄能

仅作为不确定性备用。实时调度时优先调整抽蓄补 偿失衡功率,其次调整火电机组补偿失衡功率。

方案 3:有抽水蓄能电站,日前调度时抽水蓄能 全部容量优先作为波动性备用,剩余容量作为不确 定性备用,实时调度时优先调整抽水蓄能的运行状 态及功率,其次调整火电机组发电功率及风电的弃 风量。

方案 4:有抽水蓄能电站,采用储纳调度运行策略,该策略综合了抽水蓄能仅作为波动性备用和仅 作为不确定性备用 2 种方案的优势。日前调度在抽 水蓄能满足 90%备用容量需求时,其富余容量作为 波动性备用。实时调度时优先调整抽蓄补偿失衡功 率,其次调整火电机组发电功率补偿失衡功率。

针对方案 4,日前调度模型需增加抽水蓄能作 为不确定性备用的约束,如式(16)一(18)所示。

$$\delta_{1, day} P_{Lt} + \delta_{w, day} \sum_{j=1}^{N_W} P_{wg, j, t} = R_{demand, t}$$
(16)

$$\sum_{k=1}^{N_{\rm p}} \left( K_{\text{gen},k,t} P_{\text{gen},k}^{\text{max}} - P_{\text{gen},k,t} + P_{\text{pump},k,t} \right) \ge R_{\text{demand},t} \beta_{\text{ps}}$$
(17)

$$\sum_{k=1}^{N_{\mathrm{r}}} \left( K_{\mathrm{pump},k,t} P_{\mathrm{pump},k}^{\mathrm{max}} - P_{\mathrm{pump},k,t} + P_{\mathrm{gen},k,t} \right) \ge R_{\mathrm{demand},t} \beta_{\mathrm{ps}}$$
(18)

其中, $\delta_{l,day}$ 为负荷不确定性备用率; $\delta_{w,day}$ 为风电不确定性备用率; $R_{demand,t}$ 为第t时段的不确定性备用需求。

4种调度方案的运行结果如表2所示。

表 2 4 种调度策略计算结果比较

Table 2 Comparison of results among four scheduling strategies

参数	方案1 (无抽蓄)	方案 2 (抽蓄仅 备用)	方案 3 (抽蓄仅 调峰)	方案 4 (满足备用 时调峰)
日前调度弃风/%	11.37	2.84	0	0.61
实时调度弃风/%	29.96	4.28	4.11	4.11
火电启动成本/元	4 500	4 500	4 500	4 500
火电累计开机时段	149	74	53	56
日前火电成本/元	58 419	31 270	23 379	24 450
实时火电成本/元	60 204	28 700	20 523	21 664
切负荷能量/(MW•h)	223.06	0	23.06	13.28
风电上网稳定性指标/%	85.42	98.78	98.67	98.76

与无抽水蓄能的运行方案1相比,抽水蓄能可 有效减少弃风现象的发生,同时降低火电机组的运 行成本。如表2所示,无抽水蓄能时,实时调度弃风 率达到29.96%,方案2—4的实时调度弃风率均小 于5%。同时,抽水蓄能机组提供了更多的不确定性 备用容量,火电机组备用需求减少,累计减少75个 开机时段数。 抽水蓄能仅作为不确定性备用,可大幅度提高 备用水平。方案2无切负荷现象,方案1、3、4的调 度结果均存在不同程度的切负荷现象。切负荷现象 产生的原因是风电实时预测值陡降,系统向上备用 容量不足。为避免此类现象发生,需为风电预留更 多的向上备用容量。

### 5.3 抽水蓄能电站规模的敏感度分析

采用 IEEE-RTS 24 可靠性测试系统的负荷分布 数据,设定年负荷峰值为 750 MW,分析常规火电机 组运行成本、常规机组提供备用能量、常规机组提供 备用时间、抽水蓄能电站补偿的失衡能量、抽水蓄能 电站补偿时间、风电场弃风功率等方面对抽水蓄能 电站额定功率、能量库容的敏感度。

常规火电机组的运行成本与其补偿的失衡功率 相关。如图7所示,随着抽水蓄能电站额定功率、能 量库容的增大,常规机组的运行成本是先下降后上 升,最后稳定于某一值。产生这一现象的原因是,失 衡功率为正时,常规机组出力增加,机组运行成本增 加,失衡功率为负时,常规机组出力减少,机组运行 成本降低。





随着抽水蓄能电站容量的增大,常规机组提供的备用功率逐步减小直至为 0。但是抽水蓄能电站 调度策略不同,对应所需的容量规模不同。如图 8 所示,采用策略 1, $P_{\rm M}$  = 250 MW、 $E_{\rm M}$  = 3 750 MW·h, 即可补偿所有的失衡功率;采用策略 2 时,则需  $P_{\rm M}$  = 350 MW、 $E_{\rm M}$  = 4 500 MW·h,较策略 1 需增加额定功 率 100 MW,能量库容 750 MW·h。

如图9所示,抽水蓄能电站规模的增大可以减 少常规机组调用备用的时间;对于同样的容量规模, 采用策略1较采用策略2调用常规机组备用时间 更短。



图 8 调用常规机组备用功率对抽水蓄能电站容量的敏感度

Fig.8 Sensitivity of scheduled reserve power of thermal unit to capacity of pumped storage station



#### 图 9 常规机组备用使用时间对抽水蓄能电站容量的敏感度

Fig.9 Sensitivity of reserve power scheduling time of thermal unit to capacity of pumped storage station

抽水蓄能电站补偿的失衡功率随着其容量的增 大而增大。但采用策略1与策略2对抽水蓄能电站 额定功率、能量库容的敏感度不同。

如图 10(a) 所示, 当抽水蓄能电站能量库容无限大时,随着抽水蓄能电站额定功率的增大,采用策略1比策略2抽水蓄能可以补偿更多的失衡功率。

但当抽水蓄能电站额定功率无限大时,采用策略2比采用策略1可补偿更多的失衡能量,如图10(b)所示。这是由于采用策略2时,抽水蓄能电站的功率约束已经不是约束,失衡功率的任意值都可以调节,该算例中,抽水蓄能电站日前调度的调节方向与失衡功率的调节方向相反,使得补偿的失衡功率较采用策略1时更大。





抽水蓄能电站能量库容无限大时,抽水蓄能电 站在任意时段都可调节失衡功率,当可调节的功率 受抽水蓄能电站额定功率限制,需要火电机组补充 调节失衡功率。由于几乎每个时段都存在或大或小 的预测误差,采用策略1时,抽水蓄能电站整个调度 周期内都处于运行状态;采用策略2时,会出现抽水 蓄能电站参与调峰后,对于风电场相同方向调节的 失衡功率无调节能力,如图11所示。



#### 图 11 抽水蓄能电站备用时间对其容量的敏感度

Fig.11 Sensitivity of reserve time by pumped storage station to its capacity

如图 12 所示,随着抽水蓄能电站容量的增大,风 电场弃风功率不断减少。如图 12(a)所示,风电场的 弃风功率在 2 种策略下对 P<sub>M</sub> 的变化一致。如图 12 (b)所示,弃风功率值在 2 种策略下对 E<sub>M</sub> 的变化趋势 一致,但采用策略 1 时,产生的弃风功率更少。



## 图 12 风电场弃风功率对抽水蓄能电站容量的敏感度

Fig.12 Sensitivity of discarded wind power to capacity of pumped storage station

如图 13 所示,风电上网稳定性随着抽水蓄能电站  $P_{M}$ 、 $E_{M}$ 的增大而提高。同时可以看出,无论是对  $P_{M}$  还是  $E_{M}$ ,策略 1 的风电上网功率稳定性都要优于策略 2。



## 图 13 风电上网功率稳定性评价指标 对抽水蓄能电站容量的敏感度

Fig.13 Sensitivity of evaluation index of grid-connected wind power stability to capacity of pumped storage station

抽水蓄能电站容量的敏感度分析表明,在不增加 火电运行成本的前提下,弃风量随抽水蓄能容量的增 大而减小,直到弃风现象消失。抽水蓄能电站容量越 大,UREP 电源上网功率的稳定性越高,火电机组的实 时调整工作减少,电网的安全稳定更加可靠。

## 6 结论

本文基于电网功率平衡方法及储纳运行机制,

从日前调度、实时调度2个环节递进衔接的角度,建 立了抽水蓄能电站日前发电计划、实时调度的数学 模型;同时提出了一个风电上网功率稳定性评价指 标,用于衡量不同调度策略补偿失衡功率的优劣。

通过简单系统算例及张家口算例分析,比较了不 同调度策略下典型日抽水蓄能电站运行结果,采用储 纳调度策略可有效发挥容量有限的抽水蓄能电站平 息不确定性功率的功用,减少实时调度过程中对常规 电源发电功率的调整,使 UREP 上网功率更加平稳, 且储纳法尤其适用于抽水蓄能电站建设规模受限的 区域。从抽水蓄能电站容量的敏感度分析可以看出, 抽水蓄能电站容量充足时,在三步功率平衡过程中均 可使用抽水蓄能进行优化调度,除了可以补偿失衡功 率,还可以有效地降低火电机组运行成本。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

## 参考文献:

- [1] 胡泽春,丁华杰,孔涛.风电-抽水蓄能联合日运行优化调度模型[J].电力系统自动化,2012,36(2):36-41.
  HU Zechun, DING Huajie, KONG Tao. A joint daily operational optimization model for wind power and pumped-stroage plant[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(2):36-41.
- [2] 徐飞,陈磊,金和平,等. 抽水蓄能电站与风电的联合优化运行 建模及应用分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(1):149-154.
   XU Fei, CHEN Lei, JIN Heping, et al. Modeling and application analysis of optimal joint operation of pumped storage power station and wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1):149-154.
- [3] YURI V M, PENGWEI D U, MICHAEL C W, et al. Sizing energy storage to accommodate high penetration of variable energy resources[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3 (1):34-40.
- [4] 娄素华,杨天蒙,吴耀武,等. 含高渗透率风电的电力系统复合 储能协调优化运行[J]. 电力系统自动化,2016,40(7):30-35.
   LOU Suhua,YANG Tianmeng,WU Yaowu, et al. Coordinated optimal operation of hybrid energy storage in power system accommodated high penetration of wind power [J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(7):30-35.
- [5]杨柳青,林舜江,刘明波,等.考虑风电接入的大型电力系统多 目标动态优化调度[J].电工技术学报,2014,29(10):286-295. YANG Liuqing,LIN Shunjiang,LIU Mingbo, et al. Multi-objective dynamic optimal dispatch for large-scale power systems considering wind power penetration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(10):286-295.
- [6] 丁明,张立军,吴义纯. 基于时间序列分析的风电场风速预测模型[J]. 电力自动化设备,2005,25(8):32-34.
   DING Ming,ZHANG Lijun, WU Yichun. Wind speed forecast model for wind farms based on time series analysis[J]. Electric Power Au-
- tomation Equipment,2005,25(8):32-34. [7]杨秀媛,肖洋,陈树勇.风电场风速和发电功率预测研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(11):1-5.

YANG Xiuyuan, XIAO Yang, CHEN Shuyong. Wind speed and

generated power forecasting in wind farm [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11):1-5.

- [8] 周松林,茆美琴,苏建徽.风电功率短期预测及非参数区间估计
   [J]. 中国电机工程学报,2011,31(25):10-16.
   ZHOU Songlin, MAO Meiqin, SU Jianhui. Short-term forecasting of wind power and non-parametric confidence interval estimation[J].
   Proceedings of the CSEE,2011,31(25):10-16.
- [9] SIDERATOS G, NIKOS D H. Probabilistic wind power forecasting using radial basis function neural networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4):1788-1796.
- [10] 王丽婕,冬雷,高爽. 基于多位置 NWP 与主成分分析的风电功 率短期预测[J]. 电工技术学报,2015,30(5):79-84.
  WANG Lijie, DONG Lei, GAO Shuang. Wind power short-term prediction based on principal component analysis of NWP of multiple locations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015, 30(5):79-84.
- [11] 钱政,裴岩,曹利宵,等. 风电功率预测方法综述[J]. 高电压技术,2016,42(4):1047-1060.
  QIAN Zheng, PEI Yan, CAO Lixiao, et al. Review of wind power forecasting method [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1047-1060
- [12] 欧阳庭辉,查晓明,秦亮,等. 含核函数切换的风电功率短期预测新方法[J],电力自动化设备,2016,36(9):80-86.
   OUYANG Tinghui, ZHA Xiaoming, QIN Liang, et al. Short-term wind power prediction based on kernel function switching[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(9):80-86.
- [13] 刘文颖,文晶,谢昶,等. 基于源荷互动的含风电场电力系统多目标模糊优化调度方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(10):56-68.
   LIU Wenying, WEN Jing, XIE Chang, et al. Multi-objective fuzzy optimal dispatch based on source-load interaction for power system with wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10):56-68.
- [14] 刘小聪,王蓓蓓,李扬,等. 计及需求侧资源的大规模风电消纳
   随机机组组合模型[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):
   3714-3723.

LIU Xiaocong, WANG Beibei, LI Yang, et al. Stochastic unit commitment model for high wind power integration considering demand side resources [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35 (14): 3714-3723.

[15] 曾丹,姚建国,杨胜春,等. 应对风电消纳中基于安全约束的价格型需求响应优化调度建模[J].中国电机工程学报,2014,34 (31):5571-5578.

ZENG Dan, YAO Jianguo, YANG Shengchun, et al. Optimization dispatch modeling for price-based demand respond considering security constraints to accommodate the wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31):5571-5578.

- [16] ENERGINET. Wind energy in Denmark breaking world records [EB/OL]. [2016-01-15]. http://www.theguardian.com/dnvironment/2016/Jan/18/Denmark.
- [17] 叶瑞丽,郭志忠,刘瑞叶,等. 基于风电功率预测误差分析的风 电场储能容量优化方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(16): 28-34.

YE Ruili, GUO Zhizhong, LIU Ruiye, et al. Amethod for designing optimal energy storage system based on analysis of wind power forecast error [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38 (16):28-34.

#### 作者简介:



郭志忠

郭志忠(1961—),男,河北张家口人, 教授,博士研究生导师,博士,主要研究方 向为电力系统稳定分析与控制、光电互感 器、可再生能源发电并网等(E-mail; zhizhongg@bjxj-xjgc.com);

叶瑞丽(1986—),女,河南许昌人,工 程师,博士,研究方向为可再生能源发电系 统及并网(E-mail:yeruili\_hit@163.com);

刘瑞叶(1963—),女,黑龙江哈尔滨人,教授,博士,主要 研究方向为电力系统分析与控制和分布式发电系统并网 (**E-mail**:liuruiye@hit.edu.cn);

刘建楠(1986—),男,吉林长春人,高级工程师,硕士,主 要研究方向为电力系统分析与控制、输变电工程建设管理 (E-mail:andyliujiannan@126.com)。

## Optimal scheduling strategy for renewable energy system with pumped storage station

GUO Zhizhong<sup>1</sup>, YE Ruili<sup>1</sup>, LIU Ruiye<sup>1</sup>, LIU Jiannan<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering & Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. State Grid AC Engineering Construction Company, Beijing 100052, China)

Abstract: Since the uncertainty of power generation in renewable energy system is very prominent, the dispatch and control of power grid which takes power balance as its primary task must adopt targeted countermeasures. The mathematical model for day-ahead scheduling and real-time scheduling of pumped storage power station is built based on the operation mechanism of energy storage. The grid power supply are mutually complementary to realize the power balance of which their reserves are classified into two types: the fluctuation reserve, whose reserve capacity mainly undertaken by the thermal unit is for balancing the fluctuation power, while the uncertainty reserve mainly undertaken by the pumped storage power station is for balancing the uncertainty of forecasting error. An index for evaluating the power stability of grid-connected wind power is proposed, which can measure the goodness of different scheduling strategies for compensating the unbalanced power. Study case analyses verify the feasibility of the proposed scheduling strategy.

Key words: renewable energy system; uncertainty renewable energy; pumped storage station; unbalanced power; optimal scheduling; wind power

(上接第6页 continued from page 6)

## Development of distributed photovoltaic grid-connection device

DING Ming<sup>1</sup>, YAO Yuliang<sup>1</sup>, LI Lin<sup>1,2</sup>, BI Rui<sup>1</sup>, CAO Jun<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. CSG Smart Grid Electrical Technology Co., Ltd., Hefei 230080, China)

**Abstract**: The distributed photovoltaic grid-connected device with dual-CPU is designed based on ARM Cortex-M4 core 32 bit chip, including master control CPU and communication CPU. By modular design and sampling of integrated data, the device can realize information interaction with dispatch center of distribution network, inverters and other intelligent devices, and has the functions of direction and compound voltage blocking overcurrent protection, reverse power protection, zero sequence current protection, overload protection, passive anti-islanding protection, synchronization grid-connection, and so on. Considering the high requirement of distributed photovoltaic plant on synchronization grid-connection, the different-frequency grid-connection algorithm based on catching closing point based on phase-angle difference prediction of sampling point. Test results of microcomputer relay protection system show that, the designed device can collect data correctly and the protection can act reliably. Compared with the traditional different-frequency grid-connection algorithm can improve the grid-connection accuracy effectively.

Key words: distributed photovoltaic power generation; grid-connection device; hardware; relay protection; prediction algorithm; synchronization grid-connection

附录:张家口电网电源结构图

