[系统供电]

考虑调峰能力的月度检修计划优化编制方法

文/深圳供电局有限公司　史　军　车诒颖
北京清大科越股份有限公司　张　炀　张德亮　黄红伟　李　展

设计了调峰充裕度评价指标；基于该指标，提出了考虑调峰能力的月度检修计划优化编制方法，综合考虑调峰充裕度和均衡度来提升系统调峰能力；最后基于IEEE-30节点系统构造算例，验证了所提出方法的有效性。

发电机组检修计划编制是电网运行方式安排的重要内容，对电力系统开机方式具有直接影响。随着风电等新能源快速发展，电网运行所面临的不确定性增加。调峰能力不足已成为限制风电消纳的重要因素。如何通过合理的检修计划编制提升系统调峰能力，促进新能源消纳成为当前亟待解决的问题。

本文首先结合检修方式下调峰需求的匹配关系，设计了调峰充裕度评价指标；围绕该指标，提出了考虑调峰能力的水抽蓄能电站月度检修计划优化编制方法；最后基于IEEE－30节点系统数据构造算例，验证了本文所提出方法的有效性。

调峰充裕度定义及要求

1．调峰充裕度定义及评价指标

本文所述的调峰充裕度是指在确定的发电机组检修方式下，传统电源发电机组基本调峰辅助服务所能提供的调峰容量与当日等效负荷曲线所对应的调峰深度的比值。

我国《并网发电厂辅助服务管理实施细则》中对不同类型电源所需要提供的调峰辅助服务类型作了明确规定。发电机组所提供的调峰辅助服务可分为基本调峰辅助服务和有偿调峰辅助服务，不同类型电源所要求的基本调峰辅助服务能力如表1所示。易知，在确定的发电机组检修方式下，电网传统电源基本调峰辅助服务所能提供的调峰容量$P^{P,B}$可表示如下

$$P^{P,B}=\sum_{i\in NF'}P_i^{P,F}+\sum_{i\in NH'}P_i^{P,H}+\sum_{i\in NPS'}P_i^{P,PS} \quad (1)$$

式（1）中，NF'、NH'、NPS'分别表示未安排检修的燃煤机组、非径流水电、抽水蓄能机组集合，$i\in NF'$、$i\in NH'$、$i\in NPS'$表示属于该类型的机组，$P_i^{P,F}$为燃煤机组i的调峰能力，可表示为其最大技术出力$P_i^{\max,F}$、最小技术出力$P_i^{\min,F}$之差，即$P_i^{P,F}=P_i^{\max,F}-P_i^{\min,F}$；$P_i^{P,H}$为非径流水电动机组$i$的调峰能力，等于其装机容量$P_i^{\max,H}$，即$P_i^{P,H}=P_i^{\max,H}$；$P_i^{P,PS}$为抽水蓄能机组$i$的调峰能力，为其发电最大出力$P_i^{D\max,PS}$与储能最大出力$P_i^{C\max,PS}$之和，即$P_i^{P,PS}=P_i^{D\max,PS}+P_i^{C\max,PS}$。

表1　不同类型电源基本调峰能力

类型	调节能力
燃煤机组	最小技术出力至最大技术出力一般最小技术出力为额定容量的50%
非径流式水电	100%，可进行停机调峰
抽水蓄能电站	可负向储能调峰
风电	无调峰能力
光伏	无调峰能力

等效负荷曲线为在负荷曲线基础上进一步考虑不具备调节性能的风电、光伏等电源功率预测曲线，折算得到的等效曲线。该曲线所对应的调

峰深度$P^{P,N}$即为其曲线峰值$P^{T,N}$与谷值$P^{B,N}$之差，可表示为

$$P^{P,N}=P^{T,N}-P^{B,N} \tag{2}$$

传统电源发电机组基本调峰辅助服务所能提供的调峰容量反映了在该检修方式下电力系统所能提供的基本调峰辅助服务能力；而等效负荷曲线调峰深度则反映了系统所需要的调峰辅助服务要求。作为两者的比值，调峰充裕度η^P能够反映每个检修方式下电网调峰能力的充裕程度，其计算公式可表示为

$$\eta^P=\frac{P^{P,B}}{P^{P,N}}\times 100\% \tag{3}$$

2．调峰充裕度运行要求

发电机组检修计划编制处于发电机组调度运行方式安排的最前端。实际运行过程中，调度运行人员将首先根据发电机组检修意愿编制检修计划方案；结合检修方案与逐日运行需要，编制发电机组开停计划，确定逐日发电机组停备计划与电量计划；进而编制逐日发电计划曲线，指导实际运行。

为了提升整个运行周期范围内的调峰水平，避免燃煤机组等电源频繁起停调峰，应通过合理安排发电机组检修计划实现如下目标：

1）提高调峰充裕度水平，提升整体调峰能力。

2）统筹整体调峰充裕度指标均衡度，使逐日调峰充裕度尽量平均，为发电机组开停计划编制留足空间，为合理安排发电机组停备计划创造更有利的条件。

考虑调峰能力的月度检修计划编制方法

1．目标函数

传统发电机组月度检修计划的目标函数主要考虑供电充裕度指标，其目的在于确保供电可靠性；而从风电等清洁能源消纳的角度出发，则需要考虑逐日调峰能力，确保低谷期间系统有足够的调峰能力确保消纳。

为此，本文所提出的考虑调峰能力的月度检修计划模型必须同时考虑供电可靠性和调峰能力两部分，可表示如下

$$\max=\lambda_1\sum_{t=1}^{NT}\eta_t^P-\lambda_2\sum_{t=1}^{NT}(\alpha_t^{P,B,1}+\alpha_t^{P,B,2})+\lambda_3\sum_{t=1}^{NT}\beta_t^P \tag{4}$$

式（4）中，NT为该月的天数，$P_t^{P,B}$为第t天的系统调峰能力充裕度，$\alpha_t^{P,B,1}$、$\alpha_t^{P,B,2}$分别为第t天调峰充裕度正、负向偏差，β_t^P为第t天的系统供电充裕度，λ_1、λ_2、λ_3为三个决策目标之间的权重系数，由人工设定。

优化目标可表述为该月供电充裕度、调峰充裕度最大化和逐日调峰充裕度最均衡。由于调峰充裕度指标最均衡为最小化形式目标，故取负值。

2．约束条件

考虑调峰能力的月度检修计划所需要考虑的约束条件包括发电机组检修需求约束、输变电设备检修要求约束、系统运行备用约束三个方面。

（1）发电机组检修需求约束

发电机组检修需求约束是指发电机组检修计划必须满足其自身工作的实际要求。实际调度运行指挥中，发电企业将申报各发电机组的检修工期和可开展检修的时间周期。调度机构所编制的发电机组检修计划必须满足检修时段范围约束、检修工作连续性约束、检修计划工期约束三方面要求，可表示如下

$$\begin{cases} m_{i,t}=0, t\notin\left[T_{i,s},T_{i,e}\right] \\ \sum_{t=1}^{NT} fm_{i,t}^{\ 2}=2 \\ fm_{i,t}+fm_{i,t+T_i}=0 \\ fm_{i,t}=m_{i,t}-m_{i,t-1} \end{cases} \tag{5}$$

式（5）中，$m_{i,t}$为发电机组i在第t天的检修状态变量，取“1”时表示该机组当日处于检修状态，否则处于非检修状态；$fm_{i,t}$为发电机组i在第t天检修状态是否改变的状态变量，若由非检修状态转为检修状态，则取“1”，若由检修状态转为非检修状态，则取“−1”，若状态不发生改变，则取“0”；之间的关系如式（5）中最后一个关系式所示。发电机组申报的可开展检修的时间周期为[$T_{i,s}$，$T_{i,e}$]，t [$T_{i,s}$，$T_{i,e}$]表示不属于该时间周期的日期，式（5）中第一项表明非发电机组申报的可开展检修时间周期，该发电机组不可开展检修工作。式（5）中第二项表明该发电机组仅能发生2次检修工作状态改变，则表明仅能存在一次非检修状态向检修状态的状态改变，即保证了检修工作的连续性。式（5）中第三项则保证了发电机组检修时间等于其检修申报时间T_i。

（2）输变电设备检修要求约束

输变电设备检修要求约束是指由电网运行方式所决定的发电机组的检修要求，主要包括发电厂最大检修机组台数要求。该约束可表示为

$$\sum_{i\in G} m_{i,t}\leqslant M_{G,t}^{\max} \tag{6}$$

式（6）中，G为发电厂编号，$i \in G$表示所有属于该发电厂的发电机组，$M_{G,t}^{\max}$为第t天由电网运行方式所决定发电厂最大检修机组台数。

（3）系统运行备用约束

系统运行备用约束是指为满足电网电力电量平衡要求，发电机组检修计划必须保证电网留有足够的备用容量，该约束可表示为

$$\sum_{i=1}^{NG} m_{i,t} P_i^S - P_t^{L,F} \geqslant R_t^{\max} \tag{7}$$

式（7）中，NG为系统中发电机组台数，P_i^S为编号为i的发电机组装机容量，$P_t^{L,F}$为第t天的系统负荷预测最大值，$R_t^{\max}$为系统运行规定的运行备用容量。

（4）调峰能力评价约束

调峰能力评价约束是指调峰充裕度等指标与发电机组检修状态之间的关系，除本文第1节所述的式（1）～式（3）外，还需要考虑调峰充裕度与其均衡度之间的关系，可表示如下

$$\begin{cases} \eta_t^P - \eta^{P,Ave} - \alpha_t^{P,B,1} + \alpha_t^{P,B,2} = 0 \\ \alpha_t^{P,B,1} \geqslant 0 \\ \alpha_t^{P,B,2} \geqslant 0 \end{cases} \tag{8}$$

式（8）中，$\eta^{P,Ave}$为系统各天调峰均衡度的平均值，$\alpha_t^{P,B,1}$、$\alpha_t^{P,B,2}$为引入的松弛变量，取值非负，可用于评价调峰充裕度的指标均衡程度。

3．求解方法

该模型为二次约束规划问题，可利用CPLEX等商用软件包直接建模求解得到。

算例分析

1．基础数据

IEEE－30节点系统是输电网运行分析常用的测试系统。该系统中共设置有6台发电机组，机组基本数据及其申报的检修意愿信息如表2所示。

表2　发电机组参数

机组编号	最小、最大技术出力/MW	检修工期/天	可检修日期
1	100 200	5	5－25
2	150 300	6	10－25
3	100 200	4	3－15
4	300 600	3	2－15
5	100 200	3	9－20
6	100 200	5	8－20

该月逐日等效负荷曲线中最大、最小负荷变化趋势如图1所示。

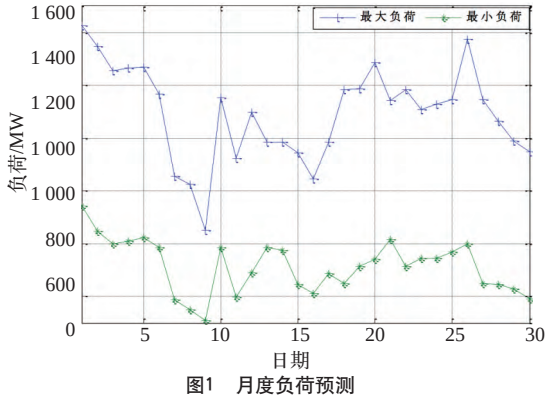

图1　月度负荷预测

2．数据分析

为了验证本文所提出方法的有效性，算例中设置了考虑调峰能力和不考虑调峰能力影响两个场景，通过对比两个场景下的调峰能力变化，来评估方法优劣。

两个场景下优化计算得到的发电机组检修计划分别如图2和图3所示。

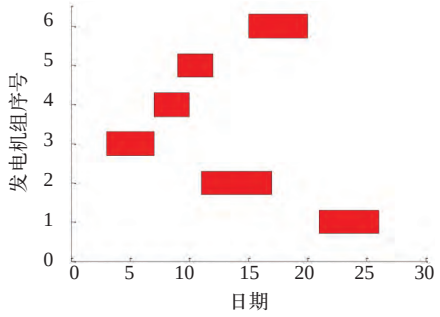

图2　考虑调峰能力检修计划甘特图

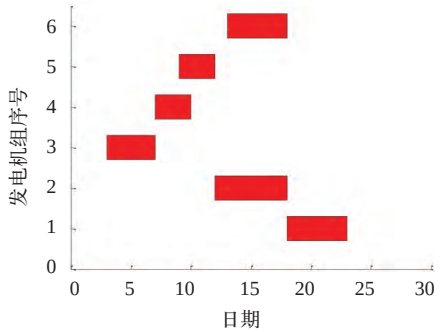

图3　不考虑调峰能力检修计划甘特图

由于发电机组的检修工作内容和工期相同，因此其调峰充裕度和供电充裕度一致，然而逐日调峰充裕度却并不相同，图4对比了两个场景下逐日调峰充裕度指标变化情况，明显可以看出当考虑调峰能力的充裕性和均衡性后，场景一调峰充裕度指标的均衡性优于场景二，这就为开停计划编制过程中降低火电开停频繁变化创造了有利条件。

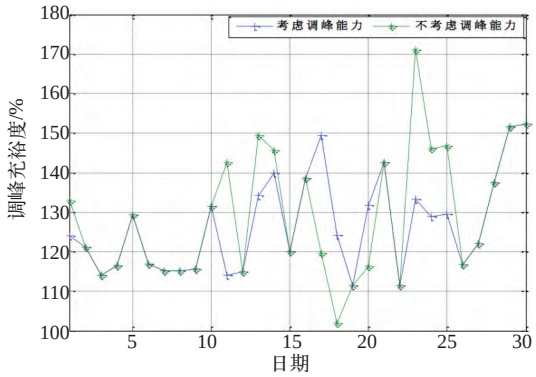

图4　调峰充裕度变化

结束语

本文提出了调峰充裕度指标，通过统计该指标及其均衡度变化来评价检修计划所对应的运行方式调峰能力优劣。通过将该指标引入发电机组检修计划编制模型，提出了考虑调峰能力的月度检修计划优化编制方法。该方法能够有效协调各检修工作工期顺序及时间，提升系统调峰能力，为清洁能源消纳创造更有利的条件。EA

（收稿日期：2018.07.08）

（编辑：白文亭）

（上接第67页）

（4）预制尾缆、预制电缆敷设

全面使用预制尾缆、预制电缆，实现了一次设备与二次设备、二次设备与二次设备之间的即插即用，去除了现场敷设电缆、光缆以及熔接光纤等烦琐工作，大大缩短了工程现场的施工时间，提高了变电站建设的效率。

预制式智能控制柜实施方案

传统一次设备汇控柜由GIS厂家成套生产，一般是指变电站隔离开关和断路器的汇控柜。汇控柜作用就是将单相机构的信号和操作电源等都集中在一个就地柜里。GIS的每个间隔都有一个汇控柜，它是一个间隔里所有设备的二次回路的集合。

标准配送式变电站采用预制式设备，以往的智能变电站建设一般要求GIS汇控柜与智能控制柜整合，一体化设计。

1．预制式智能控制柜的现状

目前预制式智能控制柜存在的问题：一二次厂家需要配合设计要求高，容易出现扯皮；一二次接口不清晰，多方需要反复确认修改；屏间连线多，接线复杂，工艺及生产周期不可控；尚未形成屏柜内设备的模块化安装。

针对上述问题，本专题提出新型预制式智能控制柜的模块化设计方案。将预制式智能控制柜划分为三个模块：传统汇控模块、过程层设备模块、间隔层设备模块，并将过程层设备模块按功能区划分为3 个子模块：设备子模块、低压断路器子模块和辅助子模块。

2．本工程预制式智能控制柜的方案设计

（1）过程层设备模块的设计方案

将智能控制柜按功能区划分为3 个子模块：设备子模块、低压断路器子模块和辅助子模块。智能控制柜布置按照自上而下顺序依次为：设备子模块、低压断路器子模块和辅助子模块。各个子模块独立完成内部设备、辅助设备的安装及配线后，再通过简单的插接固定即可实现子模块的固定；相同的子模块具有相同的外形，可方便互换，实现子模块的快速检修；

（2）过程层设备模块的积木式拼接方案

模块内部及模块与模块之间采用组合端子插接式配线方案，方便模块内部及模块与模块之间的线缆快速装配，快速检修更换，也使得中远期装置线缆的预制，方便中远期改扩建工程中的装置快速“插接式”安装，体现预制式线缆优势。

结束语

博州750 kV变电站执行“标准化设计、工厂化加工、模块化建设”的建设模式，根据电压等级和设备功能，二次设备采用模块化设计，优化二次屏柜结构、尺寸及柜内二次设备接线，形成全站“预制式二次组合设备、模块化机架式预制舱、预制式智能控制柜”的模块化及标准化设计方案。从预制式二次组合设备、预制舱式二次组合设备、预制式智能控制柜三个方面针对现有技术存在的不足做出创新，具有现实意义。EA

（收稿日期：2018.07.08）

（编辑：白文亭）