

DOI: 10.7667/PSPC151035

# 实时调度决策理想度评估的模型与方法研究

郑晓辉<sup>1</sup>, 史军<sup>1</sup>, 程韧俐<sup>1</sup>, 匡洪辉<sup>2</sup>, 郭少青<sup>2</sup>, 张德亮<sup>2</sup>

(1. 深圳供电局有限公司电力调度控制中心, 广东 深圳 518001; 2. 北京清大科越公司, 北京 100084)

**摘要:** 为了准确分析和评估实时调度计划编制水平, 提出了基于 PJM 理想调度理念的实时调度决策评估方法。在深入分析美国 PJM 理想调度评估方法的基础上, 将理想调度评估理念引入到调度员实时调度决策水平的评估中, 并结合实时调度实际业务, 设计了基于场景重构、评估指标计算的实时调度决策评估模型, 量化实际调度方案与理想方案的差距, 为客观评价实时调度业务提供了支撑。基于我国某省级电网实际运行数据的算例分析表明, 该方法能够正确量化评估实时调度的水平。

**关键词:** 理想调度; 实时调度; 调度决策; 电网运行评估; 模型与方法

## Study on model and method of real-time dispatch evaluation based on perfect dispatch assessment

ZHENG Xiaohui<sup>1</sup>, SHI Jun<sup>1</sup>, CHENG Renli<sup>1</sup>, KUANG Honghui<sup>2</sup>, GUO Shaoqing<sup>2</sup>, ZHANG Deliang<sup>2</sup>

(1. Electric Power Dispatching and Control Center, Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518001, China;

2. Qingdakeyue Corporation, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A real-time dispatching decision evaluation method based on the idea of perfect dispatch assessment implemented by PJM power market is proposed to analyze and evaluate the real-time dispatching job accurately. The idea of perfect dispatch assessment implemented by PJM power market is firstly analyzed. Based on the real-time dispatch actual business, this paper proposes a real-time dispatching decision evaluation model including scene re-construction and evaluation indexes calculation by introducing the idea of perfect dispatch assessment into the real-time evaluation. The model could quantify the difference between real dispatching plan and the perfect one and make the real-time dispatching evaluation more objective. The test model based on the real power grid data from a province in China certifies the validity of this method.

**Key words:** perfect dispatch; real-time dispatch; dispatch decision; power grid evaluation; model and method

## 0 引言

实时调度是电网调度运行业务的重要组成部分, 其业务水平对电网运行安全性、经济性影响显著。而对实时调度业务的评估, 不仅是量化业务水平的有效途径, 还能帮助定位工作不足, 提升业务水平。随着电网运行精益化要求的不断提升, 实时调度评估对提升实时调度业务水平的重要作用日益凸显。因此, 学术界和工业界开展了大量研究和实践工作<sup>[1-7]</sup>。

文献[1]介绍了国家电网公司调度运行分析制度的实践工作, 包括对实时调度业务评估的 14 项统计指标, 主要为频率、电压合格率等, 文献[2-3]介绍了美国电力科学研究院(EPRI)在电网运行评估方面所取得的成果, 与国家电网公司调度运行分析制度相比其最大特点是进一步对指标类型进行了划

分, 从安全、经济、质量等不同角度对指标进行重组; 文献[4]通过基于不同发电调度模式的综合评价体系对调度计划的优劣程度进行量化评估; 文献[5]建立了一种多维度评价方法体系, 采用雷达图法反应多维度评价效果; 文献[6]从电力系统灵活性的定义、量化指标、评价方法三方面系统地总结了当前国内外电力系统灵活性评价研究的成果与进展; 文献[7]则从安全供电能力、静态电压安全性、拓扑结构脆弱性、暂态安全性、运行风险等方面提出了系统 N-K 故障后失元件个数、最大供电区域指标和基于效用理论的风险指标等新评价指标。

综上所述, 当前的实时调度评估主要思路是通过电网运行数据的统计分析, 提炼评估指标, 量化业务工作某一方面的水平。然而, 电网运行安全、经济等目标实际上往往是矛盾的。传统的评估方法难以有效反映不同目标之间的协调替代关系。为此,

美国 PJM 电力市场于 2007 年提出了一种名为“理想调度”的电网运行评估方法<sup>[8]</sup>。该方法是一种对电网运行效益的综合评估工具。基于历史数据反演,该方法首先给出一套满足安全约束的经济调度方案,定义为“理想调度”。通过对比实际运行与“理想调度”之间的差距,量化电网实际运行的综合水平。

本文将深入剖析美国 PJM 理想调度方法,并将该方法引入电网实时调度业务的评估中,提炼实时调度业务的理想调度评估方法,设计相应的评估模型和指标,为客观评价实时调度业务提供更加科学的工具。

## 1 PJM 理想调度评估简介

### 1.1 PJM 理想调度评估方法

为了提升电网调度运行水平,美国 PJM 电力市场于 2007 年提出了电网“理想调度”这一概念。所谓“理想调度”,实际上是对每天电网运行的“再调度”和“反思”,基于电网实际运行信息,给出一种满足安全约束的机组最优组合和经济调度方案,从而通过对比实际调度情况和理想调度方案在经济成本上的差异,量化实际调度的理想度,进而分析各种影响调度理想度的因素,定位实际调度中存在的不足,形成闭环反馈机制,帮助调度人员提升调度工作水平。

基于该理念,美国 PJM 电力市场所开发了理想调度支持系统,其评估流程如图 1<sup>[9]</sup>。实际运行数据库是整个评估的基础。该数据库需要记录实际调度全过程信息,主要包括两方面数据:系统运行数据和市场运行信息。系统运行信息包括实际负荷、电力交换、系统拓扑等;市场运行信息主要为机组报价。

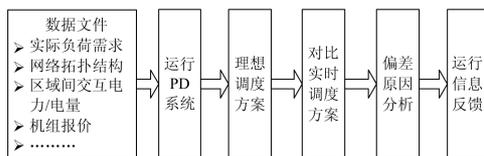


图 1 美国 PJM 电力市场理想调度评估流程

Fig. 1 Evaluation process of perfect dispatch in PJM

实际运行数据,反映了实际的调度运行方案,由此可直接计算实际运行成本。同时,依据实际的负荷、网络拓扑和实际机组报价,可以设计规范化的分析策略,得到一套满足安全约束的经济调度方案。然而由于负荷预测误差、机组非计停等因素,该方案在实际调度中难以达到,因此称之为理想调度方案。其中对实际运行数据的分析策略是获得最优调度方案的核心,可依据实际需求设计不同分析

策略。PJM 电力市场采用的是经典的经济调度模型。基于该理想调度运行方案,可以计算得到理想调度下的电网运行成本。

对比实际运行与理想调度方案,即可量化实际调度的理想程度。PJM 电力市场所定义的电网运行理想度指标计算公式为

$$C_{\text{saving}\%} = \frac{BPC_{\text{RT}} - BPC_{\text{PD}}}{BPC_{\text{PD}}} \times 100\% \quad (1)$$

$C_{\text{saving}\%}$  实际上是理想调度与实际运行成本之差的比值。由于理想调度方案为满足安全约束的最经济调度方案,因此  $C_{\text{saving}\%}$  一般为正数,同时该指数越趋近于 0,说明实际运行与理想调度方案之间的差距越小。

目前, PJM 电力市场认为导致实际调度与理想调度之间偏差的原因主要包括如下四个方面:

(1) 保守的调度运行模式:在实际运行中,考虑到各种潜在风险,往往预留较大备用裕度,调度方式偏保守;

(2) 机组性能差异:在理想调度中假定了机组均能按照其所申报的性能参数响应指令,而在实际运行中,往往存在偏差;

(3) 机组组合差异:实际调度中为保证系统运行安全性,往往优先调用启动快、性能好的机组;而理想调度中,由于掌握了全局信息,因此可以充分利用启动慢,性能较差的机组,充分提高系统经济性;

(4) 其他因素:影响实际调度理想度的因素还包括调度员的人工决策偏差、负荷预测准确率等。

通过对逐日调度理想度的计算和分析,可分析导致实际调度不理想的原因,不断提高完善实际调度水平。

### 1.2 PJM 理想调度实施效益

理想调度评估方法为量化不同因素对实际电网运行效益的影响提供了更客观的工具,由此电网公司能够对症下药,更有针对性的制定改进措施。

理想调度评估结果显示,机组性能对实际调度运行的效益影响显著,据测算机组出力偏差造成的损失大致为 85 000 \$/天<sup>[10]</sup>。为此,美国 PJM 电力市场开发了机组性能实际检测系统。通过实际监测机组运行情况,得到真实的机组性能参数,以此作为机组调度的依据,提升机组发电计划的可执行性。

同时,从理想调度评估结果中可以看出, PJM 电力市场目前的调度模式特别是日前发电计划编排偏于保守。以线路传输容量为例,在 PJM 电力市场中,线路传输容量限制设定为线路的热稳定极限容

量的 97%。然而从实际的执行效果来说, 线路的实际传输能力被大大低估了。为此, PJM 电力市场将线路传输容量限值设定为线路热稳定极限的 100%, 据测算其效益大致为 73 000 \$/天<sup>[10]</sup>。通过上述一系列的分析 and 调控, PJM 电力市场的调度理想度水平不断提升<sup>[11]</sup>。

## 2 实时调度决策理想度评估

PJM 理想调度评估方法是对整个电网运行综合水平的评估。与传统的评估方法, 理想调度的突出特征在于实际上它划定了电网运行的“天花板”, 由此可直接得到实际运行与其差距。需要特别说明的是, 这个“天花板”不是固定的, 不同的负荷、开机条件下天花板的高度也不相同, 这一特点能够剔除电网自身特征对其运行水平的影响, 使得评估结果更加客观。

实时调度是调度运行的重要环节。在实时调度中, 调度员需要根据电网当前运行状态和最新的预测信息调整机组发电计划。本文将把理想调度评估理念应用于实时调度的评估中, 构建实时调度决策的理想调度评估方法, 其本质同于 PJM 的思路, 也是事后评估。

### 2.1 实时调度决策理想度评估方法

依据理想调度评估方法理念, 结合实时调度业务的自身特点, 本文提出的实时理想调度评估方法基本流程如图 2。

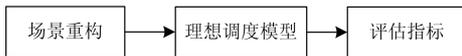


图 2 实时调度决策理想度评估方法

Fig. 2 Structure of real-time dispatch perfect dispatch

实时调度决策理想度评估方法包括场景重构、构造理想调度模型、计算评估指标三个基本步骤。

所谓场景, 是指实时调度过程中调度员所依据数据信息基础的集合。场景重构, 即是在实时调度决策完成之后, 首先对历史数据分析挖掘, 将评估分析所依据的数据还原到调度员此前进行实时调度决策时间节点上去, 保证评估和决策所依据数据信息的一致性。构造理想调度模型, 是实时调度决策理想度评估的核心。基于重构所得的实时调度场景, 获得该场景下的理想调度方案, 从而客观评估调度员实际决策水平。最后, 计算评估指标, 量化实际调度决策的理想度。

### 2.2 实时调度决策理想度评估场景

为了保证评估与决策数据信息的一致性, 在场景重构中, 需要将理想调度评估的数据还原到实际

决策的时间节点上。具体来说, 需要将负荷信息还原为实时调度决策所依据的超短期负荷预测信息; 机组开停状态应考虑实际电网运行过程中的机组非计停影响。

与美国 PJM 理想调度评估不同的是, 实时调度决策充分考虑了评估与决策所依据数据的一致性, 其数据基础应保证与实时调度决策相同。

### 2.3 基于 SCED 的实时调度理想度评估模型

在实时调度运行中, 电网运行安全性是调度运行的根本要求, 电网运行安全性主要需要满足功率平衡等安全约束。

上述问题可将该问题归结为机组组合或经济调度问题。实际调度中, 可根据具体情况灵活配置。本文中采用经典的经济调度(SCED)<sup>[12-14]</sup>模型来构造理想调度评估模型。事实上, 该目标函数也可以转化为节能目标或者环保目标, 实现发电煤耗最低或污染物排放量最少。目标函数的转变并不改变该模型的基本思路与框架。限于篇幅, 下文不再赘述。

所采用模型的目标函数为

$$\min \sum_{i=1}^N \left( \sum_{t=1}^T \rho_i P_{i,t} \right) + f(P) \quad (2)$$

式中:  $\rho_i$  表示机组报价;  $P_{i,t}$  表示机组出力; 函数  $f(P)$  代表机组造成的网损。

约束条件如下:

发供电平衡约束

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} - D_t - P_{l,t} = 0, t = 1, 2, \dots, T \quad (3)$$

式中:  $D_t$  表示  $t$  时段的系统总有功负荷;  $P_{l,t}$  表示  $t$  时段的网损。

旋转备用约束

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^I \bar{r}(i,t) \geq \bar{p}_r(t) \\ \sum_{i=1}^I \underline{r}(i,t) \geq \underline{p}_r(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\bar{r}(i,t)$  为机组  $i$  在  $t$  时提供的上调旋转备用;  $\bar{p}_r(t)$  为系统  $t$  时的上调旋转备用需求;  $\underline{r}(i,t)$  为机组  $i$  在  $t$  时提供的下调旋转备用;  $\underline{p}_r(t)$  为系统  $t$  时的下调旋转备用需求。

调节(AGC)备用约束

$$\begin{cases} \sum_{i \in I_g} \bar{r}'(i,t) \geq \bar{p}'_r(t) \\ \sum_{i \in I_g} \underline{r}'(i,t) \geq \underline{p}'_r(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中： $\bar{r}'(i,t)$ 为机组*i*在*t*时提供的 AGC 上调备用； $\bar{p}'_r(t)$ 为系统*t*时的 AGC 上调备用需求； $r'(i,t)$ 为机组*i*在*t*时提供的 AGC 下调备用； $\underline{p}'_r(t)$ 为系统*t*时的 AGC 下调备用需求。

机组爬坡约束

$$\begin{cases} P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq RU_i \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq RD_i \end{cases} \quad t=1, \dots, T, \quad i=1, \dots, N \quad (6)$$

式中， $RD_i$ 和 $RU_i$ 分别机组降出力能力和爬坡能力。

机组出力上下限约束

$$P_{i,t}^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,t}^{\max}, \quad t=1, 2, \dots, T \quad (7)$$

式中， $P_{i,t}^{\max}$ 和 $P_{i,t}^{\min}$ 分别表示*t*时段的最大最小可调出力。

输电容量约束

$$|X_k| < X_{\max}, \quad k=1, 2, \dots, NL \quad (8)$$

$X_k$ ， $X_{\max}$ 分别为编号为*k*输电线的有功潮流和热稳定极限； $NL$ 为输电线数量。变压器等效支路、输电断面的输电容量约束形式与线路一致。

这里需要指出的是，美国 PJM 理想调度评估是对一天范围电网运行水平的整体评价，因此其评估时间周期是固定的。而在本文所提出的实时调度决策理想调度评估模型中尽管也选用了 SCED 模型，但是要求调度员具备一定的“look-ahead”能力，即模型的优化时间范围*T*不应仅局限于实时调度决策的下一个时段，而要求实际决策能够在更长时间范围内保证运行的经济性。

### 2.4 实时调度决策理想度评估指标

利用上述理想调度模型，可以得到未来*T*时段电网运行成本，记电网下一时段运行成本为 $C_{PD}$ 。同样，利用调度员实际下达机组出力计划指令，可得到下一时段电网运行成本为 $C_{RT}$ 。

定义实时调度理想度指标 $C_{\%}$ 计算公式为

$$C_{\%} = \frac{C_{RT} - C_{PD}}{C_{PD}} \times 100\% \quad (9)$$

这里需要特别说明的是，实时调度理想度评估的对象是调度员实时调度的决策水平，因此实时调度决策理想度评估指标计算中也是将理想方案与实际下达方案对比，而不是与实际运行情况对比，从而避免实际运行过程中由于负荷预测偏差等各种因素产生的影响。

## 3 算例分析

下面将以我国某省实际数据构造算例验证本文所提出评估方法的实用性。

### 3.1 算例说明

以我国某省的实际电网拓扑与运行数据构造算例，包括节点 518 个，支路 934 条，统调机组 220 台，发电装机 58 800 MW，风电装机 7 600 MW。

对该省电网 2014 年 4 月某日的运行情况进行理想调度评估。设置实时调度的前瞻能力为 2 h。在当天实际运行过程中，没有发生机组、线路等元件的故障，系统拓扑结构稳定，同时联络线传输计划、指定出力机组出力计划日内未作调整。

### 3.2 评估结果分析

基于本文所提出的评估方法，实时调度的评估分析如图 3。其中“实时调度”曲线给出了全天 96 次实时调度下达方案的购电成本，“本文理想”为对应的调度员理想调度方案的运行成本。

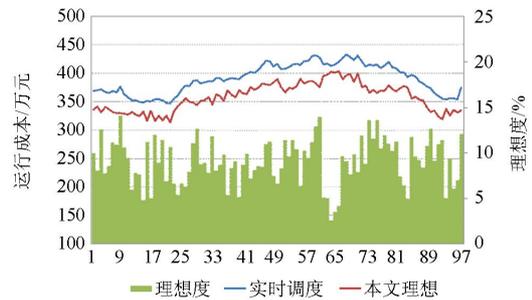


图 3 实时调度决策理想度评估结果

Fig. 3 Cost curve with the proposed perfect dispatch method in this paper

需要特别说明的是，本文所提出的实时调度决策理想度评估方法，不是简单的将美国 PJM 理想调度评估移植到实时调度评估上来，除了评估方法模型方面的差别，在实际使用中，利用本文的方法能够更为清楚客观的体现调度员实时调度决策水平对电网运行效益的影响，有利于准确定位制约电网运行效益的关键环节，提升电网运行水平。

如表 1，美国 PJM 理想调度评估显示当天电网运行整体理想度为 19.67%。而全天实时调度决策理想度平均值为 9.04%。在实际运行过程中，由于没有发生机组、线路等设备故障，造成实际运行结果与实时调度决策偏差的因素主要包括负荷预测偏差、

表 1 全天理想度分析

Table 1 All-day perfect dispatch evaluation

类型	理想度/预测偏差/%
整体理想度 (PJM)	19.67
实时调度决策理想度 (本文)	9.04
风功率预测偏差	10.36
负荷预测偏差	4.63

风电预测偏差与机组出力偏差三个方面。而其中负荷预测偏差高达 4.63%，风电预测偏差为 10.36%。换言之，尽管实时调度决策已经比较到位，但是在实际运行中各种运行偏差仍对电网运行效益产生了影响，导致电网运行整体理想度偏低。

#### 4 结语

理想调度评估方法的核心价值在于不再是简单的对电网运行数据进行统计，而是通过给出理想运行方案，量化实际运行与理想方案的差距。本文在深入分析美国 PJM 理想调度评估方法的基础上，将理想调度评估理念应用于实时调度决策评估中，设计了实时调度决策理想度评估的方法，提出了其场景重构、构建模型与评估指标计算的方法。最后通过我国某省实际数据构造算例，对本文所提出的评估方法的实用性进行了验证分析。

#### 参考文献

- [1] 张国华, 张建华, 彭谦, 等. 电网安全评价的指标体系与方法[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 30-34.  
ZHANG Guohua, ZHANG Jianhua, PENG Qian, et al. Index system and methods for power grid security assessment[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 30-34.
- [2] Security, quality, reliability, and availability: metrics definition: progress report[R]. EPRI, Palo Alto, CA: 2005: 1008569.
- [3] Strategic insights on security, quality, reliability, and availability[R]. EPRI, Palo Alto, CA: 2005. 1008566.
- [4] 游大海, 潘凯, 王科, 等. 含风电场的电力系统协调优化调度的评价技术[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 157-163.  
YOU Dahai, PAN Kai, WANG Ke, et al. Evaluation of coordination optimal dispatching in wind power integrated system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 157-163.
- [5] 胡殿刚, 张雪佼, 陈乃仕, 等. 新能源发电项目多维度后评价方法体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 10-17.  
HU Diangang, ZHANG Xuejiao, CHEN Naishi, et al. Research on multi-dimensional post evaluation methodology of new energy power generation projects[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 10-17.
- [6] 施涛, 朱凌志, 于若英. 电力系统灵活性评价研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 146-154.  
SHI Tao, ZHU Lingzhi, YU Ruoying. Overview on power system flexibility evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 146-154.
- [7] 王敬敏, 施婷. 智能电网评价指标体系的构建[J]. 华东电力, 2012, 40(2): 193-197.

- WANG Jingmin, SHI Ting. Construction of evaluation index system for smart grid[J]. East China Electric Power, 2012, 40(2): 193-197.
- [8] OTT A L. Development of smart dispatch tools in the PJM market[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011: 1-3.
- [9] GISIN B, QUN G, MITSCHKE J V, et al. "Perfect Dispatch" - as the measure of PJM real time grid operational performance[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010: 1-8.
- [10] 文福拴, 蔡秋娜. 美国 PJM 完美调度及对中国电力调度的启示[J]. 电力科学与技术学报, 2010, 25(4): 47-52.  
WEN Fushuan, CAI Qiuna. Perfect dispatch in PJM and its implications in China[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2010, 25(4): 47-52.
- [11] PJM. Executive report[EB/OL]. [2012-12-25]. <http://www.pjm.com/sitecore%20modules/web/~media/committees-groups/committees/mc/20121126-webinar/20121126-reports-item-03b-operations-report.ashx>.
- [12] 许丹, 赵鸿图, 丁强, 等. 基于实用化安全约束经济调度扩展建模策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 76-81.  
XU Dan, ZHAO Hongtu, DING Qiang, et al. Modeling strategy based on utility of security constrained economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 76-81.
- [13] 马瑞, 康仁, 姜飞, 等. 考虑风电随机模糊不确定性的电力系统多目标优化调度计划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 150-156.  
MA Rui, KANG Ren, JIANG Fei, et al. Multi-objective dispatch planning of power system considering the stochastic and fuzzy wind power[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 150-156.
- [14] 王民量, 张伯明, 夏清. 考虑机组爬坡速率和网络安全的经济调度新算法[J]. 电力系统自动化, 2000, 21(10): 14-20.  
WANG Minliang, ZHANG Boming, XIA Qing. A new algorithm for SCED considering unit climbing and network safety[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 21(10): 14-20.

收稿日期: 2015-06-21; 修回日期: 2015-10-12

作者简介:

郑晓辉(1979-), 男, 本科, 工程师, 主要从事电网运行方式分析及智能配电网调度运行研究; E-mail: zhengxiaohui@sz.csg.cn

史军(1982-), 男, 硕士, 主要从事电网运行方式分析及发电调度管理等工作; E-mail: eph2003@263.net

程韧俐(1972-), 女, 硕士, 高工, 主要从事电力系统运行方式管理工作。E-mail: 1737569814@qq.com

(编辑 张爱琴)