

Perfect Dispatch Evaluation Method Based on Information Restoration and Process Analysis

Xiang Li¹, Shaoqing Guo²

¹CSG Dispatching Control Center, Guangzhou Guangdong

²Qingdakeyue Corporation, Beijing

Email: lixiang@csg.cn, guoshaoqing@vip.sina.com

Received: Sep. 30th, 2016; accepted: Oct. 20th, 2016; published: Oct. 24th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In order to enhance the management level of power system operation, PJM power market operator proposed the Perfect Dispatch Evaluation Method (PDEM) in 2007. Compared to the traditional evaluation methods, PDEM incorporated the actual operation boundaries and determined a virtual "Perfect Dispatch Scheme" (PDS) from post hoc perspectives. In this case, the deviations between the actual situation and the PDS could be quantitatively analyzed. This paper further implemented the PDS into various process of power system operation, identified the critical influencing factors, and formulated the influencing mechanisms. Based on information restoration and process analysis techniques, a novel PDEM is proposed to identify the effects incurred by decision and non-decision factors, respectively. In the end, a numerical case based on real operation data is studied to testify the effectiveness of the proposed method.

Keywords

Power System Operation, Perfect Dispatch, Effect Evaluation, Information Reduction, Process Analysis

基于信息还原的过程化理想调度评估方法

李翔¹, 郭少青²

¹南方电网公司, 广东 广州

²北京清大科越股份有限公司, 北京
Email: lixiang@csg.cn, guoshaoqing@vip.sina.com

收稿日期: 2016年9月30日; 录用日期: 2016年10月20日; 发布日期: 2016年10月24日

摘要

为提高电网调度运行的精益化管理水平, 美国PJM电力市场于2007年提出了理想调度评估方法。与传统的电网运行评估方法相比, 理想调度从后评估的角度, 通过“反演”计算电网调度运行中的最理想方案, 以量化评估实际运行情况与理想方案之间的差距。本文将理想调度与实际的业务过程相结合, 全面辨识影响电网运行效益调度程度的各类因素。通过引入信息还原等评估理念, 基于对电网运行全过程记录, 本文提出了过程化的理想调度评估方法, 实现了对调度员决策水平的评估分析及各类外部因素影响程度的量化计算, 为进一步提高电网调度运行的精益化水平提供了科学的手段与工具。最后, 以实际电网的运行数据构造算例, 验证了本文所提出方法的合理性与有效性。

关键词

电网运行, 理想调度, 效益评估, 信息还原, 过程化分析

1. 引言

电网运行评估, 是量化电网运行水平、体现电网运行效益的重要工具; 也是挖掘工作潜力, 提升业务水平的有力抓手。目前, 在世界范围内已经开展了大量与电网运行评估相关的研究和实践工作, 其主要思路是对电网实际运行数据进行统计分析[1]-[4]。

电力系统运行的经济、安全性是现代电网运行的两大目标。在现代电网的运行调度中, 为了追求电网运行的经济性, 系统常需要运行在安全边际附近, 以保证电网始终能处于一个比较经济的位置。然而, 传统的基于统计数据的评估方法与评估指标往往只能反映电网在安全或者经济单一维度上的运行效益, 未能量化反映电网在安全与经济不同维度间运行效益的协调性、替代性等相互关系。为此, 美国 PJM 电力市场于 2007 年提出了一套名为“理想调度”的电网运行评估方法[5] [6]。所谓理想调度, 实际上是对电网运行的“再调度”和“反思”, 基于电网实际运行信息, 通过对历史场景的“反演”, 给出一套满足安全约束的机组最优组合和经济调度方案; 进而通过该方案与实际运行情况的比对, 挖掘实际电网运行业务中存在的不足, 提升调度水平[7] [8]。

与传统评估方法相比, 理想调度的评估方法不再是基于简单的数据统计; 其通过“反演”所形成的理想调度方案, 事实上等同于划定了实际系统运行效益的“天花板”, 通过比较实际运行水平与“天花板”之间的距离, 即可量化分析实际电网运行的效益情况与工作水平, 进而计算改进的潜力; 同时, 利用满足安全约束的经济调度方案, 理想调度为电网进行“安全-经济”效益的协调分析提供了可能, 能够弥补传统评估方法的缺陷。

事实上, 在实际的电网调度运行中, 造成实际运行与理想调度之间差距的因素是多方面的, 如: 调度员的决策水平、预测误差、机组出力偏差等。然而, 当前 PJM 电力市场的理想调度分析并未对不同要素的作用机理与作用效果进行区分, 而将所有的影响要素视为一个整体, 仅从事后比对的角度予以分析, 且未能将理想调度与实际的业务过程结合起来。这种评估的结果难以对实际调度工作水平的提高提供有

针对性的分析与建议,其精细化程度有待提高。因此,本文将对理想调度的理念与方法进行深入的剖析,全面辨识影响电网运行效益调度程度的各类因素,分析不同因素的作用机理,提出对调度员决策水平的评估方法和预测偏差等外部因素对电网运行经济性影响程度的量化方法,为客观评估电网调度运行的工作水平提供更加科学的手段与工具。

2. 理想调度的影响因素辨识

2.1. 理想调度的理念与方法

为了量化分析电网安全、经济两方面的协调效应,美国 PJM 电力市场于 2007 年提出了电网“理想调度”这一概念。理想调度的核心在于给出电网运行的“天花板”,通过对比实际情况与理想方案,揭示运行效益可提升的空间,从而对实际业务水平的提高相应的指导[9]。

理想调度评估方法的实施流程如图 1 [8]所示:

评估方法主要包括以下几个步骤:

- ① 获取基础数据,包括实际系统运行数据和实际市场价格信息两方面;
- ② 计算理想调度方案,并计算其运行成本;

基于实际数据,PJM 电力市场利用基于直流潮流的经济调度模型(SCED),获得一套满足各种安全约束的经济运行方案,称此方案为理想调度方案。同时基于市场报价,即可计算理想方案下的运行成本 BPC_{PD} 。

- ③ 获取实际运行情况,并计算实际运行成本;

通过实际运行数据库,PJM 可以直接获取电网实际运行情况,并得到实际的运行成本 BPC_{RT} 。

- ④ 计算调度理想度指标;

理想度评估指标的计算公式为:

$$C_{\text{saving}\%} = \frac{BPC_{PD} - BPC_{RT}}{BPC_{RT}} \quad (2.1)$$

$C_{\text{saving}\%}$ 即反映了理想调度方案的运行成本与实际调度运行成本之间的差值比例。由于理想调度方案实际上是经济上最优方案, $C_{\text{saving}\%}$ 为大于 0 的正数;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。

基于理想调度的评估方法,PJM 电力市场对逐日电网运行的理想度进行了测算,并将理想度评估指标反馈给实际的业务部门,以辅助提高各个部门的业务水平。通过实施理想调度,PJM 电力市场的运营效益得到了显著的提升,如图 2 [10]所示,在理想调度的帮助下,PJM 电力市场的运营成本明显下降,运营效益显著提升。

2.2. 影响电网运行理想度的因素分析

PJM 的理想调度评估,实际上是以电网运行的实际数据为边界条件,从事后评估的角度,求解当日最优的机组组合或经济调度方案。所采用的实际数据包括负荷、风电、实际网络拓扑、机组性能参数等。

然而,需要指出的是,在实际的电网调度运行中,造成实际运行与理想调度之间差距的因素往往是多方面的。一方面,调度员在不同业务环节上的决策结果,即调度员所下达的机组组合方案、发电计划等,是影响电网运行的“内部因素”;另一方面,在实际执行过程中,负荷、风电的预测误差、机组的出力偏差、突发的设备故障、机组非计划停运等情况,也会对电网运行的理想度产生影响,本文统称此类因素为“外部因素”。

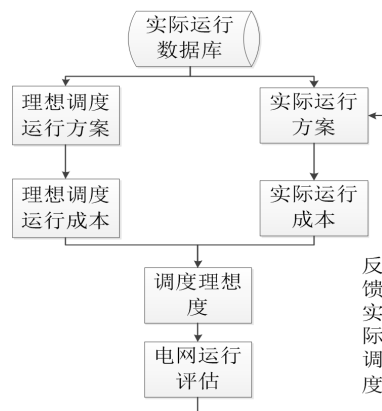


Figure 1. Flow chart for perfect dispatch in PJM

图 1. 美国 PJM 电力市场理想调度评估流程

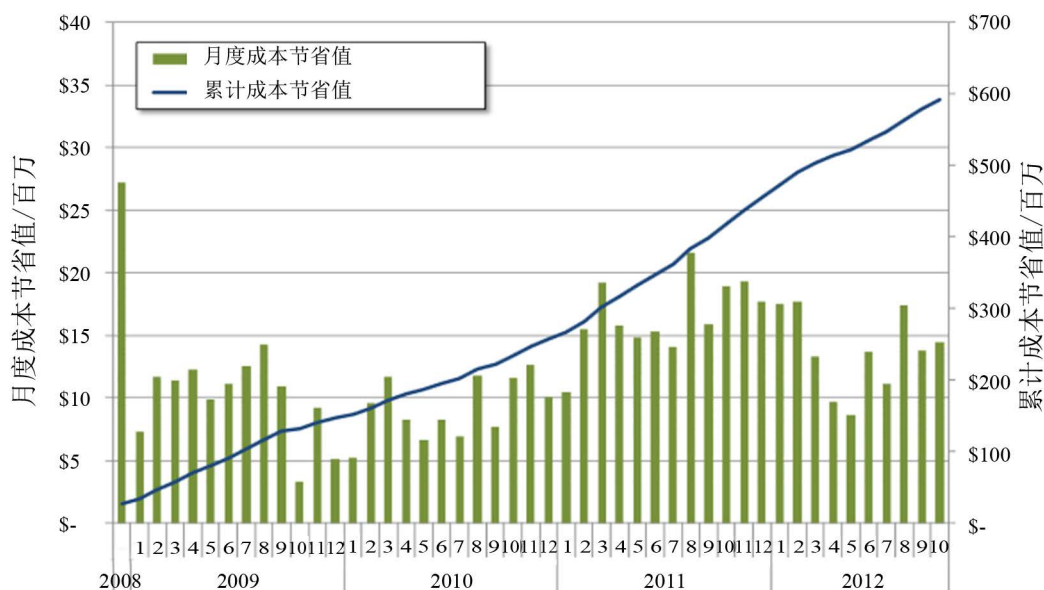


Figure 2. Evaluation of perfect dispatch in PJM

图 2. PJM 电力市场调度理想度评估效益

进一步分析上述各类因素的作用机理, 可以发现, 以上因素在影响电网运行理想度上并不是简单的平行叠加关系, 调度员决策水平在上述因素中处于核心位置; 预测误差、机组出力偏差等外部因素均是在调度员实际下达的调度计划方案基础上, 对电网运行经济效益造成影响, 而这一影响过程相当于改变了计划编制的边界条件。而对于不同类型的外部因素之间, 可近似认为其是相互独立的, 没有相互耦合的成分, 其作用效果可以叠加。为了简化问题的复杂度, 本文认为其作用效果可以线性叠加, 这种假设具有一定的合理性(不是数学意义上的严格成立), 因为理想调度主要采用基于直流潮流的 SCED 模型, 模型本身就具有线性特征。不同因素的关系可以通过由图 3 表示。

需要说明的是, 本文所介绍的理想调度评估只适用于电网经济运行评估的允许范围之内, 当发生严重影响电网安全性的事故时, 调度员的调度指令应重点确保电网运行安全性, 这种情况不在本文所述的理想调度评估框架范围之内。

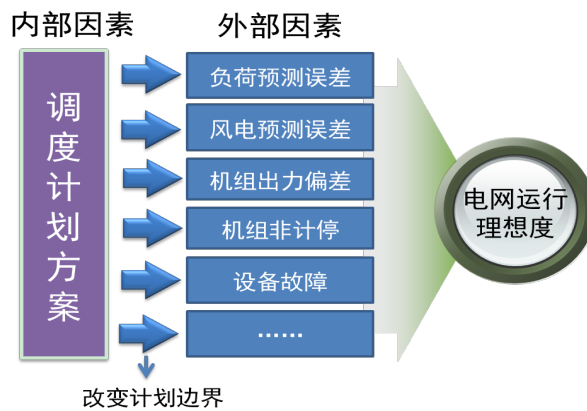


Figure 3. Influence mechanism for different factors
图 3. 电网运行影响因素影响机理图

当前 PJM 电力市场的理想调度评估方法, 由于并未对不同要素的作用机理与作用效果进行区分, 因此在实际评估过程中可能导致一些错误判断。比如: 理想度评估指标尽管出现了逐渐变差的趋势, 但并不意味着实际的调度业务水平也出现了下滑, 可能是由于并网风电不断增加, 导致电网运行的不确定性提高所引起的, 或者是由于某个设备的非计划停运所引起的, 而电网的调度人员在此过程的中已经应对非常得当。因此, 当前的评估方法仅能从整体上评估电网的运行效益, 缺少更加精细化的分析, 评估结果的可信度不够充分, 也难以对实际调度工作水平的提高提供有针对性的分析与建议。

因此, 从提高电网调度运行水平、精细化评估不同因素对电网运行经济性影响的角度出发, 开展理想调度评估时, 应对调度员的决策水平和各类外部因素加以区分, 客观评估调度员决策水平的理想度, 细致量化各类外部因素对于电网运行经济性所造成的影响, 从而为客观评估电网调度运行的工作水平提供更加科学的工具和手段。

3. 基于信息还原的理想调度评估方法

3.1. 评估理念

为精细化评估不同因素的作用效果, 量化不同因素对于经济成本的影响程度, 本文将以“信息还原”为核心评估理念, 在理想调度评估过程中不断重构当时的场景边界, 并对电网调度运行人员的决策思维方式进行模拟。评估理念详细介绍如下:

信息还原, 是指依托于电网运行相关数据的全过程记录, 在理想调度评估过程中, 将边界数据还原到当时的实际决策时间断面上, 而不能简单使用事后的电网实际运行数据。以实时调度为例, 实施理想调度评估所依据的信息应还原到该时间断面上调度员进行决策所依据的系统状态与预测信息。若以事后的实际信息为评估依据, 则会造成评估基准不一致, 混淆评估结果。

在此过程中, 还需要模拟调度运行人员的决策规则与思维模式, 从调度运行人员的视角出发去构建最理想的评估框架, 以确保评估目标与范围上的一致性。如, 对实时调度工作的理想度进行评估时, 调度员决策分析依据的是电网当前运行状态和近期的预测场景, 因此在对评估其决策水平时, 所提出的理想调度方案所遵循的决策规则与决策范围也应与之保持一致, 而不应该简单地以“日”作为评估周期。

此外, 为了分析不同外部因素对电网运行成本的影响, 可对电网的运行场景进行虚拟的构造, 以“单变量影响”为原则, 构造出仅有单一外部因素起作用的新的运行场景, 并通过对比该构造场景和实际场景的区别, 量化分析该因素的影响程度。

3.2. 理想调度分析工具

机组组合(SCUC) [11] [12]和经济调度(SCED) [13]-[17]模型, 是常见的调度计划优化工具, 均可用于模拟电网的运行状态, 以获得在给定目标下满足约束条件的最优调度计划方案。为了简化分析, 本文以 SCED 模型[14]作为理想调度的评估模型。该模型以系统购电成本最低为优化目标, 综合考虑了机组出力范围、机组爬坡能力、线路潮流限制、电力平衡、旋转备用水平、AGC 备用水平等方面约束条件。限于文章篇幅, 本文不对该数学模型展开描述。事实上, 此模型将作为本文所提出理想调度方法的“模拟计算器”, 可在不同运行场景与边界条件下调用, 计算不同条件下的最优调度计划结果, 从而为理想调度分析提供基础的比对信息。

3.3. 过程化理想调度评估模型

基于信息还原理念, 对电网运行信息实施全过程记录之后, 即可对实际执行过程中的运行场景进行“回溯再现”, 从而能够在不同时间断面上量化分析电网调度运行过程中不同因素对于调度理想度的影响。基于此, 本文提出了基于信息还原的过程化理想调度评估方法, 其评估框架如图 4 所示。

与 PJM 的理想调度评估方法相比, 本文所提出的评估方法将理想调度评估与实际的调度业务流程相结合, 转化为以“周期性滚动+事件触发+前瞻回顾”为特征的过程化的评估模式。评估周期从一日细化到日内的多时段, 时间粒度可以细化到一个实时调度时段, 一般为 5 分钟。

首先, 在每一个实时调度时段, 先进行“前瞻式”的预决策评估。本文所提出的理想调度评估方法将自动读取当前电网运行的状态估计信息, 构建电网运行模型, 并读取电网未来一段时间的预测信息, 所读取时间长度取决于调度工作对于“前瞻”能力的要求, 一般为数个小时; 从而构成了调度员实时调度决策所依据的完整信息集。据此, 可以对调度员的实时调度决策进行基于 SCED 的理想调度评估, 生成在预调度时间断面上的理想调度方案, 记为“调度员理想调度方案”; 并同时记录下调度员实际下发的运行计划, 对此两个方案进行对比, 即可对调度员决策水平的理想度进行精确的评估。

与此同时, 在每一个实时调度时段, 需要对过往一段时间电网的实际运行情况进行“回顾”, 即进行“回顾式”的后评估; 时间长度可以是一天、一个调度班次、也可以细化到数个时段; 基于电网的实际运行数据构造“实际电网运行方案”计算电网实际的运行成本, 并从事后评估的角度, 以实际运行情况构造边界数据, 调用 SCED 模型进行模拟计算, 获取“实际理想调度方案”, 该方案实际上就是 PJM 所生成的方案。通过比对以上两个方案, 即可得到实际发生的电网运行整体的理想度偏差, 该偏差事实上既包括了决策水平等内部因素, 也包括了外部边界信息变化所引起的外部因素。

因此, 为了准确分析每一类外部因素对于电网调度运行理想度的影响, 需要进一步引入“事件触发”的理想调度评估机制; 在电网的调度运行过程中, 实时监视电网关键设备、状态变量的运行情况, 一旦辨识出某个因素变化超过阈值, 则启动评估流程。针对每一类因素构造一个单因素变化的电网运行边界数据, 并调用 SCED 进行修正性的模拟计算, 产生针对该因素的“构造理想调度方案”, 将该方案与“调度员理想调度方案”比较, 即可以准确分析该外部因素的变化对于电网调度运行的理想度所产生的影响, 因为此时电网运行遵循一致的调度规则, 且只有该因素本身产生了实质性的变化。当同时或相继辨识出多个外部因素触发事件时, 以上过程需要重复进行。需要进一步说明的是, 考虑到电网运行模型的复杂性与非线性, 多因素相互影响的关系往往不是线性的, 需要对非线性耦合的情况进行校准; 校准对象是“实际电网运行方案”与“调度员理想调度方案”之间的差异, 该差异即反映了所有外部因素共同作用下所造成的影响。

3.4. 基础数据与运行方案

为了更加清楚地描述以上评估框架, 下面将对图 4 中所涉及的基础数据与运行方案进行定义。评估

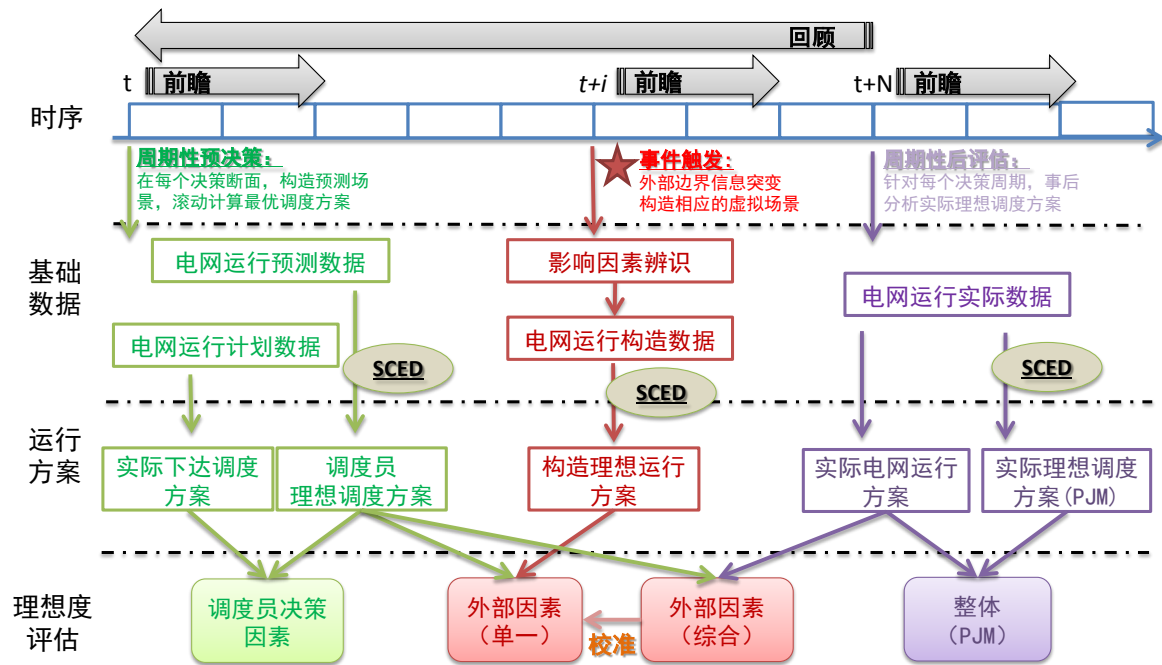


Figure 4. Evaluation structure of perfect dispatch evaluation

图 4. 理想调度评估框架

过程中所涉及的基础数据包括以下四类：

- 1) **电网运行实际数据**，是对电网实际运行信息的记录，包括机组实际出力曲线、线路潮流、负荷曲线、风功率曲线等；
- 2) **电网运行预测数据**，是对电网调度运行中预测信息的记录，包括负荷预测、风功率预测等，需要说明的是，依据信息还原的原则，对于预测数据的记录，应该记录决策时间点上的信息，即每一个调度决策时间点上，面向未来一个或几个时段的超短期预测信息；
- 3) **电网运行计划数据**，是调度员在每个调度决策周期所制定并下达的调度计划，包括机组的发电计划、设备的运行计划等；
- 4) **电网运行构造数据**，是根据理想调度评估需要所提取的边界数据，通过对比电网的实际运行状态与决策时的预测信息，找出发生变化的非决策因素，按照“单变量”原则重新构造理想调度 SCED 计算的边界数据，以分析非决策因素对电网运行的影响。

基于对上述基础数据的分析，可以计算得到五套运行方案：

- 1) **实际理想调度方案**，从事后评估的角度，提取电网运行的实际边界数据，通过调用 SCED 模型进行模拟计算，获取最“理想”的运行方案，并计算此方案下电网最理想的运行成本，计为 C_p ；此方案本质上即是 PJM 的理想调度方案；
- 2) **实际电网运行方案**，提取电网的实际运行数据，包括机组实际的出力曲线、设备的运行状态、线路潮流曲线等，从而形成电网实际运行方案，并计算实际的运行成本，计为 C_A ；
- 3) **调度员理想调度方案**，提取电网在每一个调度时段做出决策的边界数据，包括当时电网的运行状态与此后的超短期预测信息，对一定的决策周期进行 SCED 优化计算，计算结果即为该决策时点上调度员所能决策出的最理想调度方案，同样可计算出该方案的运行成本，计为 C_o ；
- 4) **实际下达调度方案**，提取调度员所下达的调度计划数据，包括机组计划出力、设备的运行计划等，并计算线路潮流等状态变量，形成实际下达的调度方案，并计算该方案的运行成本，计为 C_l ；

5) **构造理想运行方案**, 对比实际电网运行方案与调度员理想调度方案的边界数据, 辨识出发生了变化的外部因素; 基于每一个外部因素对调度员理想调度方案的边界数据进行重构, 并调用 SCED 模型进行优化计算, 以获得第 j 项发生变化的非决策变量所对应的构造场景下的理想调度方案, 并计算该方案的运行成本, 计为 C_s^j 。

通过对上述五套运行方案运行成本的对比分析, 即可对电网调度运行的理想度进行科学、定量、过程化、精细化的评估, 量化计算内部因素、外部因素对于电网调度运行的影响程度。下文将对具体的评估方法进行详细阐述。

3.5. 内部因素的理想度评估方法

基于信息还原的评估理念, 在每个决策周期上, C_I 与 C_O 之差即反映了调度员决策水平对于电网调度运行理想度的影响。方法描述如下:

首先, 基于信息还原的理念, 这两个方案采用了一致的边界信息, 保证两者站在同一“起跑线”上, 从而剔出了在电网调度运行的实际执行过程中, 由于边界信息出现偏差而出现的评估偏差。具体来说, 在实时调度评估中, 两个方案应选用相同的超短期负荷预测数据、网络拓扑信息、机组运行状态信息等边界数据。

其次, 基于决策模拟的理念, 要求调度员应具有一定的前瞻性能力。特别在实时调度过程中, 需要框定实时调度运行的决策时间范围, 不仅需要对当前时段的运行状态负责, 并适当考虑未来一定时间范围的运行前瞻性。在本文中, 不妨记决策周期为 T , 一般来说, T 的范围可在数分钟到数小时之间, 可根据实际工作要求及调度员的职权划分而定。需要说明的是, 决策周期 T 的选择也反映了对于实时调度工作水平的要求, T 越长, 则意味着对调度员的要求更高, 要求调度员能够具备更强的“look-ahead”的能力[18], 能够在优化电网当前运行方式的基础上, 考虑其对于未来时段的适应性, 实现更长时序上的多时段优化。

由此, 决策因素的理想度指标计算公式为:

$$S_{\%}^D = \frac{\sum_{i=1}^{ND} C_I^i - C_O^i}{\sum_{i=1}^{ND} C_O^i} \times 100\% \quad (3.1)$$

(2.2)式中, $S_{\%}^D$ 为决策因素的理想度指标, ND 为“前瞻”的时间范围, 也可认为是实时调度中调度员下达调度方案的次数。 C_I^i 和 C_O^i 分别为第 i 次实际下达调度方案的运行成本和调度员理想调度方案的运行成本。

3.6. 外部因素的理想度评估方法

首先, 比较 C_A 与 C_I 之差。把电力系统抽象为一个控制单元, 则这两个运行方案即分别反映了控制单元在一定输入信息下预想的输出与实际的输出; 虽然两个输出信息的获取有一定的时间延迟, 如: 实时调度为 5 分钟, 但在这个时间周期中, 调度员并未发出新的调度指令, 因此, 当系统本身的状态并未发生改变时, 两个输出之间应该是无差的, 换言之, 若两个输出之间有差, 则该差别主要是由于系统本身的状态发生变化所引起的, 即能够精确反映外部因素的影响。

由此, 记外部因素对于理想度的综合影响为 $S_{\%}^{N,A}$, 其计算公式如下:

$$S_{\%}^{N,A} = \frac{C_A - C_I}{C_A} \times 100\% \quad (3.2)$$

(2.3)式反映了所有外部因素的综合影响, 但却无法对每一个因素单独的影响程度进行量化计算。为

此, 本文引入了构造理想运行方案这一个在实际电网运行中并不存在的运行状态。通过比较电网运行的实际数据和预测数据, 定位运行过程中发生了变化的边界信息; 对于每一类边界信息, 修改其预测数据, 转换为实际数据, 即构造出相应的构造理想运行方案; 通过调用 SCED 模型进行模拟计算, 即可得到该构造理想运行方案的运行成本 C_s^j , 将其与调 C_o 进行比较, 即反映了该外部因素单独作用下对于电网运行理想度的影响情况。计算公式如下:

$$S_{P\%}^{N,j} = \frac{C_s^j - C_o}{C_s^j} \times 100\% \quad (3.3)$$

对以上结果进行校准, 不妨假设外部因素之间的耦合关系是拟线性的, 则可计算每一类要素的影响占比:

$$R_j = \frac{S_{P\%}^{N,j}}{\sum_{n=1}^{NC} S_{P\%}^{N,n}} \quad (3.4)$$

(3.4)式中, NC 为起作用的外部因素数量; R_j 为第 j 类外部因素影响程度占比。

校准后的计算公式如下:

$$S_{S\%}^{N,j} = S_{S\%}^{N,A} \times R_j \quad (3.5)$$

(3.5)式中, $S_{S\%}^{N,j}$ 为第 j 类外部因素的影响程度, 显然有:

$$S_{S\%}^{N,A} = \sum_{j=1}^{NC} S_{S\%}^{N,j} \quad (3.6)$$

需要说明的是, 上述评估流程实际上针对的是实时调度中调度员下达一次调度方案所对应的时间范围, 当需要对更大时间范围的影响进行评估时, 只需要将上述计算公式中 C_A 替换成相应时段统计值, C_I 和 C_o 替换成多次调度方案的累加值即可, 不再赘述。

4. 算例分析

以我国某省的实际运行数据构造算例, 分析 PJM 原有的理想调度评估方法与本文所提出的理想调度评估方法之间的差异。

4.1. 基本数据

该省 220 kV 及以上网络拓扑共有节点 518 个, 支路 934 条, 此外还有外网联络线 6 条, 包括交流联络线 4 条, 直流联络线 2 条。装机规模上, 该省统调装机 5879.8 万千瓦, 统调机组 220 台, 包含抽蓄两台, 风电装机 700 万千瓦。调度中心发布实时调度机组出力计划的时间间隔为 15 分钟。对该省电网 2012 年 07 月某日的运行情况进行理想调度评估。设置实时调度的“look-ahead”能力为 2 小时。

系统实际负荷曲线如图 5 所示。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。

4.2. 评估结果分析

基于美国 PJM 理想调度评估方法的计算结果如图 6 所示, 两条曲线分别为电网实际运行方案和利用实际理想调度方案的逐时段购电成本。

基于本文所提出的评估方法, 实时调度的评估分析如图 7 所示。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。

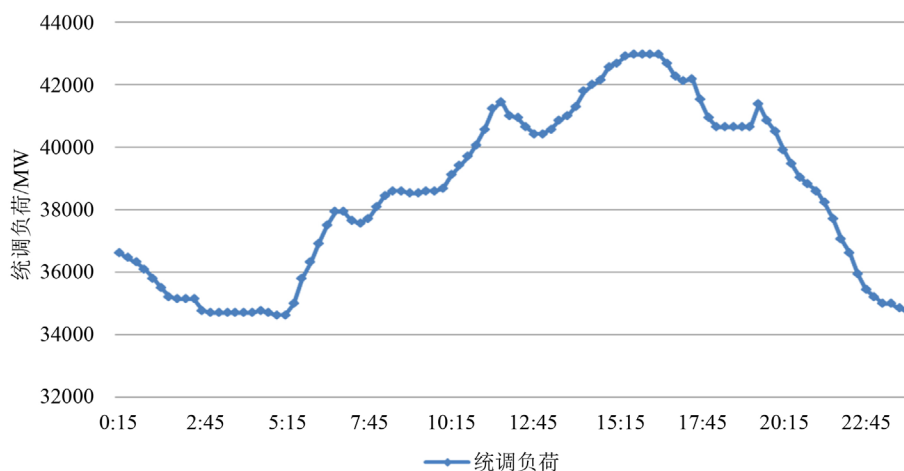


Figure 5. Power load curve for the case

图 5. 统调负荷曲线

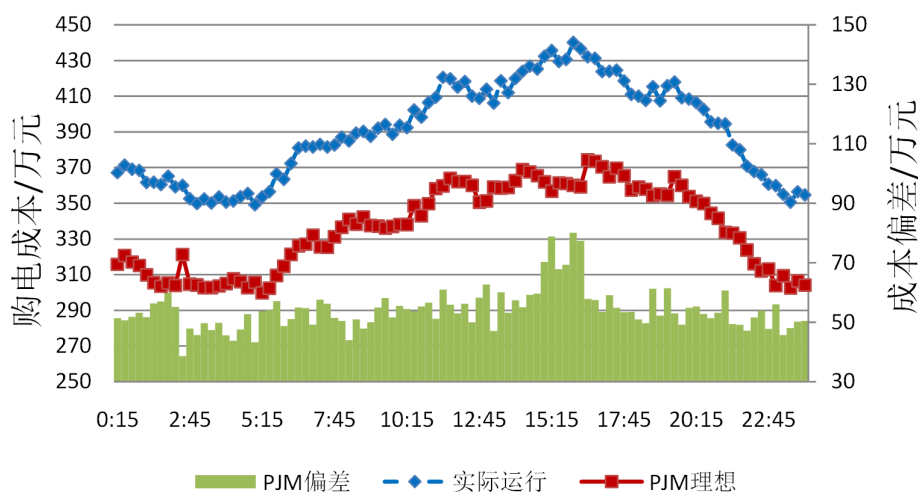


Figure 6. Cost curve with the PDEM in PJM

图 6. 美国 PJM 理想调度评估成本曲线

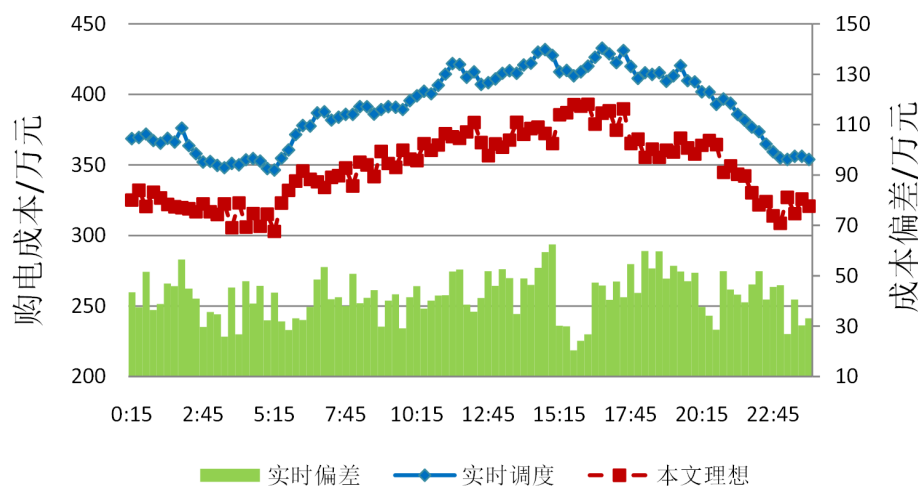


Figure 7. Cost curve with the proposed PDEM

图 7. 本文理想调度评估成本曲线

由于没有发生机组、线路等设备故障, 影响电网运行的外部因素主要为风电出力偏差与负荷预测偏差。基于上文所提出的评估方法, 计算结果如表 1 所示。

PJM 评估方法所计算的理想度为 17.67%; 而本文所提出的理想调度评估方法, 决策因素理想度为 9.52%, 外部因素综合影响度 5.21%, 构造数据理想调度分析表明, 风功率预测偏差与负荷预测偏差影响度比例约为 5.1:1, 则风功率预测偏差影响度 4.36%, 负荷预测偏差影响为 0.85%。

需要注意的是, 电网运行整体理想度并不是决策因素与外部因素理想度的简单相加, 其差距实际上反映了两类因素的“叠加”效应, 是一种非线性的关系。

4.3. 决策因素的精细化分析

对评估过程信息进行深入的挖掘, 可以更为精细化地分析不同因素的影响程度, 尤其对调度员的决策水平进行客观评价。为了更加清晰地说明这一点, 图 8 将 PJM 理想度评估与本文理想度评估方法对于决策因素所引起的购电成本偏差以柱图的形式同时叠放在一个图中, 并比较两种购电成本偏差的区别, 以标志为“差值”的曲线表征。

分析可得, 两种方法不同时间段的购电成本差异也是不同的, 不是简单的比例关系, 在正常的运行状态下, 该差异都在一个较小的范围内(0~30 万)波动。这一波动量主要为外部因素的影响效应。

然而, 在时段 15:15~16:15 之间, 即图中红框所框的时间范围内, 购电成本偏差有了一个较大的“跳

Table 1. All-day perfect dispatch evaluation

表 1. 全天气理想度分析

类型		理想度(%)
整体理想度(PJM)		17.67
决策因素		9.52
综合影响		5.21
外部因素	风功率预测偏差	4.36
	负荷预测偏差	0.85

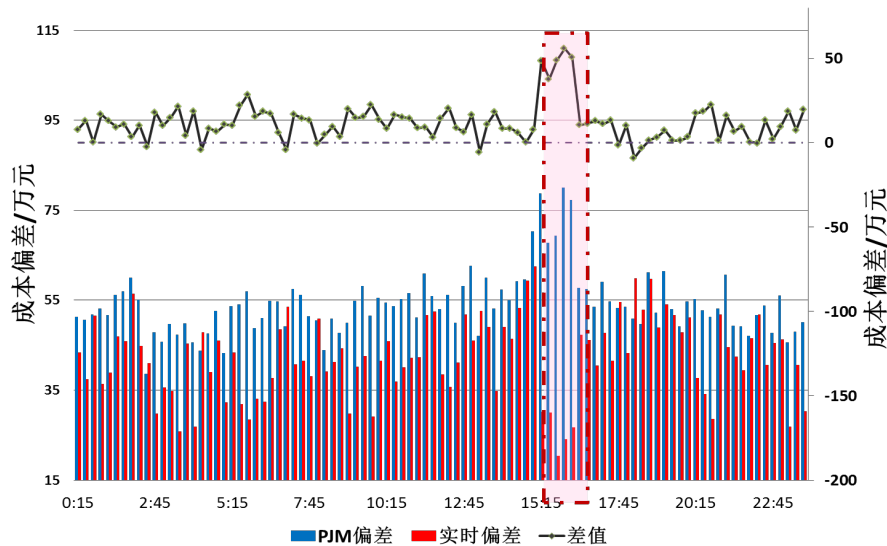


Figure 8. Comparison on each time purchasing

图 8. 逐时段购电成本差异对比图

跃”。对该时段区间的电网运行信息进行深入分析可发现, 在 15:15~16:15 期间, 引起购电成本偏差的主要因素为实时的风电运行中出现了由于风场自身控制所引起的严重非计划性弃风。

风电出力曲线如图 9, 在所关注时段内, 风电实际出力与预测出力的偏差比例高达 56%, 远高于全天的平均偏差 19.5%。而在此期间, 超短期负荷预测偏差, 预测偏差比例 0.95%, 与全日平均预测偏差比例 0.99% 基本持平。

在该时间范围内, 理想度评估结果如表 2 所示。与全天相比, 由于突发的风电运行异常, 造成该时

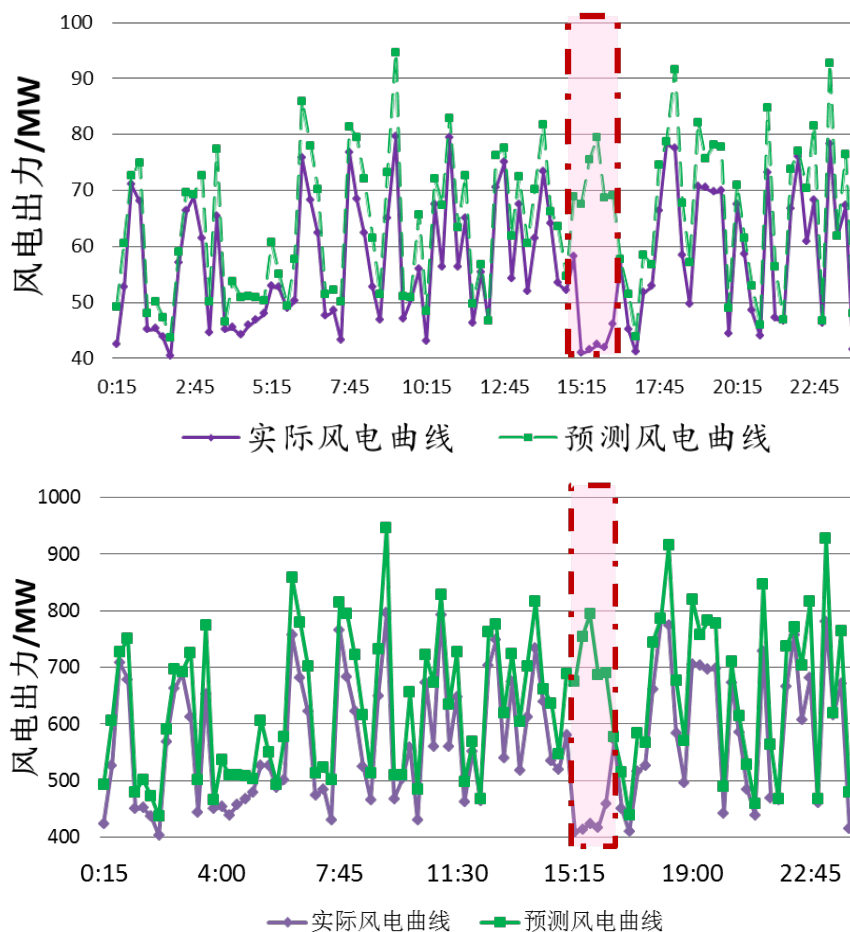


Figure 9. Comparison between actual and forecasted wind generation

图 9. 风电的实际出力曲线与预测曲线比对

Table 2. Perfect dispatch evaluation for a specific time period

表 2. 局部时段理想度分析

类型		理想度(%)
整体理想度(PJM)		19.41
决策因素		4.43
综合影响		8.72
外部因素	风功率预测偏差	7.89
	负荷预测偏差	0.83

段电网运行理想程度明显下降, PJM 理想度评估结果, 该时段理想度远高于全天平均水平, 是全天表现最差的时段; 而通过比较可发现该时段范围调度员决策理想度明显优于全天其他时段, 其理想度指标为 4.43%, 远低于全天平均 9.52%。实际上调度员在该时段的决策已经较为合理, 然而突发的弃风导致系统整体运行效益下降。如果采用 PJM 原有的理想调度评估方法, 则以上的客观结论无法得到。因此, 本文所提出的理想调度评估方法能够更准确的辨析影响电网运行效益的主要因素。

5. 结语

理想调度评估方法的核心价值在于改变了传统依据电网运行统计数据进行分析评估的思路; 通过划定运行“天花板”, 实现对电网调度运行效益的量化评估。本文在深入分析 PJM 理想调度的理念与方法的基础上, 对影响电网调度运行效益的决策、外部两类因素的影响机理进行了全面剖析; 引入信息还原的评估理念, 构建了以“周期性滚动+事件触发+前瞻回顾”为特征的过程化理想调度评估方案, 实现了对调度员决策水平的评估以及不同类型外部因素对经济成本影响的量化分析。基于某省电网实际运行数据的算例分析表明, 本文所提出的理想调度评估方法, 在 PJM 理想调度评估的基础上, 能够有效辨析不同因素的影响, 客观评价调度员决策水平, 量化不同类型外部因素对电网运行经济成本的影响, 有利于提高调度业务管理工作的精益化水平。

基金项目

国家高技术研究发展计划(863 课题, no.2011AA05A118); 南方电网科技项目(K-ZD2012-001)。

参考文献 (References)

- [1] 王超, 徐政, 高鹏, 等. 大电网可靠性评估的指标体系探讨[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(1): 42-48.
- [2] 陶文斌. 输电网运营经济性评价系统研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2003: 6-10.
- [3] Security, Quality, Reliability, and Availability: Metrics Definition: Progress Report, EPRI, Palo Alto, 2005. 1008569.
- [4] Strategic Insights on Security, Quality, Reliability, and Availability, EPRI, Palo Alto, 2005. 1008566..
- [5] Chen, H. and Bresler, F.S. (2010) Practices on Real-Time Market Operation Evaluation. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 4, 324-332. <http://dx.doi.org/10.1049/iet-gtd.2009.0188>
- [6] Ott, A.L. (2010) Evolution of Computing Requirements in the PJM Market: Past and Future. *IEEE PES General Meeting*, 1-4.
- [7] Ott, A.L. (2011) Development of Smart Dispatch Tools in the PJM Market. *IEEE PES General Meeting*, 1-3.
- [8] Gisin, B., Qun, G., Mitsche, J.V., et al. (2010) “Perfect Dispatch”—As the Measure of PJM Real Time Grid Operational Performance. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 1-8.
- [9] 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.
- [10] PJM. Executive Report. <http://www.pjm.com/documents/manuals.aspx>
- [11] 李整, 谭文. 秦金磊. 一种用于机组组合问题的改进双重粒子群算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 189-195.
- [12] 张建, 由崇. 改进遗传算法对机组组合问题的研究[J]. 中国电业(技术版), 2011, 17(2): 4-7.
- [13] 李彩华, 郭志忠, 樊爱军. 电力系统优化调度概述(I)—经济调度与最优潮流[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(2): 60-63.
- [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.
- [15] 吴杰康, 唐利涛, 黄兔, 等. 基于遗传算法和数据包络分析法的水火电力系统发电多目标经济调度[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 76-81.
- [16] 刘刚, 彭春华, 相龙阳. 采用改进型多目标粒子群算法的电力系统环境经济调度[J]. 电网技术, 2011, 35(07):

139-144.

- [17] 卢有麟, 周建中, 王永强, 等. 水火电力系统多目标环境经济调度模型及其求解算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 93-100.
- [18] Gu, Y.Z. and Xie, L. (2012) Look-Ahead Dispatch with Forecast Uncertainty and Infeasibility Management. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 1-7.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: sg@hanspub.org