

Data-Driven Power System Real-time Dispatch with Comprehensive Objectives and Constraints - Part I

J. W. Hagge, *Senior Member, IEEE*, and L. L. Grigsby, *Fellow, IEEE*

Abstract—本文提出了数据驱动的多目标、多约束实时调度框架，包括通用优化模型，以及针对优化模型中的非凸成分的处理方法——对于可以进行局部近似的连续成分，本文采用数据驱动的在线模型辨识技术将其转化为凸模型进行求解；对于因部分安全指标从越界中恢复而产生的阶跃的非凸成分，本文选择在权衡多个竞争目标的过程中对其进行处理，针对考虑/不考虑安全指标优先级排序的场景提出了两种具体的算法。

本文的第一部分给出了实时调度问题的理论与框架，包括调度问题的分类、通用模型的形式，并给出了对模型中非凸成分进行局部凸近似的求解方法。以一个考虑了多种安全和效益目标的调度问题为例，在 39 节点系统中对于相关方法进行了验证。

在第二部分中，本文将重点讨论部分安全指标从越界中恢复而产生的阶跃性非凸成分的处理，形成一个可以用于不同运行条件下的实时调度通用策略。

Index Terms—real-time security-constrained economic dispatch, N-1 security considerations, small signal stability constraints, system model identification, phasor measurement unit.

I. INTRODUCTION

A. 新的调度环境呼唤新的调度机制框架

电力系统调度任务通过调节不同电源的功率输出来保障电能生产和消费实时平衡，维持系统运行安全的功能，并提高运行的经济、环境、能效等目标。[1]随着电力行业自身的发展变革以及社会对电网的更高要求，这项工作如今面临着多方面挑战：

- 光伏、风机等地理位置分散、功率输出不确定的新式电源在源荷双侧大量接入，降低了电网供给侧的可控性和需求侧的确定性，让事先制定准确的调度计划变得越发困难[2][3][4][5][6]。

- 现代社会对电力调度的要求越发多元化，除了传统的运行成本之外还需要考虑多种安全指标[7]、有害物质排放指标[8]和碳排放指标[9]等多种因素，让电力系统调度成为了一个不易求解的多目标多约束问题。

- 动态稳定裕度等新调度目标和需求响应等新可调度

量的引入，为调度问题中的目标与决策变量带来了新的函数关系，形成了更加复杂的控制特性，要求调度任务采用更复杂精确的模型。[10][11]

- 具有不同物理特性和行为特征的新型电源设备接入电网，使得调度问题的决策变量受到更复杂的约束，让调度模型进一步复杂化。[12]

在这样的调度环境下，传统的调度框架和调度技术都需要进一步革新，以适应陡增的不确定性以及越发复杂的目标函数、控制特性和物理约束。由于调度问题在不同电压等级和时间尺度上的建模存在差异，我们将在下一小结简述常见的调度任务类型，并且对本文所研究的问题进行定位。

B. 本文的研究问题定位

调度问题按照被调网络的电压等级分为主网调度、配网调度和微网调度。主网调度[2]面对的主要是电压等级较高的输电网，其输电线路具有较低的阻抗比，可解耦为有功和无功调度问题。配网和微网调度[13]的对象包含许多阻抗比超过 1 的线路，故有功和无功无法解耦，需要联合分析。本文研究的问题主要在主网层面。

在主网层级上，狭义的调度问题主要指有功调度，包括机组组合和有功平衡问题；[14]对发电机无功出力的调度则和无功补偿装置投切一起放入无功优化问题中，单独研究。[15]本文研究的问题属于有功平衡调度问题。

根据时间尺度的不同，可将有功平衡调度分为日前计划（day ahead）[16]、小时前计划（hour ahead）[17]、小时内调度（intra-hour）[18]等类型，其中小时内调度又有十五分钟、五分钟、乃至实时调度[19]等尺度。不同时间尺度的调度问题面临的挑战不同。时间尺度越大，对系统内随机变量的预测精度越低，越难做到计划与实际匹配；时间尺度越小，对系统内随机变量的预测精度越高，但对计算速度的要求越高，难以采用复杂模型和算法求解。此外，在较大的时间尺度上，调度问题需要考虑机组组合变化，按照发电机的停开机计划分时段处理。在实时调度时

Financial support should be acknowledged here. Example: This work was supported in part by the U.S. Department of Commerce under Grant BS123.

The paper title should be in uppercase and lowercase letters, not all uppercase.

The name and affiliation (including city and country) of each author must appear on the paper. Full names of authors are preferred in the author line, but are not required. Initials are used in the affiliation footnotes (see

below). Put a space between authors' initials. Do not use all uppercase for authors' surnames.

Examples of affiliation footnotes:

J. W. Hagge is with Nebraska Public Power, District Hastings, NE 68902 USA (e-mail: j.hagge@ieee.org).

L. L. Grigsby is with the Department of Electrical Engineering, Auburn University, Auburn, AL 36849 USA (e-mail: l.grigsby@ieee.org).

间尺度上, 当一个调度周期足够小时, 也可能和自动发电控制乃至一次调频处于相同的时间尺度, 需要安排配合或者避让措施。本文研究的问题属于分钟级实时调度, 默认每个调度周期内不发生发电机启停, 也不考虑频率控制冲突问题。

分钟级的调度周期要求实时调度直面系统不确定性带来的扰动, 并且负责减少这些扰动对调度效果的影响。对于一些难以在大时间尺度上预测并且处理的安全事件, 例如欠阻尼等, 实时调度可以通过调节发电机有功出力及时修复有关的安全指标, 避免安全事件转化为安全事故。在经济性和其他社会效益的层面上, 实时调度可以根据电网实际的负荷分布和其他运行状态信息对既定的发电机出力曲线进行微调, 在运行环境发生变化时持续跟踪效益最优的运行点。

由于时间尺度的限制, 实时调度必须严格控制计算复杂度, 采用可以实时进行的计算策略来应对新的不确定性, 新的调度目标, 新的控制特性和新的物理约束。为了满足这样要求, 需要提出新的建模和求解方法。

C. 实现实时调度的三条可能路径

电力系统在物理上是一个时变的非线性离散-连续混合系统, 使用完整模型对这个系统的部分输出进行优化存在较大困难, 因此在传统的调度流程中常常对模型进行简化, 采用只考虑潮流方程甚至直流潮流的近似模型进行求解。[2]

然而, 随着新的调度目标的加入, 一些新的优化对象, 例如一些暂态稳定指标和小扰动稳定指标, 原则上需要使用更加精确的系统模型才能计算, 再加上前面提到的诸多增加系统复杂度的因素, 对调度问题进行实时求解变得相当困难。

为了克服这个障碍, 过往研究和实践中提出了许多不同的处理方法, 具体方法可以分为如下几类:

1、使用离线优化求解的手段绕开计算能力的瓶颈, 通称场景法。

场景法首先需要离线建立完整的优化模型, 然后选择一批典型场景优化求解, 得到不同场景下的最优调度方案。在系统实际运行过程中, 将实际场景与典型场景进行在线匹配, 调用并执行预先算好的调度方案。[16]

场景法将耗时较长的优化求解过程从实时框架中剥离了出来, 在线运行时只需要进行匹配运算, 从而绕开了求解速度对实时性的影响。然而, 在电力系统越发复杂的今天, 要想应付实际电网中层出不穷的不确定性需要枚举海量的场景, 即使采用离线计算的方法也难以完成。同时, 完整的电力系统模型包含大量的元件参数, 其中许多参数会随着温度等因素不断改变, 难以精确获取, 这让使用精确模型进行优化的优势难以发挥。[20]

鲁棒优化[21]和随机优化[22]的使用可以减少上述两点问题带来的影响, 让场景法在离线计算无法获得准确模型参数、在线使用无法完全匹配预设场景的情况下也能获得相对较好的调度方案。然而, 复杂系统的不确定性具有混沌效应, 即便采用鲁棒优化和随机优化, 也难以保证系统真实运行不超出既定范围; 且, 实时调度的初衷是用快速

的调节能力跟踪系统的不确定运行, 鲁棒优化和随机优化显然无法实现跟踪功能。

2、投入更多计算资源, 在线进行完整模型的建立和求解

计算元件性能提升遵循摩尔定律[23], 目前的计算瓶颈在未来或许不会构成障碍。如果超实时仿真技术[24]的发展让我们有足够的计算资源可以投入, 理论上就可以在精确的系统模型上进行实时优化, 从而避免场景法场景涵盖不全的问题, 甚至可以在每个时刻都输出全局最优的调度方案。

除硬件性能提升以外, 减少计算需求是另一项重要的方法。一方面, 按照调度需求的重要程度重建部分目标函数, 去掉冗余约束, 可以在一定程度上回避不必要的计算, 提高计算速度。[25]另一方面, 在 ADMM 等分布式计算框架下将优化目标解耦, 投入大量计算单元进行并行计算, 并且在寻找最优解的过程中采用更高效的优化算法, 也可以有效减少计算用时。[26]

然而, 上述方法依然不能解决模型参数不准确的问题。同时, 尽管计算速度不断提升, 电网本身的复杂性也在不断提升, 目前没有证据表明前者一定能跑赢后者。此外, 在廉价的高性能计算真正普及以前, 我们依然需要寻找现有技术条件下更为可行的方案。

3、用可以快速求解的局部近似模型代替完整模型

实时调度的调度周期很短, 系统的运行点在一个调度周期内发生的改变有限, 这使得我们在每一个调度周期里都能用一个局部近似模型代替完整的系统模型来简化问题。由于局部近似模型只需要描述系统在当前运行点附近的行为, 它们可以做得比完整模型简单很多, 从而大大减少计算量。考虑到可操作性, 近似模型一般选用便于优化的凸模型, 并且在所有的时刻都采用相同的数学形式, 只通过重新辨识模型的参数来适应运行点的变化。[27]

由于每个调度周期都需要对模型的参数进行重新辨识, 这种方法对测量点的覆盖范围、采样频率以及信道的稳定性都有较高的要求。但也正因为模型的参数是实时辨识的, 这一方法不再依赖精确的元件参数, 可以从根本上避开元件参数误差带来的计算问题。

由于近似函数只在当前运行点附近有效, 这种方法缺乏爬山能力。当局部最优解和全局最优解之间存在较多的劣质解时, 系统最终有可能无法达到最优状态。然而, 实时调度的任务是对更大时间尺度上优化出的调度曲线进行微调, 每个调度周期的初始运行点本身距离最优解就不会太远, 最优点只是因为节点功率波动和其他不确定性因素偏离了当前运行点而已, 这时能找到的局部最优一般就是全局最优。

另一个问题在于, 完整的调度模型可能包含离散成分, 这会让部分运行点附近出现无法近似成连续函数的数值突变, 需要用额外的方法进行处理。

D. 技术条件改善带来新的契机

C 部分提到的三种实时调度思路均依赖于不同技术领域的进步: 场景法要求更大的离线计算能力和存储能力来处理过多的场景, 直接在线求解依赖更高的在线计算速度, 而采用局部近似模型的方法由数据驱动, 依赖的是普遍部

署、高频采样、稳定传输的信息采集设备以及高速可靠的数据处理技术。目前，由于信息技术领域取得的各项突破，基于局部近似的方法获得了前所未有的发展契机。

在通讯领域，随着工业物联网产业链逐步成型，即将大量涌入市场的通用物联网模块和解决方案将为电网信息系统的建设和升级提供大量加速度；[28] 5G时代的到来将大大提高信道的传输带宽，降低单位数据的传输成本，让调度中心可以廉价地获得高质量的采样数据以供辨识。[29]

在算法层面，数据分析和系统辨识学科的发展为系统模型的凸函数近似提供了有力的数学工具，许多使用传统方法不好进行模型辨识的情形在使用了新的数学工具后得到了解决。[30][31]

在硬件层面，实时处理量测数据所需的计算资源本来就比对完整模型进行实时优化要少得多，逐步增强的芯片计算能力足以对其提供足够的支持。[23]

在这样的技术条件下，上述路径3具有充分的发展前景。

E. 基于局部近似模型的实时调度技术需要解决的问题

D部分提到的三点契机为路径3所描述的实时调度技术提供了新的可能性，但要将其真正完成并应用于生产实践，仍有下列几点问题需要回答：

1、采用怎样的理论架构

为了得到一个能普遍应用于大多数实时调度问题的通用框架，首先需要建立一个完善的理论架构，具体需要回答如下问题：实时调度任务具体需要实现哪些目标，其数学表达分别具有怎样的特点；针对这些调度目标，选择怎样的优化模型来描述实时调度任务；构建一个怎样的求解流程来求解这一优化模型。

2、采用怎样的实现方案

在完成理论架构的设计之后，需要面对的是方法选型问题，具体包括如下几点：在求解流程的哪些环节，选择完整模型中的哪些成分进行局部近似；如何处理优化模型中无法进行局部近似的成分；近似模型辨识完毕之后，如何使用这些近似模型求取每个调度周期的最佳输出。

3、方法适用于怎样的具体应有场景

针对不同电网的具体特点和调度要求，考虑以下问题：上述实时调度框架和方法直接适用于哪些具体场景？在哪些应用场景下可以参与解决部分问题？在哪些场景下需要等待其他学科的进步后才能使用？哪些场景不适合使用？

针对上述三点问题，本文的I部分完成了理论架构的设计，并且针对系统平稳运行、安全裕度缺额较小时的应用场景给出了具体的建模和求解方案。针对安全裕度缺额较大、单个调度周期内难以将系统恢复到安全状态的情形，第II部分将给出改进的调度架构和求解方案。

F. 本文的剩余部分的章节划分

第二章研究实时调度问题的基础理论，将调度目标按照紧急程度进行分类，建立实时调度的统一模型；第三章提出了一种数据驱动的实时调度通用架构。第四章给出了架构和策略在一个具体的多目标多约束调度问题上的应用和仿真结果，第五章进行总结和展望。

II. THEORY AND MODELING

本章探讨了不同类型的调度目标以及对应的优化问题，在此基础上提出一个解决实时调度问题、获取最佳调度方案的通用框架。

A. 实时调度任务的目标及其数学表示

实时调度通过对系统中所有可调度发电机的有功出力参考值进行实时调节来达到一系列既定的调度目标，其调度方案的实时生成过程可以表述为一个以发电机有功出力为决策变量的含约束多目标优化问题的求解过程。在这个过程中，由于不同的调度目标有轻重缓急之别，作为优化问题的目标时有不同的函数形式。

常见的调度目标按照重要程度可以划分为以下三个等级：

一级调度目标：保证电力系统不会立即崩溃的调度目标。每个一级调度目标可以用一个安全性指标和一个对应的安全阈值表示成一个分段的目标函数：

$$J_i^I(x) = \begin{cases} \infty, & s_i(x) > h_i^I \\ 0, & s_i(x) \leq h_i^I \end{cases} \quad (1)$$

其中 x 为所有可调度的发动机有功出力参考值组成的列向量， $J_i^I(x)$ 为第 i 个一级调度目标对应的目标函数值， $s_i(x)$ 为该目标对应的安全性指标， h_i^I 为目标对应的安全阈值。一个一级调度目标只对立刻导致系统无法运转的指标敏感，并且不可逾越。例如，如果第 i 个一级调度目标意在避免系统出现振荡，那么安全性指标 $s_i(x)$ 可能是系统某个主导振荡模式关于发电机有功输出向量的函数，安全阈值 h_i^I 为0。当这个振荡模式出现负阻尼时， $J_i^I(x)$ 为无穷大。当这个振荡模式没有出现负阻尼时， $J_i^I(x)$ 为0。也就是说，只要该指标满足稳定判据，则必然为最优解。一级调度目标的这种极端设计要求每个第一级调度目标在每个调度周期中都必须达到最优。当有任何一个一级调度目标无法达成时，必须立即请求安稳系统支援。

二级调度目标：保证电力系统运行在一个安全的运行点上的调度目标，同样可以表示为指标-阈值对，因此具有和一级调度目标相近的目标函数结构：

$$J_i^{II}(x) = \begin{cases} f_i(x) - h_i^{II}, & f_i(x) > h_i^{II} \\ 0, & f_i(x) \leq h_i^{II} \end{cases} \quad (2)$$

其中 $J_i^{II}(x)$ 为第 i 个二级调度目标对应的目标函数值， $f_i(x)$ 和 h_i^{II} 分别表示该目标对应的安全性指标和阈值。二级调度目标是保证系统远离不安全的运行点所做的缓冲区，因此它们选用的安全性指标往往与一级调度目标类似，但采用的阈值和一级调度目标比相对严格。例如，一个意在避免系统出现振荡的二级调度目标同样会采用某个主导振荡模式关于发电机有功输出向量的函数作为其安全性指标 $f_i(x)$ ，但对应的阈值 h_i^{II} 则可能选为3%。在一级目标全部达成之后，每一个二级调度目标都应被尽可能快地被达成。在这个过程中，不允许为了改善一个二级调度目标而让另一个二级调度目标恶化。

三级调度目标：保证系统满足一系列社会效益的调度目标，具体可能涉及经济、节能、环保、低碳等多种指标。三级调度目标只有前两级调度目标全部达到最优时在才会

被考虑, 并且不同的社会效益指标的价值必须能转化为某一相同量纲, 以实现类别间的互相比, 方可对调度方案的总体效益做出评价。基于这些特点, 三级调度目标可以表示为如下形式:

$$J^{\text{III}}(x) = \begin{cases} J_{\max}^{\text{III}}, \exists j: J_j^{\text{I}}(x) > 0 \vee \exists k: J_k^{\text{II}}(x) > 0 \\ \sum_i w_i * c_i(x), \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $J^{\text{III}}(x)$ 为三级调度目标的目标函数值, 反映综合考虑了所有相关指标后对当前调度方案社会经济效益的评价, J_{\max}^{III} 取 $\sum_i w_i * c_i(x)$ 的上界。 $c_i(x)$ 为某一效益指标对于发电机有功出力向量的函数, w_i 为这一指标的在总社会效益中的权重。在一个仅考虑发电成本的简单任务中, $c_i(x)$ 可能表示某台发电机的发电成本, 而在一个额外考虑了碳排放的任务中, $c_i(x)$ 也可以表示某台发电机占用的碳排放指标对应的市场价格。 w_i 根据具体的经济政治要求为不同的效益指标赋予权重, 将不同的指标合并为一个统一的评价函数 $J^{\text{III}}(x)$ 。

B. 综合考虑不同等级调度目标的统一调度模型

由于调度任务只有在系统稳定的状态下才会进行, 每个调度周期开始时应先对所有一级目标的初始状态进行校验。如果发现不为 0 的一级调度目标, 说明系统处于失稳状态, 此时应该将调度任务挂起, 等待安稳系统将系统恢复后再重新开始调度。在检验通过的场合, 调度方案的生成过程可以视为求解一个面向上述三类调度目标的多目标多约束优化问题的过程, 该优化问题可以表示为如下形式:

$$\text{minimize } J(x), \quad (4-a)$$

$$\text{subject to } \sum_i x_i = P_{\text{loss}}(x) + \sum_j P_{L,j}, \quad (4-b)$$

$$|x_0 - x| \leq dx_{\max} \quad (4-c)$$

$$J(x) \leq J(x_0). \quad (4-d)$$

其中, $J(x) = [J_1^{\text{I}}(x), J_2^{\text{I}}(x), \dots, J_1^{\text{II}}(x), J_2^{\text{II}}(x), \dots, J^{\text{III}}(x)]^T$ 为所有调度目标函数构成的目标向量。(4-b) 为潮流约束, $P_{\text{loss}}(x)$ 为当前负荷分布下系统网损对发电机出力的函数, $\sum_j P_{L,j}$ 为系统的总负荷需求; (4-c) 为发电机可调节量的约束, 其中 dx_{\max} 为各发电机在一个调度周期内改变有功出力的能力上限构成的列向量, 由发电机的爬坡能力和出力上限决定。(4-d) 要求 $J(x)$ 中的所有调度目标在调度过程中不会恶化, 其中 x_0 为进行调度前所有可调度的发动机有功出力参考值, 描述系统的初始运行点。由于调度周期开始时所有一级目标均通过校验, (4-d) 可以保证系统在整个调度过程中不出现失稳; 除此之外, 根据前述调度目标的定义, 如果初始解能使所有二级调度目标函数为 0, 那么初始目标函数值中只有三级调度目标可能非最优, 这时任何一个不满足(4-d)的解显然比初始解更差; 当初始解不能使所有二级调度目标函数全部为 0 时, 采用任何一个不满足(4-d)的解意味着实时调度会让某个安全指标比起不做实时调度时出现更严重的越界, 这是不能接受的。

由于(4)是一个标准的多目标优化问题, $J(x)$ 中的所有目标函数不一定总是能同时取得最小值。如果存在一个 \tilde{x} , 使得 $J(x)$ 中所有目标同时取得最小值, 则称(4)有最优解 \tilde{x} 。当(4)没有最优解时, 不同解之间的好坏由它们之间的支配关系决定。对于任意两个符合约束的解 x_1 和 x_2 , 如果 $J(x_1)$

中的每一个目标函数值都不比 $J(x_2)$ 大, 且至少有一个目标函数值比后者小, 则称 x_1 支配 x_2 。所有不被其他任何解支配的解称为非劣解, 它们构成的集合称为(4)的帕累托集。当(4)没有最优解时, 应从其帕累托集里选择一个非劣解作为当前时刻的调度方案 (tradeoff) [32]

III. FRAMEWORK AND STRATEGIES

针对 section II 提出的统一调度模型, 本章提出一种适用于常规调度场景的通用调度策略。

A. 调度模型在系统平稳运行时的简化

由于实时调度的调度周期非常短, 且发电机有功出力的改变速度有其极限, (4)只在初始运行点 x_0 附近有可行解, 因此初始运行点的位置对于(4)的求解有着很大的影响。根据初始运行点下一、二级调度目标的达成情况, 可以将系统的初始运行状态划分为如下三种:

①失稳状态: 初始运行点存在至少一个不为零的一级调度目标, 系统处于失稳状态, 安稳系统根据各自的失稳判据投入动作。此时实时调度任务应当挂起, 直至系统恢复稳定之后再重新执行调度任务。

②警戒状态: 初始运行点令所有一级调度目标函数值为 0, 但存在至少一个二级调度目标函数值不为 0。此时, 系统能稳定运行, 但在部分指标上不满足安全裕度的要求, 调度系统需要通过调整发电机有功出力将运行点移动到裕度充足的位置上。

③安全状态: 初始运行点令所有一、二级调度目标函数值为 0, 系统处在一个安全的状态下, 应该在不破坏这种状态的情况下, 尽量增加系统运行的社会经济效益。

在更大时间尺度的调度任务正常运作的情况下, 实时调度在每个调度周期的初始状态大多为安全状态。即使因为系统不确定波动带来的影响而进入警戒状态, 由于实时调度的周期极短, 大多也可以在一个周期内恢复安全。这种情况下, 最优解的一二级调度目标均能被优化到 0, 故可以将(4)简化为如下等价形式:

$$\begin{aligned} &\text{minimize } \sum_i w_i * c_i(x), \\ &\text{subject to } \sum_i x_i = P_{\text{loss}}(x) + \sum_j P_{L,j}, \\ &|x_0 - x| \leq dx_{\max} \\ &\forall i, s_i(x) \leq h_i^{\text{I}} \\ &\forall j, f_j(x) \leq h_j^{\text{II}} \end{aligned} \quad (5)$$

此时, (4)由一个多目标问题转化为一个多约束单目标问题 (即在一系列安全约束下寻求最大效益的问题), 并且完全消除了目标函数中的分段特性。

B. 利用模型辨识对调度目标和约束函数进行局部凸近似

由于电力系统物理模型的强非线性, 构成前述调度目标的安全性指标、效益指标和约束函数中, 存在一些不好处理的非凸成分, 诸如网损、阻尼比等常见指标和发电机有功出力的关系均较为复杂, 为实时优化带来困难。为了解决这一问题, 应该辨识一个简单的凸模型来在局部代替复杂而非凸的真实模型。

这种方法的可行性建立在实时调度任务的特点上。在

(4-d)的约束下, 调度周期越小, 调度问题的可行域就越小, 可行解距离初始运行点的距离就越近。在实时调度的场景下, 调度周期极小, 可行解的取值范围极小, 近似模型只要能在这个极小的可行域内与真实模型相近, 即可用于调度方案的计算。过往研究和实践表明[33][34][35], 网损和阻尼比与发电机出力的关系在大部分情况下均可用线性模型进行较好的拟合, 其中线性模型的参数可以通过最小二乘法从高采样频率的 PMU 数据中辨识出来, 具体的处理方法将在 Section IV 的实例中阐述。

通过局部近似, (5)的可以进一步转化为一个单目标凸优化模型:

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \quad \sum_i w_i * \hat{c}_i(x), \\ & \text{subject to} \quad \sum_i x_i = \hat{P}_{loss}(x) + \sum_j P_{l,j}, \\ & \quad |x_0 - x| \leq dx_{max} \\ & \quad \forall i, \hat{s}_i(x) \leq h_i^I \\ & \quad \forall j, \hat{f}_j(x) \leq h_j^{II} \end{aligned} \quad (6)$$

其中带上标“^”的符号代表原变量的凸近似函数。显然, (6)可以使用常见的凸优化算法进行高速求解, 以确保调度任务的实时性。

在每个调度周期中, 调度系统都需要收集初始运行点附近的运行数据, 重新辨识(6)中的近似凸函数, 然后对求出(6)的最优解作为当前调度周期的有功输出。Section IV 将以一个具体的例子描述这个过程。

当前运行点偏离安全区域较远时, (6)可能没有可行解, 对这种情况的处理将在 part II 中集中探讨。

IV. APPLICATION

本节将以一个同时考虑动态稳定指标、N-1 条件下的静态稳定指标、经济指标和排放指标的实时调度问题为例, 展现前述方法的具体应用。

A. Problem Formulation

(写出所有调度目标对应的安全/效益指标的数学表达)

B. 用于局部近似的凸模型选择

(采用线性化近似处理所有非凸指标, 将问题转化为(6)的形式, 即为所用的近似模型)

C. 基于加权最小二乘法的模型参数辨识

(介绍使用加权最小二乘法估计灵敏度)

D. Case Study

(在 39 节点系统上做出算例, 给出对应的参数选择和仿真结果)

V. CONCLUSION

本文是一篇两部分论文, Part I 在理论上建立数据驱动的电力系统实时调度问题通用模型, 并且给出了适用于大多数调度场景的简化求解方法。首先, 将实时调度任务的目标根据紧急程度和数学表达进行三级划分, 并在特定假

设下将前两级目标转化为约束。使用数据驱动方法, 将通用模型中连续的、可以进行局部近似的非凸成分在线辨识为近似凸模型, 从而将调度任务转化为单目标凸优化问题加以快速求解。以一个考虑了多种非线性约束和目标的调度问题为例展示了前述方法的应用效果。

在 Part II 中将考虑不确定性带来的波动更大、以至于运行点无法在一个调度周期内恢复到安全区域的情形, 针对安全指标恢复到阈值内时会出现模型跃迁点的问题, 提出两种在权衡多个竞争目标的同时消去跃迁点的求解策略, 分别适用于考虑/不考虑安全指标优先级排序的场景。

VI. REFERENCES

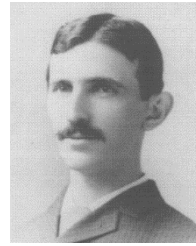
References are important to the reader; therefore, each citation must be complete and correct. There is no editorial check on references; therefore, an incomplete or wrong reference will be published unless caught by a reviewer or discussor and will detract from the authority and value of the paper. References should be readily available publications.

List only one reference per reference number. If a reference is available from two sources, each should be listed as a separate reference. Give all authors' names; do not use *et al.*

Samples of the correct formats for various types of references are given below.

- [1] E. Marris, "Energy: Upgrading the grid," *Nature*, vol. 454, pp. 570, July. 2008.
- [2] J. Zhu, *Optimization of Power System Operation*, 2nd ed., vol.30. New York: Wiley, 2009, p.85-140.
- [3] M.J. Sanjari, H.B. Gooi, and N. Nair, "Power Generation Forecast of Hybrid PV-Wind System," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, Early Access.
- [4] R. Zafar, A. Mahmood, S. Razzaq, W. Ali, U. Naeem, and K. Shehzad, "Prosumer based energy management and sharing in smart grid," *Renew. & Sustain. Energy Reviews*, vol. 82, pp. 1675-1684, Feb. 2018.
- [5] D. W. van der Meer, J. Widén and J. Munkhammar, "Review on probabilistic forecasting of photovoltaic power production and electricity consumption," *Renew. & Sustain. Energy Reviews*, vol. 81, pp. 1484-1512, Feb. 2018.
- [6] Y. Gu and L. Xie, "Stochastic look-ahead economic dispatch with variable generation resources," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, pp. 17-29, Feb. 2017.
- [7] L. Xi, W. C. Ka, S. Xia., B. Zhou, and X. Luo, "Security-Constrained Multi-Period Economic Dispatch with Renewable Energy Utilizing Distributionally Robust Optimization," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, to be published.
- [8] W. Wei, J. Wang, and S. Mei, "Convexification of the nash bargaining based environmental-economic dispatch," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 6, pp. 5208-5209, Nov. 2016.
- [9] J. Liu and J. Li, "Interactive Energy-Saving Dispatch Considering Generation and Demand Side Uncertainties: A Chinese Study," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 9, pp. 2943-2953, July 2018.
- [10] H. Ye, Q. Mou, K. Liu, and Y. Liu, "Modeling and Formulation of Delayed Cyber-Physical Power System for Small Signal Stability Analysis and Control," *IEEE Trans. Power Syst.*, to be published.
- [11] N. O'Connell, P. Pinson, H. Madsen, and M. O'Malley, "Economic dispatch of demand response balancing through asymmetric block offers," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 4, pp. 2999-3007 Jul. 2016.
- [12] M. R. Sandgani and S. Sirouspour, "Coordinated optimal dispatch of energy storage in a network of grid-connected microgrids," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 8, no. 3, pp. 1166-1176, Jul. 2017.

- [13] N. Nikmehr and S. Najafi Ravadanegh, "Optimal power dispatch of multimicrogrids at future smart distribution grids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 1648–1657, Jul. 2015.
- [14] B. Zhao, A. J. Conejo, and R. Sioshansi, "Unit commitment under gassupply uncertainty and gas-price variability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 3, pp. 2394–2405, May 2017.
- [15] Z. Yang, A. Bose, H. Zhong, N. Zhang, Q. Xia, and C. Kang, "Optimal reactive power dispatch with accurately modeled discrete control devices: A successive linear approximation approach," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 3, pp. 2435–2444, May 2017.
- [16] H. Ming, L. Xie, M. Campi, S. Garatti, and P. R. Kumar, "Scenario-based economic dispatch with uncertain demand response," *IEEE Trans. Smart Grid*, Nov. 29, 2017.
- [17] X. Lai, H. Zhong, Q. Xia, and C. Kang, "Decentralized intraday generation scheduling for multiarea power systems via dynamic multiplier-based Lagrangian relaxation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 1, pp. 454–463, Jan. 2017.
- [18] J. Li, Z. Xu, J. Zhao, and C. Wan, "A Coordinated Dispatch Model for Distribution Network Considering PV Ramp," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, pp. 1107–1109, Jan 2018.
- [19] Z. Zhang, J. Wang, T. Ding, and X. Wang, "A two-layer model for microgrid real-time dispatch based on energy storage system charging/discharging hidden costs," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 33–42, Jan. 2017.
- [20] J. Zhao, "Dynamic state estimation with model uncertainties using H^∞ extended Kalman filter," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 1, pp. 1099 – 1100, Jan. 2018.
- [21] Y. Zhang, S. Shen, and J. Mathieu, "Distributionally robust chance-constrained optimal power flow with uncertain renewables and uncertain reserves provided by loads," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 2, pp. 1378–1388, March. 2017.
- [22] H. Gangammanavar, S. Sen, and V. Zavala, "Stochastic optimization of sub-hourly economic dispatch with wind energy," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 2, pp. 949 - 959, March. 2016.
- [23] M. Li, S. Su, H. Wong, L. Li "How 2D semiconductors could extend Moore's law," *Nature*, vol. 567, pp. 169–170, March. 2019.
- [24] M. Abedini, M. Davarpanah, M. Sanaye-Pasand, S. M. Hashemi, and R. Iravani, "Generator out-of-step prediction based on faster-than-realtime analysis: Concepts and applications," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 4, pp. 4563–4573, Jul. 2018.
- [25] F. Bouffard and A. J. Ardakani, "Identification of umbrella constraints in DC-based security-constrained optimal power flow," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 3924–3934, Nov. 2013.
- [26] J. Qin, Y. Wan, X. Yu, F. Li, and C. Li, "Consensus-based distributed coordination between economic dispatch and demand response," *IEEE Trans. Smart Grid*, to be published.
- [27] J. Zhang, Z. Chen, C. He, Z. Jiang, and L. Guan, "Data-Driven Based Optimization for Power System Var-Voltage Sequential Control," *IEEE Trans. Ind. Inf.*, to be published.
- [28] Z. Guan, J. Li, L. Wu, Y. Zhang, J. Wu, and X. Du, "Achieving efficient and secure data acquisition for cloud-supported internet of things in smart grid," *IEEE Internet Things J.*, vol. 4, no. 6, pp. 1934–1944, Dec. 2017.
- [29] M. Shafi et al., "5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 35, no. 6, pp. 1201–1221, Jun. 2017.
- [30] J. Zhang, C. Y. Chung, C. Lu, K. Men, and L. Tu, "A Novel Adaptive Wide Area PSS Based on Output-Only Modal Analysis," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no.5, pp. 2633–2642, Sept. 2015.
- [31] J. Zhang, C. Y. Chung, and Y. Han, "A Novel Modal Decomposition Control and Its Application to PSS Design for Damping Interarea Oscillations in Power Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol.27, no.4, pp.2015–2025, Nov. 2013.
- [32] K. Deb, *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. New York: Wiley, 2001.
- [33] J. Zhang, L. Guan, and C. Y. Chung, "Instantaneous sensitivity identification in power systems— Challenges and technique roadmap," in *Proc. IEEE PES General Meeting*, 2016, pp. 1–6.
- [34] S. Deilami, A. S. Masoum, P. S. Moses, and A. S. Masoum Mohammad, "Real-time coordination of plug-in electric vehicle charging in smart grids to minimize power losses and improve voltage profile," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 2, no. 3, pp. 456–467, Sep. 2011.
- [35] J. Zhang, C. Y. Chung and Y. Han, "Online damping predication using locally weighted linear regression," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 3, pp. 1954–1962, May 2016.



Nikola Tesla (M'1888, F'17) was born in Smiljan in the Austro-Hungarian Empire, on July 9, 1856. He graduated from the Austrian Polytechnic School, Graz, and studied at the University of Prague.

His employment experience included the American Telephone Company, Budapest, the Edison Machine Works, Westinghouse Electric Company, and Nikola Tesla Laboratories. His special fields of interest included high frequency.

Tesla received honorary degrees from institutions of higher learning including Columbia University, Yale University, University of Belgrade, and the University of Zagreb. He received the Elliott Cresson Medal of the Franklin Institute and the Edison Medal of the IEEE. In 1956, the term "tesla" (T) was adopted as the unit of magnetic flux density in the MKSA system. In 1975, the Power Engineering Society established the Nikola Tesla Award in his honor. Tesla died on January 7, 1943.