

引 言

1.1 数字电力系统概念的回顾

首先来回顾数字电力系统概念。

在 2000 年,文献[1]给出了关于数字电力系统(digital power systems,DPS)的定义:“它是某一实际运行电力系统的物理结构、物理特性、技术性能、经济管理、环保指标、人员状况、科技活动等数字地、形象化地、实时地描述与再现。”现在看来本书作者在 10 年前所给出的数字电力系统的定义有重大缺失,它只强调了认识、了解和反映对象——物理电力系统的一面,忽略了另一方面,而且是更重要的一面,即改造和改善对象。一个完整的数字电力系统概念及其功能应包括两部分:一是实时获取需知的物理电力系统的一切数据,从构建的智能调度自动化系统(smart EMS,SEMS)中的先进状态估计单元获取“状态信息”,并以友好的形式将其提供给调度者和管理者;另一方面,SEMS 将获取的信息转化为调控命令和操作指令,并自动加以实施以改善物理电力系统运行和运营状态。

现在可以给数字电力系统一个更确切的定义了。首先将某一实际运行中的电力系统称为物理电力系统。数字电力系统是将某一个物理电力系统的物理结构、物理特性、运行状态、自然环境、经营管理、环保特性、人员状况、科技创新、知识产权、企业文化等数字地、实时地和形象化地描述与再现;并能以获取的该物理电力系统状态数据为信息源,自动生成科学的控制决策和建议并自动实施闭环调控,以达到多指标趋优运行以及科学决策和管理能力的显著提升的目的。具有这种特性与功能的系统称为某一物理电力系统的数字电力系统,以 DPS 记之。

文献[1]指出了数字电力系统应该包含以下内容与功能:

电力系统的物理结构、各组成部件(单元)及整体的物理性能、运行方式和运营策略、管理模式以及人员信息等;

电力系统的各个元件、各个环节、各节点的实时状态变量的测量及通信;

各种自动控制装置的设定值及其动作特性(包括继电保护装置);

发电厂、变电站主要设备的运行状态与“健康”状态;

经济结构、市场信息;

影响电力系统安全运行的特殊自然环境(如雷电、冻雨、飓风等)及其对电力系统安全运行影响的实时评估和预警;

科技管理层和科技人员有关信息;

环境保护指标和环保设备投入及运行状况的监测;

各火电厂每千瓦时耗煤量及 SO_x , NO_x 和可吸入颗粒物的排放量;

自动对物理电力系统实施闭环调控,使之达到多指标趋优化运行的目的。^①

可见,数字电力系统内容覆盖了发电集团和电网集团公司的所有业务,包括实时调度与控制、环境保护、企业管理、运行管理、营销管理、知识产权以及人事管理等。这里所赋予数字电力系统的任务相当广博,故趋优化的指标必然类广量多,要完全实现势必工程浩大,用时较长,故最好是分阶段实施。需求紧迫者先行,这样较为现实。故本书欲从电力系统的运行及实时调度需求出发,来界定“数字电力系统”狭义的或称初始阶段的功能与任务。我们把这个“数字电力系统 DPS”的初始的但具有最紧迫性阶段的系统,称为智能电力系统。

1.2 智能电力系统定义

1.2.1 智能电力系统与智能广域机器人

1.1 节的最后说道:我们把“数字电力系统 DPS”的初级的但具有最紧迫性的阶段的系统称为智能电力系统。这里说的“最紧迫性”既是针对国家也是针对电力系统自身发展的需求而言的。

现在是到了给智能电力系统(smart power systems, SPS)下一个明确定义的时候了。

定义 1.1 一个具有多指标自趋优运行能力的电力系统称为智能电力系统。

为何?请思量,把“智能”赋予一个电力系统,为的是使该系统运行得更好或者相反?回答当然是“更好”。不仅于此,我们还希望电力系统具有尽可能好的运行特性。这个“尽可能好”的愿望从数学角度看,或从常理上讲,它不是别的,就是一个“优化”问题。现在,一条无可争辩的逻辑宣告:“智能化”的问题本质上是个“优化”问题。

^① 本条为新加,未见文献[1]中。

再问,这个优化问题是单指标的还是多指标的?从需求出发,电力系统的优化指标至少需要包括三大类:安全、优质和低耗。可见,电力系统智能化问题是一个多指标优化问题。

那么,为何在“定义”中要强调**自趋优的运行能力**呢?一位军事指挥员,他所具有的智能只能通过他的临战指挥过程中的表现(即运行行为)和战果加以体现。同理,一个由人研制出的机电系统,其智能的高低只能通过其在执行预定任务中的表现(亦即运行行为)来加以评估。假如一架无人驾驶侦察机,在运行中,能自择最佳路径、以最低能耗、以最佳方式逃逸对方跟踪并最大限度地获取有用信息,就可称它为多指标最优的空中机器人(the smartest air robot, SAR)。

不难理解,由人类建造的电力系统,本无智能可言,但由于人赋予其智能调度自动化系统(smart marter energy management systems, SEMS)并装备了相应的执行机构后,若能在运行中自动地实现多指标趋优的目标,那么则应称其为智能电力系统。具有这种性能的电力系统从本质上讲就是一台智能机器人。但它不是一般形式上的机器人,而是人类所创建的最庞大的一种广域机器人。我们的意愿是要赋予这种机器人以“智能”,使之成为**智能广域机器人**(smart wide area robot, S-WAR)。

1.2.2 SEMS 与智能电力系统在中国

现已知 SEMS 是智能调度自动化系统的简称。令人欣喜的是,在国网公司的支持下,以东北电网公司为主创新主体建设的东北三省电力系统电压和无功智能自动调控系统工程已于 2010 年 2 月 14 日(春节)前完工;再者以上海电网公司为主体的产学研结合的团队于 2007 年 3 月研发并成功投运的上海电力公司第一期 SEMS 工程,已于 2007 年 11 月通过验收。2009 年初上海 SEMS 第二期业已开工。国内外一些电力专家也曾赴上海电力公司对此进行考查和调研。这样 SEMS 的名称也逐渐为人们所知晓。稍后,深圳 SEMS 亦建设投入运行。这里不妨通报,在国网公司的支持下,智能福建电网的建设定于 2010 年初启动。在南方电网公司和科技部新 863 项目的支持下,智能海南电力系统的建设将与福建项目偕行。中国是数字电力系统和智能电力系统理念的倡导者和工程实践的先行者。这应该是不争的事实吧。

SEMS 的“智能”主要体现在何处?主要体现在它是以电力混成控制论(hybrid control theory, HCT)为理论基础,以达到电力系统多指标自趋优运行为目的新型调度自动化系统。故其内容包括量测系统、通信系统、数据存储与校正系统、分析判断与决策指挥系统,以及指令执行机构及其以上诸子系统的科学组合。应指出,SEMS 的内容与水平在不断发展与提高,故后期建设的 SEMS 一定会比先期的更先进。而对于先期建成的 SEMS 而言,因其结构的高度模块化与标准化,新研发出的更先进且可靠的模块可即插即用、不断更新,从而使科技含量不断提升,做到与时偕行。

上面已说过,因 EMS 已为几乎所有电力工作者们所熟知,而智能(smart)一词又已为世人所争诵,故本书作者认为,在 EMS 前加一个“smarter”作修饰语以区别于

传统的 EMS 可能更易为电力工作者们所理解。正如本书作者曾把发电机非线性最优励磁控制器称为 NO-PSS 一样,那也是由于 PSS 也已为世界各国电力工作者们所熟悉的缘故。

至此,已将约 10 年前我国学者提出的数字电力系统以及继而近年来中国学者提出智能电力系统、智能调度控制中心以及 SEMS 等概念和术语加以界定和澄清,这对于让电力工作者们在进行学术交流时有共同语言是有益的。至于目前世上最流行的智能电网(smart grid)的概念及定义,将在本书后续章节中专门论述。

1.3 智能电力系统建设意义

智能电力系统代表现代大电力系统的发展方向,通过其建设,可有效提高电力系统运行的安全性、改善电能质量和降低能耗。

1.3.1 灾变防治能力根本性提高

“安全第一”是我国电力系统运行中公认的指导原则,保障电力系统安全运行是电力工作者的第一要务。从一般性的概念来说,电力系统灾变防治能力的提高需要从三个方面入手,即事前预防、事中控制和事后补救。

所谓事前预防,就是 SEMS 要对电力系统运行的安全状况进行在线实时评估,根据评估的结果,针对系统的薄弱环节给出相应的改善建议,并对可能出现的失稳状况向运行人员提出预警。研究表明,电力系统存在着一个运行的动态安全域 Ω_s ,如果能够将这个安全域的边界实时计算出来,并以直观的形式呈现在运行人员面前,就会对安全调度大有裨益。智能电力系统及其工程实施项目 SEMS 的建设中,可利用实时镜像仿真技术,实现动态安全域的在线分析和实时状态 $\mathbf{X}(t)$ 的可视化,使运行人员对于电力系统的运行状态有充分的了解;同时,在系统状态点迁移至离稳定边界较近的位置时,SEMS 可发出预警信号并自动进行运行方式的调整以避免状态的恶化。另一方面运行人员也可直接实施调控。显然,上述措施将有力地保证系统正常运行时的稳定裕度,从而提高系统抵御大扰动的能力。

事前预防机制虽然能够提高电力系统运行的稳定裕度,但是严重的事故还是有可能使电力系统进入紧急状态,这就是“事中”控制需要解决的问题。在这种情况下,SEMS 需要明确应该采取何种对策才能使系统稳定。理论分析、仿真计算和运行经验都表明,对于绝大多数故障,如果能及时地采用合理的紧急控制策略,可以将事故的影响限定在一个较小的范围内,从而避免电力系统发生灾变。一般来说,“事中”控制需要解决三个问题:第一是明确实情,第二是及时给出策略,第三是要明了该策略执行的效果。针对这三个问题,基于混成控制理论和技术的智能电力系统有三大“法宝”与之对应:第一是动态的、标准的、真状态信息共享平台,第二是基于在线实时和超实时仿真的智能决策单元,第三是将智能决策及时加以实施的执行环节。

针对一些无法预料的特大干扰和连锁故障,当一切紧急控制手段的实施都不能使电力系统镇定时,就面临着事后的补救,也就是合理自动解列策略的实施。为了实现自动解列技术,电力系统自动化调度系统应拥有先进的合理解列策略自生成功能,相关最新研究成果已见诸报道^[5],最后,为对付最极端的情况,从“有备无患”原则出发,还可以将最优黑启动预案纳入事后补救的框架内。

由此可见,智能电力系统可以在电力系统运行的各种情况下对电力系统提供有力的技术支撑,从而使电力系统灾变防治能力得到根本性提高。

1.3.2 经济运行指标和电能质量的显著改善

为达到电力系统的经济运行指标和电能质量兼优的目的,电力系统必须在满足安全稳定约束条件(包括暂态稳定约束条件)的基础上,制订相应的经济和电能质量兼优的调控策略并加以执行。该问题可以分为以下两个子问题。

(1) 评估电力系统的经济运行和电能质量水平

通过对电力系统运行状态的实时监测和分析,可及时准确地评估其整体经济效益和电能质量水平,给出电压水平,网络损耗和总体(包括电厂和电网,以及用户)效益等关键信息。基于这些信息可判断当前系统运行状态是否满足经济运行和电能质量指标,进而决定是否需要实施控制来改善系统运行状态。

(2) 找出物理电力系统的经济与电能质量兼优的运行点

传统的方法是采用单纯的经济调度方法来确定各个发电厂出力的基准值,其中并没有考虑动态安全约束和自动发电控制(automation generation control, AGC)的影响。其直接的后果是传统的 AGC 调节因其较少考虑发电厂的效率可能会降低系统经济运行水平,而新的经济运行点又可能不满足安全稳定和频率质量的约束条件。在智能电力系统中,经济调度和 AGC 将统一起来形成混成自动发电控制(hybrid AGC, HAGC),从而使得整个物理电力系统的性能得到综合趋优;同时,针对无功潮流和电压质量的趋优问题,智能电力系统中采用混成自动电压控制(hybrid automation voltage control, HAVC)以取代传统的 AVC,从而可以找到兼顾经济、安全和电能质量的优化运行点;更进一步地,正如我们所做的那样,智能电力系统还可以将 HAGC 和 HAVC 综合起来加以实施,实现无功和有功潮流的协同(united power flow, UPF)趋优调控,兼顾电能质量与经济运行。

智能电力系统可以由智能决策单元针对某种不满意状态产生多个可行的趋优化调控策略,同时利用后续章节中将阐述的控制测试单元对多种可行调控策略实施的效果进行预评估,若效果满足要求,则自动加以实施,或者将预估的结果提交给调度人员。应该指出,即使在高度发达的智能电网中,调度员仍然有最高的调度优先权。

智能电力系统的经济运行与电能质量兼优的调控策略将 AVC、AGC 和变电站的自动电能质量控制(automation quality control, AQC)、静止无功补偿(static var compensator, SVC)和静止无功补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)等

装置作为综合控制的资源和手段,不但可以使系统运行在更加经济的运行点上,而且可以保障系统运行方式的调整更加平稳,可显著提升电能质量和经济运行水平。

这里,相信读者已经看到,在讨论智能电力系统的多指标趋优化问题时,已经不可避免地涉及发电设备的调控问题。纯而又纯的智能电网并不存在,只有数字电力系统才是最终的归宿。在这个意义上,只提“厂网分开”是不十分科学的,应该改用“**厂网分营,统一规划,统一调度**”十二字方针。作者希望这十二字方针能成为电力工作者和各层决策者们的共识。

还需要强调指出的是,110 kV 及以下电压等级的电力系统实际上就是常说的配电网和供电网,故所谓**智能电网在我国实际上就是 110 kV 及以下电压等级的智能电力系统**。多指标趋优化运行的理念对它也是完全适用的,趋优化指标的分类与前述也是一致的,只是其具体内涵与调控对象与 220 kV 及以上电压等级的电力系统有着较大的区别。它更着重于地区和县级调度与用户的互动,以智能电表为实施手段将分时电价(每隔 1 小时发布当时以及 6 小时后的电价)作为调节“杠杆”,充分调动用户参与调节负荷特性曲线“峰谷差”的积极性。这是调整电力系统负荷特性曲线“峰谷差”这一大难题的最有效和最经济的手段。仅此一举就会收到巨大经济效益和社会效益。再者,智能电网(包括农网在内的配电网)当然不会涉及前面所说的大中型发电厂的 AGC 问题,但它将面对以小型分散的水电、风电、光电和分散的储能设备以及为数庞大的充、放电双向负荷如电动和混合动力车辆等组合而成的“微、小型电力系统”(即微网)的管理问题。关于智能电网的专题将在后续章节加以研讨。

1.4 国外研究现状

在我国提出数字电力系统的概念后,国外也展开了一些类似的研究,其中与智能电力系统关系较密切的研究包括电力和通信集成系统(integrated energy and communication system architecture,IECSA^[6])、电力系统无缝的通信架构、PJM 先进控制中心、IBM 智能公用网络 and 高级配电自动化系统等。下面进行简要介绍。

1.4.1 IECSA 项目

IECSA 项目是由美国电力研究院(EPRI)发起的,其主要内容是研究如何充分利用电力行业建设中可重用和共用的组件,它是用户交互通信架构(utility communication architecture,UCA)和 UCA2.0 的后续性研究。

按照 IECSA 项目组的提法,设计该架构的高层目标包括四个方面:

(1) 开发出一套完整的电力行业和有关企业的架构,该架构能够支持**电网**(主要是**配网**)“自愈”和集成化用户通信接口的实现。

(2) 将项目的工作成果提交给相关的行业标准组织和行业协会,以推动鲁棒而

开放的面向行业基础设施的标准的建立。

(3) 将系统工程的观念引入到架构开发过程中,并将它贯穿于系统需求的分析和综合架构的设计以及开发与评估的全过程,并采用标准化的行业符号来表示架构视图。

(4) 探索电力系统与其他民用领域共享基础设施和进行协作的可能性。

该项目的最终研究成果包括以下内容:

(1) 电力系统业务功能分析

IECSA 以电力行业主要业务功能(称为“用例”,USE CASE)的收集和整理作为构筑架构的要务。通过与电力行业业务专家的广泛沟通,项目组得到了超过 400 个用例和对这些核心业务功能的详细描述。

(2) IECSA 环境

IECSA 将环境定义为一组具有共性的电力系统对信息的需求。IECSA 所指的环境实际上是一种信息环境,它代表着用例实现过程中对系统架构提出的信息要求。针对配置、服务质量(quality of service, QoS)、安全和数据管理四大需求,IECSA 抽象出了 20 个基本通信环境,其中考虑了变电站、调度控制中心、客户、分布式电源管控中心和外部业务关联单位之间的通信需求。上述环境的抽象虽然有待完善,但是对于电力系统通信环境还是给出了一个比较全面的概括,初步建立了电力系统的信息交互模型。

(3) IECSA 独立于平台的模型,包括公用服务、公用信息模型和通用接口

这里模型和接口对于电力系统实现分布式处理和分布式系统之间的互操作非常重要。“服务”是指那些架构中的基本构件,公用服务是指那些业务进行中频繁使用到的功能的抽象,它们具有很高的可重用性。

该项目确定的目标看来诱人,可惜的是,它预期的工作成果只集中在具体的需求分析方面。它虽然给出了一些目标,对大部分目标却没有给出实现的途径。即便是给出的一些解决方案,也只是面向个别用例,没有从整体的角度给出一般性的策略。

1.4.2 电力系统无缝的通信架构

建立一个电力系统的无缝的数据通信架构来实现数据共享是国际电工委员会第 57 技术委员会(IEC TC57)的目标,其最主要的成果是制订出关于输电调度能量管理系统(EMS)的 IEC 61970(WG14)和关于变电站通信自动化的 IEC 61850 标准。其他的一些领域也在采用与上述两个标准类似的方法进行建模,如用于配电调度的 IEC 61968、用于分布式能源管理的 IEC 62350 和用于水电模型的 IEC 62349 标准等。这些标准都是针对过程控制和控制中心的高级应用中涉及的数据模型和数据交互而制订的。它们是智能电力系统的基础性通信标准,但由于这些标准只着重于描述数据模型的内容,未对模型的使用方式进行刻画,所以为了真正实现数据共享,还需要用户来进一步规范标准的应用方法。

1.4.3 PJM 先进控制中心

美国的 PJM(Pennsylvania-New Jersey-Maryland)控制区(位于美国东北部的一个区域电力系统)与输电网主权方共同成立了智能电网工作组,提出以先进控制中心^[7]为核心的智能电网战略,主要内容包括:构建备用数据和控制中心,原有和新建的两个控制中心分设在不同的地理位置上;采用面向服务的架构设计电力系统应用程序,使其成为可完成独立业务的服务组件;基于 IEC 61970 标准以构建可扩展的数据模型;应用程序亦具有可扩展性,以支持更大规模的模型;为运行、市场及电网规划建立公共的研究用模型库;支持历史和未来的网络模型。

该项目与本书所提出智能电力系统中的通信系统理念是一致的,如果建成将实现高效便捷的信息获取-传递-使用链。但它并没有涉及前面所说的更重要的功能,即智能化(多目标趋优)决策与决策的在线实时闭环实施。

1.4.4 IBM 智能公用网络

IBM 所提智能公用电网(intelligent utility network,IUN)^[8],实际上是一个传统电力系统如何向 smart grid 转变的解决方案,即首先利用传感器对发电、输电、配电和供电等关键设备的运行状况进行实时监控,其次将获得的数据通过网络系统进行收集、整合,最后通过对数据的分析、挖掘,达到对整个电力系统运行的优化管理。

IBM 认为智能电网是一个完整的信息架构和基础设施体系,可实现对电力客户、电力资产和电力运营的持续监视,利用随需而变的信息提高电网公司的管理水平、工作效率和服务水平,进而提升电网本身的可靠性。

IBM 智能电网的核心是随需而变,这也和 IBM 公司的企业理念一脉相承。具体来讲,IBM 认为智能电网包括数据采集、数据传输、信息集成、分析优化和信息展现五个部分。

(1) 数据采集

在数据采集方面,IBM 认为智能电网的数据来源要更为广泛。实时的数据来源主要有三类,即电网运行数据、设备状态数据和客户计量数据。其中设备状态数据可用于开展状态检修和状态评估,客户计量数据可用于加强对用户用电行为的监测,加强需求侧管理,为电网的规划提供数据支持。

(2) 数据传输

在数据传输方面,IBM 认为智能电网需要采集大量的设备状态数据和客户计量数据,这些数据相对实时性要求较低,但数据量大,采集点多且分散。此类数据不适合用电力系统已有的 SCADA 进行采集,需要采用基于 IP 的实时数据传输方式进行传输。

(3) 信息集成

信息集成是 IBM 比较擅长的领域,针对智能电网的需求,IBM 提出要建立企业信息总线(ESB),实现企业信息集成。将各应用系统的数据集成到统一的数据仓库,

数据模型应参照/遵循 IEC 61970/61850/61968 标准。

(4) 分析优化

分析优化是智能电网的核心。IBM 将智能电网的优化划分为四个层次,建立了分析层次结构,从而指导对数据的深度利用。

(5) 信息展现

信息展现是智能电网面向用户或电网人员的人机接口。该功能能够通过门户系统从多个数据源获取数据,用户可根据自身的需求对所需展现的信息进行定制,并配置需要展现的信息和表示方式,并实现计算结果的企业级分发。IBM 还给出了智能电网的关键业务应用系统和建设思路。智能电网中,高级分析和优化主要关注资产寿命、电网规划设计和电网运行三个方面。而要实现高级分析和优化,还需要自动计量管理、远程资产监视和控制、移动作业管理和基于 IP 的监控与数据采集(supervisory control and data acquisition, SCADA)等关键业务系统的支持。

1.4.5 高级配电自动化系统

高级配电自动化系统(advanced distribution automation, ADA)项目^[9]是 IECSA 项目中一个重要的用例,其目的是为了增强配供电系统对基层用户服务的可靠性、改善电能质量和提高电力系统的运行效率。它在配电系统过程控制中采用了准实时的数据准备、优化决策和与发电和输电协调的配电运行控制。ADA 的主要功能包括:数据采集,同时进行数据一致性检验和数据校正;配电模型的完整性检验;定周期的和事件驱动的调控系统建模和分析;预警和报警;安全稳定性分析;协调的电压和无功优化;故障定位、隔离和供电恢复;配电网线路重新配置;紧急控制策略的预先(离线)部署以及供电恢复策略的预案。

这些功能需要通过与不同系统或数据库的接口来实现,同时也涉及准实时的动态仿真、准实时的预测优化和实时操作。

实际上,ADA 可以看成是一个一体化的配电自动化的解决方案,它能够在准实时层面上实现一些高级的配电自动化功能,对配电运行方式进行改善。需要指出的是,ADA 虽提出了配电系统“自愈”的目标,但是并没有给出实现“自愈”一般性的方法,它只能针对少数可以预见的故障案例实现“自愈”。

1.5 小结

本章首先重温了本书作者在约 10 年前提出的数字电力系统(DPS)的概念和定义。然后指出当初的定义的不足,它缺少在知其状态后而善其状态的一面,从而明确了 DPS 应包含上述两大部分。

接着本章又讨论了“多指标”问题。一个完整数字电力系统(DPS)指标体系中包含多种类型,如电力系统运行、电力交易、营销策略、环境保护、企业管理、发展规划、

投资决策、创新研发、人才培养、人事组织以及企业文化等；其中每个类型又分若干具体指标。如此一来，数字电力系统职能的外延和内涵都将十分庞大。故宜按需求的迫切程度将其划分为阶段，循序加以实施。对我国国力发展和民生需求，电力系统迫切需要提高的是安全、高质和节能运行水平，这涉及物理电力系统的在线实时通信、调度与控制领域的一系列问题，需在最短期间妥善（三大类指标集成趋优）解决。这些问题的解决是我国智能电力系统建设的主要任务。从这个角度出发，也可以说智能电力系统是狭义的、有限目标的数字电力系统。

这样数字电力系统和智能电力系统概念的界限就变得清晰起来。为了登上智能电力系统所要求的多指标自趋优的高峰，需要首先搭建一系列阶梯，它们是：传感和通信系统；标准化数据建模；信息全局共享平台；动态 SCADA 系统；先进状态估计单元与真状态全局共享平台；调控策略自生成与自执行功能单元以及调控策略测试单元等。

1.3 节告诉读者的是，若智能电力系统的目标得以实现，其效益将是令人鼓舞的。

本章最后对国外的有关研究现况和动向作了简要介绍和评述。

第2章

电力混成控制论概要

2.1 引言

在常规的电力系统优化问题中,即使表面上考虑了若干优化指标,也总是尽量回避“多指标优化”这个问题,而是通过加权求和方法建立一个单指标优化模型,认为所求得单指标优化问题的解就是所要求取的最优解。即便如此,对于大电力系统,用上述方法在具有超高维微分代数方程组(DAEs)和不等式约束条件下,欲求得多项之和的单指标优化策略的解析解,对分析数学来说几乎是不可能的。欲解此问题必须建立新的理论和方法。

电力混成控制论是指导构建智能电力系统乃至今后指导构建数字电力系统的方法论和理论基础。

论及智能电力系统,细想,有没有一个电力系统比做到多指标自趋优运行更高的智能?答案是没有。多指标集合为 i 维,电力混成控制论对 i 的数目并无限制,只要是管理层和调度人员认为有需求的指标皆可列入。待形成多指标集合 I_{MUL} 后,混成控制系统可自生成调控策略,使多项指标达到自动趋优的效果。当然,这时电力系统状态就处于 i 维指标全面满足运行要求的状态。为达成此最高智能级的电力系统,必须要有一整套方法论为指导,一整套理论为基础,这就是电力混成控制论(hybrid control theory of power systems, HCTPS)。

2.2 若干基本概念

在本书后续章节中,经常会涉及控制论中一些最基本的概念。为了适应具有不同学科背景的读者的需要,在本小节中重温这些基本概念或

许并不完全是多余的。这些基本概念是:状态变量;状态向量;状态空间;状态点以及状态轨迹;状态子空间;状态向量场;空间的映射与变换。此外还有电力混成控制论中的某些新概念,如真状态向量场等。现分别给出上述概念要义。

1. 状态变量

当某一动力学系统的初始状态 $\mathbf{X}(t_0)$ 确定后,该系统在 $t > t_0$ 任何时刻的动态行为可以被一组最少的变量 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ 所确定。**确定系统动力学行为的最少的一组变量称为该系统的状态变量。**该定义决定了各状态变量之间一定是线性独立的,即一个状态变量 $x_i(t)$ 不可为其他状态变量线性表出。即若已确定 $x_i(t)$ 是一个状态变量,那么 $k_0 x_i(t)$ (k_0 为常数)就不可再作为状态变量,反之亦然。显然,若 $x_i(t)$ 是一个状态变量,则 $\frac{dx_i(t)}{dt} = \dot{x}_i(t)$ 也可是另一个状态变量。

2. 状态向量

若某一动力学系统的每一个状态变量 $x_i(t)$ 都是向量 $\mathbf{X}(t)$ 的一个分量,则 $\mathbf{X}(t)$ 称为该系统的状态向量,即已知

$$\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T \quad (2-1)$$

是动力学系统的状态向量,当且仅当 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ 皆为状态变量。

3. 状态空间

以状态向量 $\mathbf{X}$ 的各个分量 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为数轴所张成的 n 维实空间称为状态空间,约定以 $\mathbb{R}^n$ 表示该 n 维实空间。经常以 $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^n$ 表示。

正如地球上的任一物体在三维空间中的位置需由三个实数坐标 (x, y, z) 来确定一样,某一动力学系统任意时刻 t_0 的状态,是由状态空间中的一个特定的点来确定的。即在 n 维状态空间中 t_0 时刻的状态点需由 n 个坐标 $x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0$ 来确定。电力系统的状态空间 $\Omega(\mathbf{X})$ 记之。

4. 状态轨迹

既然状态空间中的每一个点(称状态点, state point, SP)对应着动力学系统的一个确定的状态 $\mathbf{X}_0$, 在 $t \rightarrow \infty$ 的过程中, SP 将随之运动, SP 随时间的运行将在状态空间 $\Omega(\mathbf{X})$ 中划出一条轨线,这就称为状态轨迹。在 $[t_0, t_0 + \Delta t]$ 时间段 SP 的状态轨迹,确切地展现出系统在该时间段内的动态行为(过渡过程)。

5. 状态空间与状态向量场

有 n 维函数向量

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

式(2-2)中 $\mathbf{F}(\mathbf{X})$ 的每一个分量都是状态变量 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的函数。我们已知, $\mathbb{R}^n$ 状态空间 $\Omega(\mathbf{X})$ 中的每一个确定的点 SP 对应着一个确定的状态 $\mathbf{X}^0$, 当然也就对应着一

个确定的向量

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}^0) = [f_1(\mathbf{X}^0), f_2(\mathbf{X}^0), \dots, f_n(\mathbf{X}^0)]^T$$

由此可知,状态空间中的每一个确定的 $\mathbf{X}^0$ 都对应着一个由 $\mathbf{F}(\mathbf{X})$ 关系所确定的向量 $\mathbf{F}(\mathbf{X}^0)$,故把 $\mathbf{F}(\mathbf{X}^0)$ 称为状态空间的一个向量场。我们来考查一个特殊的向量场,式(2-2)中的 $f_1 = x_1, f_2 = x_2, \dots, f_n = x_n$,则式(2-2)的向量场有以下形式:

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (2-3)$$

由式(2-3)可知,该特殊向量场就是系统的状态向量 $\mathbf{X}$ 。由上述状态空间定义可知,以向量每个分量为数轴所张成的空间即是 $\mathbb{R}^n$ 状态空间 $\Omega(\mathbf{X})$ 。故状态向量场实际上就等同于状态空间。当我们说“状态空间”时,我们指的是“状态向量场”,反之亦然。

6. 映射

一个 $\mathbb{R}^n$ 的 $\mathbf{Z}$ 空间中的点可以向 $\mathbf{Y}$ 空间映射(mapping),以符号 $\mathbf{Z} \rightarrow \mathbf{Y}$ 表示,读成 $\mathbf{Z}$ 空间向 $\mathbf{Y}$ 空间映射(space $\mathbf{Z}$ maps into $\mathbf{Y}$)。 $\mathbf{Z}$ 空间与 $\mathbf{Y}$ 空间可以是同维的,即

$$\mathbf{Z} \in \mathbb{R}^n, \quad \mathbf{Y} \in \mathbb{R}^n$$

也可是异维的,即

$$\mathbf{Z} \in \mathbb{R}^n, \quad \mathbf{Y} \in \mathbb{R}^r$$

一般来说 $r \leq n$ 。

请注意 $\mathbf{Z}$ 空间向 $\mathbf{Y}$ 空间的映射可以是 $\mathbf{Z}$ 空间中的一个定点对 $\mathbf{Y}$ 空间中的一个定点的映射,称“1 对 1 的映射”;也可是一个点对多个点的映射,称“1 对多的映射”。无论是何种映射,必须有一确定的映射关系。这种确定的“关系”既是一种“算法”,这种映射关系由代数学观之即作为一种“变换”。如 $\mathbf{Z}$ 空间向 $\mathbf{Y}$ 空间的映射可写成以下 z 变换的形式:

$$\mathbf{Y} = z(\mathbf{Z}) \quad (2-4)$$

此处 $z(\cdot)$ 即表示一种映射关系(算法)。

应指出,映射的一对空间可以是不同性质的空间。如 $\mathbf{Z}$ 空间可能是一个 n 维系统状态空间中的一部分 $\mathbf{Z} \in \mathbb{R}^n$,支撑该空间的每一个坐标轴都是一个状态变量轴 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$;而 $\mathbf{Y}$ 空间则可能是一个控制策略空间,其每一坐标轴代表着一则控制策略。

最后指出一点,映射有单向映射(又称不可逆映射)和双向映射两种。本书后续章节后讲的映射是单向映射。

7. 真状态向量和真状态向量场

在后续章节中要讲到的智能调度自动化系统中,动态 SCADA 系统由数据共享

平台取数,再将有关物理电力系统的状态数据递交给先进状态估计单元(advanced state estimation unit,ASEU)。由该单元输出的状态数据所显示的物理电力系统的状态向量称真状态向量,以 $\mathbf{X}_{TS}$ 记之。

2.3 状态空间的两分法则

电力混成控制论,以下简称混成控制论(HCT),要义之一便是将物理电力系统 t 时刻的状态空间 $\Omega(\mathbf{X}(t))$ 区分为相悖的两类:一类是足够满意的状态空间,以 $\Omega_S(\mathbf{X}(t))$ 表示;另一类是不满意的状态空间,以 $\Omega_{\bar{S}}(\mathbf{X}(t))$ 表示(参见图 2.1)^①。为了避免有任何不确定性,并提高电力系统运行的趋优化程度,把介于两者之间的,即把不足够满意的状态归类于不满意状态空间 $\Omega_{\bar{S}}(\mathbf{X}(t))$ 。那么, t 时刻的全状态空间 $\Omega(\mathbf{X}(t))$ 就等于该时刻足够满足的状态空间 $\Omega_S(\mathbf{X}(t))$ 与不满意状态空间 $\Omega_{\bar{S}}(\mathbf{X}(t))$ 的并空间,即有

$$\Omega(\mathbf{X}(t)) \equiv \Omega_S(\mathbf{X}(t)) \cup \Omega_{\bar{S}}(\mathbf{X}(t)) \quad (2-5)$$

由于式(2-5)是对于任何时刻 t 都是成立的,故在以后的叙述中经常简写成

$$\Omega(\mathbf{X}) \equiv \Omega_S(\mathbf{X}) \cup \Omega_{\bar{S}}(\mathbf{X})$$

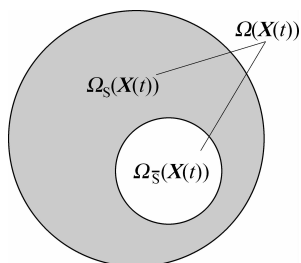


图 2.1 全状态空间 $\Omega(\mathbf{X})$ 为足够满意状态空间 $\Omega_S(\mathbf{X})$ 与不满意状态空间 $\Omega_{\bar{S}}(\mathbf{X})$ 的并空间示意图

为了鉴别 t 时刻电力系统的运行状态 $\mathbf{X}(t)$ 是否是满意的,就需将 $\mathbf{X}(t)$ 与所建立的标准指标系加以对比,有比较才能鉴别。关于标准运行指标体系的制定问题,将在第 5 章中加以讨论。以下让我们回到状态空间两分法问题上来。

定义 2.1 有 n 维状态空间 $\Omega(\mathbf{X})$,

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \subset \Omega(\mathbf{X})$$

为状态向量。若该向量的全部状态变量 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 无一是不满意的,则称该状态空间为足够满意的状态空间 $\Omega_S(\mathbf{X})$;且该空间中任意一点 $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 所对应的状态 $\mathbf{X}$ 为足够满意的状态,以 $\mathbf{X}_S$ 记之。

^① 此处, Ω 的下标“S”意为 satisfactory;下标“ $\bar{S}$ ”意为 unsatisfactory。

定义 2.2 有 n 维状态空间 $\Omega(\mathbf{X})$,

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \subset \Omega(\mathbf{X})$$

为状态向量。若该向量的 n 个状态变量 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 中皆至少有一个为不满意的状态变量,则称该状态空间为不满意状态空间 $\Omega_s(\mathbf{X})$;且该空间中任意一点 $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 所对应的状态为不满意状态,以 $\mathbf{X}_s$ 记之。

定义 2.3 不满意状态空间 $\Omega_s(\mathbf{X})$ 称为事件空间,以 $E(\mathbf{X})$ 记之,即

$$\Omega_s(\mathbf{X}) \stackrel{\text{def}}{=} E(\mathbf{X}) \quad (2-6)$$

由于事件空间是智能调度自动化系统中的一个极重要的概念,有必要专门对它下一个精确的定义。

定义 2.4 物理电力系统在 t 时刻的一个状态子空间被视为事件空间,如果且仅仅如果该空间中任意一点 P 的坐标 $(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$ 中至少有一个坐标 $x_i(t) (i \leq n)$ 为不满意的状态变量,即 $x_i(t) = x_{is}$ 。 t 时刻的事件空间以 $E(t)$ 记之。

将式(2-6)代入式(2-5),可得

$$\Omega(\mathbf{X}(t)) = \Omega_s(\mathbf{X}(t)) \cup E(\mathbf{X}(t)) \quad (2-7)$$

由式(2-7)得知,一个物理电力系统在 t 时刻的全状态空间 $\Omega(\mathbf{X})$ 等于足够满意的状态空间 $\Omega_s(\mathbf{X})$ 与事件空间 $E(\mathbf{X})$ 的并空间。此即为状态空间的两分法则。

2.4 趋优状态空间

本书作者一贯认为,在研讨电力系统优化运行问题时,处于第一线的管理者和专家们的意见是值得特别重视的。多数管理专家和运行调度专家根据实际需求对自己所管辖和调度的对象(某物理电力系统)不约而同地、优先地提出三类指标: I_I 安全稳定指标、 I_{II} 电能质量指标和 I_{III} 经济运行指标,即多指标集合为

$$I_{\text{MUL}} = \{I_I, I_{II}, I_{III}\} \quad (2-8)$$

这里需要说明的是,智能电力系统的概念已被界定为初始阶段的数字电力系统,只考虑有限目标。本书所讨论的指标仅限以上三类。显然,这三类指标对电力系统运行是具有决定性意义的。

定义 2.3 已将不满意状态空间 $\Omega_s(\mathbf{X})$ 定为事件空间 $E(\mathbf{X})$ 。现在对事件空间作较细致深入的考查。由上述已知,事件分为三大类。与此相对应,事件空间亦分为三类,它们分别是 $E_I(\mathbf{X})$ 、 $E_{II}(\mathbf{X})$ 和 $E_{III}(\mathbf{X})$ 。这三类事件空间的包即构成全事件空间 $E(\mathbf{X})$ (参见图 2.2),即有

$$E(\mathbf{X}) = E_I(\mathbf{X}) \cup E_{II}(\mathbf{X}) \cup E_{III}(\mathbf{X}) \quad (2-9)$$

每一类事件空间(为书写简单起见,以第 I 类事件空间 $E_I(\mathbf{X})$ 为例),其中每一个确定的点 P 都有一个

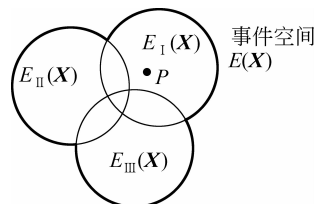


图 2.2 三类事件空间的包即成全事件空间 $E(\mathbf{X})$

确定的 r 维的事件函数向量与之对应,此意可表示为:

$$E_I(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} e_{I_1} = e_{I_1}(\mathbf{X}) \\ e_{I_2} = e_{I_2}(\mathbf{X}) \\ \vdots \\ e_{I_i} = e_{I_i}(\mathbf{X}) \\ \vdots \\ e_{I_r} = e_{I_r}(\mathbf{X}) \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

这里应该指出,既然由式(2-10)得知每一则事件 e_{xi} 都是状态 $\mathbf{X}(t)$ 的函数,那么为了正确判断某时刻 t 电力系统是否发生事件以及是何种事件,首先就要获取该时刻电力系统的尽可能精确的状态向量

$$\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$$

为此需要对布设在物理电力系统各点的传感器及其信息通道作必要的经常地维护测试;更重要的是需要对传统的状态估计技术作根本性的革新,以先进的状态估计(advanced state estimation, ASE)取代传统的状态估计技术。关于 ASE 技术将在第 6 章中作较详细的阐述。

在式(2-10)中, $e_{I_i} (i=1, 2, \dots, r)$ 表示第 I 安全稳定类事件,如低频振荡预警事件、电压稳定性事件等等。 $e_{I_i} (i=1, 2, \dots, r)$ 是状态向量 $\mathbf{X}=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 的函数,故本质上第 I 类事件空间 $E_I(\mathbf{X})$ 可用一个由 r 个函数组成的向量——向量场来描述。第 II 类、第 III 类事件空间 $E_{II}(\mathbf{X})$ 、 $E_{III}(\mathbf{X})$ 亦如是。

现在我们已经对事件空间的物理和数学本质有所了解,以下应该给出趋优状态空间的严格定义。

由(2-7)式我们确知,只要在 t 时刻使得事件空间 $E(\mathbf{X}(t))$ 成为零空间(null space),则该时刻电力系统的全状态空间 $\Omega(\mathbf{X}(t))$ 全等于“足够满意”的状态空间 $\Omega_s(\mathbf{X}(t))$,即有

$$\Omega(\mathbf{X}(t)) = \Omega_s(\mathbf{X}(t)), \quad E(\mathbf{X}(t)) = 0 \quad (2-11)$$

由式(2-9)可知,只有在 III 类指标 $I_{MUL} = \{I_I, I_{II}, I_{III}\}$ 同时全部为零的条件下,才可能实现 $E(\mathbf{X})=0$ 。而此时,由式(2-11)可知,电力系统的全状态空间即等于足够满意的状态空间 $\Omega_s(\mathbf{X})$,故将满足 $E(\mathbf{X})=0$ 条件的状态空间定义为多指标趋优状态空间就是合乎逻辑的了。

定义 2.5 满足事件空间 $E(\mathbf{X})=\emptyset$ 条件的物理电力系统的状态空间 $\Omega(\mathbf{X})$ 为多指标趋优状态空间,简称趋优状态空间,以 $\Omega_{AO}(\mathbf{X})$ ^① 记之,即有

$$\Omega(\mathbf{X}) \stackrel{\text{def}}{=} \Omega_{AO}(\mathbf{X}) \quad \text{iff}^{\text{②}} \quad E(\mathbf{X}) = \emptyset \quad (2-12)$$

① 趋优状态空间记号的下标 AO 表示 approaching optimization 之意。

② if and only if.

以下让我们集中思考如何使用 E 空间成为零空间的问题。

2.5 $\mathcal{E}$ 变换与 $\mathcal{C}$ 变换

某类事件空间 $E_Z (Z = \text{I}, \text{II}, \text{III})$ 在电力系统运行中一旦出现,立即由智能调度自动化系统(SEMS)的分析与判断单元(参见图 2.4)根据从先进状态估计单元的输出获取的 t 时刻的真状态向量

$$\mathbf{X}_{\text{TS}}(t) = [x_{\text{TS1}}, x_{\text{TS2}}, \dots, x_{\text{TSn}}(t)]^T \in \Omega(\mathbf{X})$$

并与所建立的电力系统运行标准指标体系逐类逐条进行比对,以确定在 t 时刻是否有以及有何类、何子类及何种事件发生。一旦发现某类某种事件 $e_{Zi} (Z = \text{I}, \text{II}, \text{III}; i=1, 2, \dots, r)$ 发生,则依据所建立的物理电力系统的 DAE(微分代数方程)模型和正确有效的算法将其变换为对应的控制命令(control command) C_{Zi} ,此为 $\mathcal{E}$ 变换。 $\mathcal{E}$ 变换(为书写简化起见,仍以第 I 类事件空间 $E_I(\mathbf{X})$ 为例)表示为

$$C_I(t + \Delta t) = \mathcal{E}(E_I(\mathbf{X}(t))), \quad \text{若 } E_I(\mathbf{X}(t)) = 0, \text{ 则 } C_I = \emptyset \quad (2-13)$$

在工程实现中,由 t 时刻的状态向量 $\mathbf{X}(t) \in E_I(\mathbf{X}(t))$ 变换为相对应的控制命令需要一定分析与判断的时间,该时间段在式(2-13)中以 Δt 表示。现在清华大学有关团队已经可使 $\Delta t < 0.8 \text{ s}$ 。

以下让我们结合电力系统的实际来考查 C_I 的性质。

由式(2-10)可知, $E_I(\mathbf{X})$ 本质上是一个 r 维的向量场,其中任意分量函数,譬如 $e_{I_i}(\mathbf{X})$ 可能对应不只一条控制命令。例如 SEMS 分析单元判断 $e_{I_i}(\mathbf{X}(t))$ 为“低频振荡预警”事件,为了取得好的效果,控制决策单元有可能同时发出以下控制命令:首先,调节发端系统 AGC(以适当降低输送功率);其次,调节受端系统 AVC(以改善受端系统电压质量)。由此可知,即使是一则事件,也可能引发不只一条控制命令,更不用说遇到式(2-10)中的 $e_{I_1}, e_{I_2}, \dots, e_{I_r}$ 项事件同时或相继发生的情况了。故一般地说,式(2-13)中的 C_I 是一个命令集合。现仍以第 I 类事件为例,有

$$C_I = \{C_{I_1}, C_{I_2}, \dots, C_{I_r}\} \quad (2-14)$$

从理论上我们很难排除这种可能,即 I、II、III 类事件同时或相继发生,那么这个控制命令 $C_Z(\mathbf{X}) (Z = \text{I}, \text{II}, \text{III})$ 则为不同事件对应命令集合的并集,即

$$C_Z = \{C_{I_1}, C_{I_2}, \dots, C_{I_r}\} \cup \{C_{\text{II}_1}, C_{\text{II}_2}, \dots, C_{\text{II}_m}\} \cup \{C_{\text{III}_1}, C_{\text{III}_2}, \dots, C_{\text{III}_s}\} \quad (2-15)$$

此处,为不失一般性,应认为 $r \neq m \neq s$ 。

式(2-13)所示的 $\mathcal{E}$ 变换是混成控制中的第一级变换,所得出的 C_Z 具有原则性的特征。就是说它仅指示应该完成何种任务,并不指出完成该任务的具体方案、操作科目和具体的调节量。例如 SEMS 控制决策单元发令:“将某大型水电站的出力降低 10 万千瓦”。但未具体指出该电站的每台机组的调节量或者是应该停运某台机组以完成上述命令。故往往需有第二级变换。

对于每一则控制命令(仍以第 I 类事件为例) C_{I_i} ($i=1,2,\dots,r$),皆可由 SEMS 中的混成控制系统的有关功能单元或发电厂及变电站的分散自律控制器根据已获取的真状态 $\mathbf{X}_{TS}(t)$ 信息和合理有效的算法将其变换为对应的操作指令(operating order) O_{I_i} ,亦称为“一组作业”。此为 $\mathcal{C}$ 变换,即有

$$O_{I_i} = \mathcal{C}(C_{I_i}) \quad \text{若 } C_{I_i} = \emptyset, \text{ 则 } O_{I_i} = \emptyset \quad (2-16)$$

其中

$$O_{I_i} = \{O_{I_{i1}}, O_{I_{i2}}, \dots, O_{I_{ij}}\} \quad (2-17)$$

这里需要着重指出的是, O_{I_i} 是以消除 E_{I_i} 为其直接目的的,此意可用下式表达:

$$A(O_{I_i}) \rightarrow E_{I_i} = \emptyset \quad (2-18)$$

式(2-8)读作:对应于 C_{I_i} 的一组作业 O_{I_i} 作用(action)的结果是使得第 I 类第 i 条事件集 e_{I_i} 消失(为零)。

2.6 二级变换的几何解释

对 $\mathcal{E}$ 变换和 $\mathcal{C}$ 变换,从几何学的观念来理解可能更为形象和直观。从几何学的观点来看,上述的 $\mathcal{E}$ 变换和 $\mathcal{C}$ 变换只不过是一类空间向另一类空间的映射(mapping)。图 2.3 表示了这种映射关系。

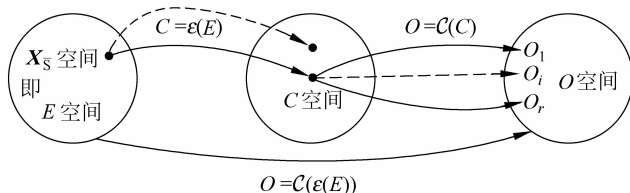


图 2.3 E 空间对 C 空间和 O 空间的映射关系概念图

在图 2.3 中, $C=\mathcal{E}(E)$ 表示从事件空间 $E(\mathbf{X})$ 向控制命令 $\mathbf{C}$ 空间的一对一或一对多的映射, $\mathcal{E}$ 表示映射规律; $O=\mathcal{C}(C)$ 则表示由 $\mathbf{C}$ 空间向操作指令 $\mathbf{O}$ 空间一对多的映射, $\mathcal{C}$ 表示映射规律。图 2.3 中的 $O=\mathcal{C}(\mathcal{E}(E))$ 则表示从 E 空间到 O 空间的复合映射。这就是 2.5 节所讨论变换的几何解释。

2.7 事件启动控制,控制消除事件

值得一提的是,本节的标题实质上透射出的一种哲理,这种哲理不仅适用于电力系统,它可以运用到多种控制系统中去,特别是用于解决那些高维非线性工程控制系统的多指标优化问题。

定义 2.4 指明,为了使电力系统 t 时刻的运行状态达到多指标趋优的目的,只需要且必须要清除事件集合 E ,即使得该时刻 $E=\{E_I, E_{II}, E_{III}\}$ 为空集。由另一面观

之,若物理电力系统在 t 时刻未出现任何事件,则该系统的状态空间等价于多指标趋优状态空间,即此时有 $\Omega(\mathbf{X}(t)) \equiv \Omega_{AO}(\mathbf{X}(t))$,则无须启动 SEMS 中的混成控制,或言在此条件下,由式(2-8)可知,第一级的 $\mathcal{E}$ 变换为空变换,即

$$e_Z = \emptyset, \quad \text{故 } C_Z = \emptyset \quad Z = \text{I, II, III} \quad (2-19)$$

再由式(2-11)可知,在此条件下,混成控制系统的第二级变换 $\mathcal{C}$ 变换亦为空变换,即

$$C_{Zi} = \emptyset, \quad \text{故 } O_{Zi} = \emptyset \quad Z = \text{I, II, III} \quad (2-20)$$

上述情况下物理电力系统的运行仍由调度人员和常规调度自动化系统(traditional EMS, TEMS)监控。

一旦 SEMS 中的混成控制系统(HCS)由所构建的数据共享平台以及由先进状态估计单元的输出得到真状态向量 $\mathbf{X}_{TS}(t) = [x_{TS1}^{(t)}, x_{TS2}^{(t)}, \dots, x_{TSn}^{(t)}]^T \subset \Omega(x)$,并以此为依据进行分析和判别,确认物理电力系统在 t 时刻发生了事件集合 E_Z ,则 HCS 及时进行 $\mathcal{E}$ 变换, $C_Z = \mathcal{E}(E_Z)$,产生一组恰当的 C_Z 以应对 E_Z 。紧接着 SEMS 中的 HCS 会做出二级变换—— $\mathcal{C}$ 变换, $O_Z = \mathcal{C}(C_Z)$,从而产生一组作业 $O_Z = \{O_{Z1}, O_{Z2}, \dots, O_{Zn}\}$,以便在足够短的时间段 Δt 内,使事件集合 E_Z 消失(E_Z 成为空集)。此时物理电力系统又重新恢复至无事件状态,这样 SEMS 中的 HCS 便完成了一次调控作业(无须调度人员干预)。如此往复。

综上所述,有以下结论:

(1) 事件驱动是混成控制方法论的精髓,只有事件才是启动混成控制系统的“按钮”。

(2) SEMS 中的混成控制系统(HCS)一旦被启动,只有当事件集合成为空集后才会停止。

可用一句话来结束此节:以事件启动控制,以控制消除事件。

2.8 时间基与事件基

时间基(time base)是控制理论最早也是最常用的一种基本机制。就电力系统控制而言,国外有些学者提出的所谓二级电压控制^[10, 11](之后又有人提出三级电压控制^[12]),就是典型的时间基控制方式。文献[10-12]的作者们正确地发现:若各台发电机组只根据自身机端电压 V_{ter} 以“自扫门前雪”的方式调整电压,是不能满足系统的要求的,于是便提出在受控电力系统中根据某些原则挑选出一些“导引节点”(pilot buses)的电压作为重点监测和调控对象。这就是多级电压控制的中心思想。最初他们把出调一次的时间间隔 $\Delta T = T_2 - T_1$ 定为 10~15 min,后缩短至 5~10 min 或更短。这种时间基的控制存在两大问题:首先,每当按规定时间出调时,往往多个导引节点电压符合标准而无须调控,从而发生多余调控,使之陷入盲目性;另一方面,当发生需要调控情况时,又因正值调控机处于设置的前后两次出调时间 T_i

与 T_{i+1} 之间的休停期而不能出调。上述问题绝非单纯靠缩短间隔时段所能解决的, 因为从控制方法论的观点来看, 该弊端是带有原则性的。

如前所述可知, 混成控制论(HCT)的方法, 抛弃了这种时间基的控制思维, 而采用事件基(event base), 即若受控物理电力系统无事件($E_Z = \emptyset, Z = \text{I}, \text{II}, \text{III}$), 则由上节所述可知, 作为一级变换的 $\mathcal{E}$ 变换为空变换, 即 $C_Z = \{C_I, C_{II}, C_{III}\} = \emptyset$; 随之作为二级变换的 $\mathcal{C}$ 变换亦为空变换, 即 $O_Z = \{O_{Z1}, O_{Z2}, \dots, O_{Zw}\} = \emptyset$ 。

这就是说, 受控物理电力系统中, 若无事件, 则混成控制系统(HCS)不进行任何“作业”; 反之, 若一旦有事件发生 $E_Z \neq \emptyset$, 则 HCS 必及时进行一组作业 O_Z , 以消除事件 E_Z , 使事件集合重新成为空集。此时物理电力系统回归至无事件状态, 即回归至多目标趋优运行状态。如此往复, 使电力系统永远保持在多指标趋优运行状态, 即使得 $\mathbf{X}(t) = \mathbf{X}_{AO} \subset \Omega_{AO}(\mathbf{X}), t = [0, \infty)$ 。

以事件启动控制, 这是事件基的主要特征, 所启动的控制作用 C_Z 和 O_Z 之目的只有一个, 那就是要清除事件。所以从这个意义上来看, 事件基又可叫做目的基(target base)。

2.9 电力混成控制系统——智能电力调度自动化系统结构

2.9.1 电力混成控制系统的数源和数据源和数学模型

混成控制系统(HCS)结构概念图如图 2.4 所示。从学术观点来看, 它是一个混成控制系统 HCS 的结构概念图。从工程实用角度来看, 它就是一个智能调度自动化系统(SEMS)的概念图。由图 2.4 可见, HCS 由物理电力系统中所广布的远程终端单元(remote terminal units, RTUs)向构建的数据共享平台提供数据; 此处应特别指出的是, 近年来基于全球定位系统(global positioning system, GPS)的相量量测单元(phasor measurement unit, PMU)装置在我国电力系统中正在快速推广使用, PMUs 快速提供的数据断面 $D(T)$ 也成为数据共享平台的另一数据来源。

现在就让我们从数据源(RTU 和 PMU)出发, 沿着图 2.4 所示的闭环路径走一圈, 并在“游览”过程中回顾 1.2.2 节。

图 2.4 所示的最高决策与指挥层以及第二级的处理与操作层皆从数据平台获取所需数据, 由新创建的先进状态估计平台获取真状态 $\mathbf{X}_{TS} \subset \Omega(\mathbf{X})$, 再分别由决策与指挥层(第一级)和处理与操作层(第二级)分别进行 $\mathcal{E}$ 变换和 $\mathcal{C}$ 变换。

由图 2.4 可见, 底层的受控物理电力系统是由微分代数方程组(DAE)加以精确描述的, 根据法国数学家庞加莱提出的“奇异摄动”理论, 代数方程 $\mathbf{0} = \phi(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ 可以写成 $\epsilon \dot{\mathbf{x}} = \phi(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ (其中 ϵ 为足够小的正数)的形式, 这样电力系统的行为可以为一组高维非线性常微分方程组(DE)所精确描述, 即

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{X}(t), \mathbf{Y}(t), \mathbf{U}(t)) \\ \epsilon \dot{\mathbf{X}}(t) = \phi(\mathbf{X}(t), \mathbf{Y}(t), \mathbf{U}(t)) \end{cases} \quad (2-21)$$