

数字电力系统(DPS)

卢 强

(清华大学电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 提出了数字电力系统(DPS)的概念,并对其主要功能、所需进行的基础研究工作以及如何实现等问题进行了阐述。数字电力系统有助于实现电力系统的科学化管理和决策以及系统状态实时评估,改善系统的安全稳定性,制定和实施经济运行策略,对电力系统实施紧急控制和反事故控制等。最后还专门论述了建立数字电力系统所需的硬件支持问题。

关键词: 数字电力系统; 安全稳定性; 经济运行; 实时仿真

中图分类号: TM 73

1 数字电力系统的定义与内涵

数字电力系统(digital power systems,缩写为DPS)的定义是:某一实际运行的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、科教活动等数字地、形象化地、实时地描述与再现。如果做到了这一点,就可以说我们建立了该实际电力系统的数字电力系统。某个电力系统的数字电力系统可能包含以下内容与功能:

- a. 电力系统的物理结构(也即真实结构),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、人员信息等。
- b. 电力系统的各元件、各网络、各节点的实时状态变量(state variables)。
- c. 各种自动控制装置的动作特性(包括继电保护装置、FACTS 设备、电力电子装置、可控超导储能装置等)。
- d. 发电厂、变电站等主要设备的“健康”状态。
- e. 经济结构、市场信息。
- f. 影响电力系统安全的特殊自然环境,比如某一条超高压线路正处于落雷区或者台风袭击中,可能造成灾害。数字电力系统应能及时提示运行人员给予特别关注,以免发生重大灾难。
- g. 科技管理阶层、技术人员管理信息。
- h. 环保指标和环保设备投入及运行情况。
- i. 电力系统的各个环节的实时效率,即热力系统、汽轮机、发电机系统、网络损耗、变电站用户等环节的效率。
- j. 重要的信息,比如人才的信息、科教活动的信息。

2 数字电力系统的功能

2.1 管理和决策的科学化

DPS 可帮助电力系统实现管理和决策的科学化。有了 DPS,即可知晓管理层下达的指令在实际电力系统中产生的效果,这就是“指令效果反馈”,据此管理层可以进一步改进管理和决策。此外,电力系统是分层的,每一层要向上一级管理层通报信息,有了 DPS,就能很快地把这些信息及时收集起来,加以科学处理,向上一级通报。最终目的是实现全系统的高效管理,这就是 DPS 所含有的高级 MIS 功能。

2.2 安全稳定性实时评估与改善

对于电力系统,最重要的是运行的安全性。这个问题在全世界均未得到很好解决。我国电力系统也出现过稳定破坏的重大事故。美国曾发生过六七次大范围灾难性稳定破坏导致的停电事故。这告诫我们要更加关注电力系统的安全与稳定问题。

首先要实时地对系统进行安全评估。在系统正常运行时,应该给出“忧患预告”,实时告知系统薄弱环节,以引起特别注意。系统的实时稳定域的变化和状态点所处位置应予以实时显现。实际上,电力系统有一个稳定域,这个稳定域随运行情况的变化而改变。有了 DPS,可图形化地显示稳定域的实时变化和状态点在稳定域中的运动轨迹;同时,还可给出改善安全稳定性的建议和策略。因此,我们可以不断地对电力系统的安全稳定性进行再评估、再调整,以达到最佳的安全运行状态。

2.3 经济运行策略制定和实行

在日常运行中,DPS 可给出在满足安全稳定约束条件和市场化运行规则指导下的全系统的经济运行策略(这里讲的经济运行不是“自私”的经济运行,它必须受到环保指标的制约)。就是说,在正常运行

时, DPS 将对系统经济指标做出实时报告, 即不断地给出实时系统整体经济效率、网络损耗和热效率等信息, 并且给出减少损耗、提高效率的建议和方案。

2.4 紧急控制的实施

众所周知, 电力系统发生故障后, 可通过紧急控制来保持安全运行。DPS 可告知运行人员故障发生的地点、故障种类, 如果是单相短路, 重合闸是否成功等信息。故障后, 电力系统将进入暂态过程, 暂态过程中的重要发电机组的摇摆曲线应能由 DPS 加以显示, 并给出采取何种紧急控制的建议。在最紧急的情况下, DPS 亦可越过调度人员直接施行控制, 称为“越权紧急控制”。但 DPS 的这种越权要有严格规定, 只有在最必要情况下才能实行。经过在 DPS 建议下的调度人员或 DPS 的直接紧急控制, 最后使电力系统状态重新回到安全稳定域内。

2.5 最适解列方案的实施

对于一个电力系统, 无论采取多么好的控制, 如果发现一定程度的干扰, 电力系统的稳定将会遭到破坏。这时, DPS 将给出最佳的解列方案, 把一个大系统分解成几个独立的“孤岛”。解列后的系统, 每一个“孤岛”上的电源和负荷应该是基本平衡的。不能像美国 1996 年的事故那样, 有的“孤岛”主要是电源, 有的“孤岛”主要是负荷, 这将扩大事故。

2.6 快速恢复策略的制定

系统解列以后, DPS 将给出最佳的恢复策略, 并以流程图的形式给出恢复操作程序。

2.7 科学研究和系统规划设计

DPS 在电力系统科学研究和系统规划设计中将发挥重要作用。譬如对于正在规划设计中的三峡电力系统, 要做一系列的研究工作。我们曾经在俄罗斯一个有 70 多台模拟发电机组的物理模拟电力系统中进行三峡系统的研究工作。事实上, 有了 DPS, 就可以对现实和未来的系统进行更深入细致的研究。

图 1 给出了数字电力系统(DPS)的图像化的框架。在图的右边是一个运行中的电力系统, 图的左边是一个 DPS。DPS 通过实时数据通信, 软跟踪这个实时的电力系统。DPS 在正常运行时给出建议, 通过调度人员进行闭环控制; 在最紧急的情况下, 将不通过调度人员进行闭环控制, 然后再“通知”调度人员: 刚才进行了什么操作, 产生了什么效果等。如果没有 DPS(现在的系统就是这样), 调度管理人员在运行中是相当盲目的。发生突然故障后, 他们不知道电力系统中发生了什么问题, 产生什么后果, 稳定域

如何变化, 状态点在稳定域的什么位置, 总之是茫然不知所措, 甚至可能进行误操作, 1996 年、1997 年美国西部电力系统发生事故后的情况就是如此。如果有 DPS 的帮助, 电力系统运行的安全性和稳定性将得到极大的提高。

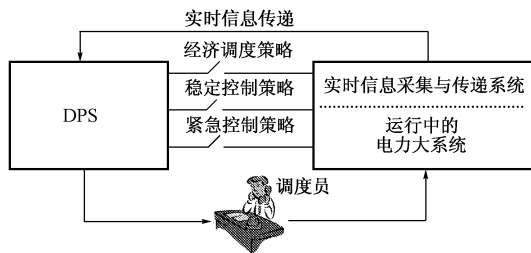


图 1 数字电力系统
Fig. 1 Digital power systems

图 2 表示出一个电力系统某一时刻的稳定域。调度运行人员在调度中心依靠 DPS 能够实时地看到立体的稳定域。

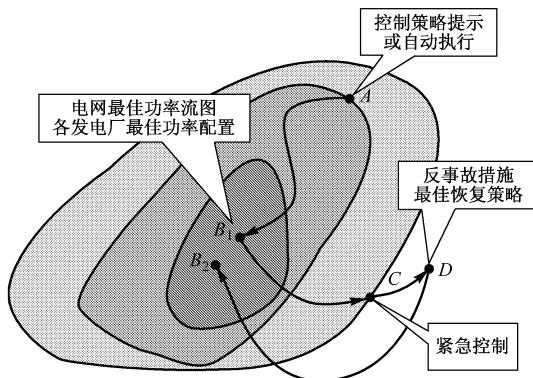


图 2 稳定域示意图
Fig. 2 Stability domain

实际电力系统的稳定域和状态点在域中的位置都是不断变化的。运行条件恶化或系统发生故障, 稳定域就会缩小, 状态点也会向域的边界移动。如果状态点处于危险位置(见图 2 点 A), 这时 DPS 应及时给出控制策略, 或按产生的控制策略自动闭环执行, 以使状态点在最短时间内回到安全区域(见图 2 点 B₁)。如果在更危急的情况下, 状态点已经移到稳定域的边界(图 2 点 C), DPS 应能采取紧急控制策略, 使之回到安全区(图 2 点 B₂)。亦或, 从理论上看来, 系统已失去稳定(见图 2 点 D), DPS 将采取反事故措施或采取最适合解列方案和最佳恢复策略, 使该电力系统状态回到安全区(见图 2)。至于在正常情况下, DPS 应给出按经济运行策略和按照电力市场经济法则调节各发电机组功率的配置等, 即我们常说的最佳潮流的运行法则。

3 基础性研究

为了实现 DPS, 需要有相当的基础性研究成果作为支撑, 需要有新理论和新算法。

3.1 整体模型

动态电力系统是用非线性微分方程来描述的。由于 FACTS 设备的投入, 电力网络中的动态设备更多了, 整个电力系统微分方程的阶数提高了。此外, 电力系统网络的潮流方程是大规模非线性代数方程组。把这两个方程组联立起来后就组成了大规模奇异非线性动态大系统(参见图 3)。这个问题在数学上称作 DAE 问题(differential and algebraic equation problems)。高维非线性 DAE 问题至今在理论上还是个重要的难点。

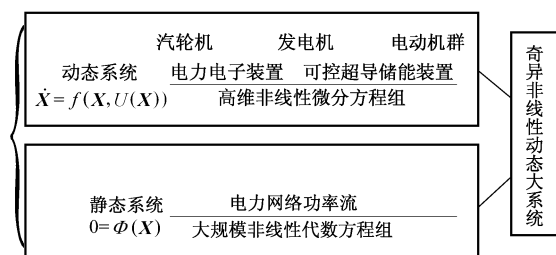


图 3 整体模型
Fig. 3 Overall model

3.2 整体稳定性测度论

要研究电力系统各个层面相互作用的规律和对稳定性的影响, 研究稳定域的拓扑结构、稳定域边界及其影响因素。所以要对运行中的电力系统的稳定域进行实时测度。

3.3 稳定性在线实时评价方法体系

如前所述, 电力系统稳定性问题是一个高维的 DAE 问题, 这就要求对高维 DAE 模型采用降阶或简约化的方法。可能的的方法是发展一套中心流型(central manifold)方法。利用中心流型和微分动力学的 Possion 括号法来研究中心流型的稳定性可能有效。还要发展大规模数值科学计算方法。可能用到基于辛几何(symplectic geometry)算法的并行计算方法。在辛几何算法方面, 中国科学院的冯康院士开创的学派迄今为止仍然在世界上处于领先地位。

3.4 混杂系统的多目标优化调度理论

混杂系统(hybrid system)是系统科学领域中新提出的概念和理论。电力系统是一个标准的混杂系统, 其上层(调度中心)给出的调度决策主要是逻辑性的操作指令; 而下层控制(如发电机的励磁与调速控制)主要是连续性的。如何将不同性质的上层和下层控制恰当地对合起来, 以达到电力系统的多目标优化控制的目的, 这是一个重要的理论问题和应

用问题。

至于电力系统的多目标控制, 说到底就是安全稳定性与经济性的双目标控制。进入电力市场机制运行后, 人们主要考虑的是其经济问题, 即各个投资体的赢利问题以及如何降低电价等问题, 很少考虑安全和稳定的问题。要为市场化运作的电力系统提供安全稳定的保障, 这是一个新的极具挑战性的课题。现在是该结束安全稳定和经济调度割裂状况的时候了。进入电力市场以后, 电力系统潮流的随机性加大了, 将通过 DPS 给出相适应的保证系统安全运行的调度策略, 这是一个新的问题。我认为美国 1996 年以来的大停电事故和马来西亚的大停电事故与他们没有综合考虑电力市场条件下的系统安全稳定性有密切关系。

3.5 区域性紧急暂态稳定控制

电力系统区域性的紧急控制问题在世界上仍未解决。目前只能针对某一系统通过大量的仿真计算, 得到该系统区域紧急控制的一些规则; 例如如果在某地发生短路, 就相应地在某些厂切几台机、某些地方切一些负荷等。人们只是根据经验和仿真结果得到一些策略。但实际的电力系统状态是千变万化的, 单靠仿真得到的几条策略是不够的, 所以要研究区域性紧急控制理论。现在没有现成理论可寻。作者主张研究和发展 Hamilton 系统和广义 Hamilton 系统理论, 以建立一套电力系统区域紧急控制的理论, 可以把切机和切负荷都看做是能量的注入, 只不过是正的符号的能量或负的符号的能量而已。基于这个观点, 有可能发展一套基于广义 Hamilton 理论和方法的电力系统区域紧急控制的理论和方法。

3.6 巨大的软件工程

美国副总统戈尔曾经提出数字地球的概念。这个数字地球可以用于研究全球气象情况, 厄尔尼诺现象以及世界资源、森林、环境等。当然, 数字地球这样一个巨大的软件工程需要世界各国共同完成。这给我们建立数字电力系统以启发。同样, DPS 也是一个相当大的软件工程。现有的软件成果不能废弃, 要加以利用, 还要把新理论的成果软件化。同时, 要发展高可视化建模技术。任何一个最优秀的调度人员, 每分钟给他 2000 个新数据组成的数据表, 都不可能进行任何有效的处理。而可视化的处理却使人“一目了然”。要尽量创造性地利用多媒体技术, 还要借用虚拟现实技术的有用思路来建立 DPS。

4 硬件支撑

我们在 2 年多以前曾经有建立 DPS 的想法。但是直到最近, 才提出这个概念。因为 DPS 需要硬件

来支持。需要超大规模的 PC 机网络。第一,因为 PC 机价格便宜,比专用芯片便宜很多,便于推广和使用;第二,这样一个超大规模的 PC 机网络最近已经由清华大学计算机系研制成功。我们现在有了硬件支持,再提出 DPS,就具有更高的可行性。

图 4 是 16 个计算节点的超大规模 PC 机计算网络。每个计算节点由 2 个 Pentium III 的 CPU 组成。PC 机之间快速数据交互传递由 67.584 Gbit/s 的聚合频宽动态寻址开关完成。这样,就能建立 600 亿次/s 的高速计算网络,提供建立多机电力系

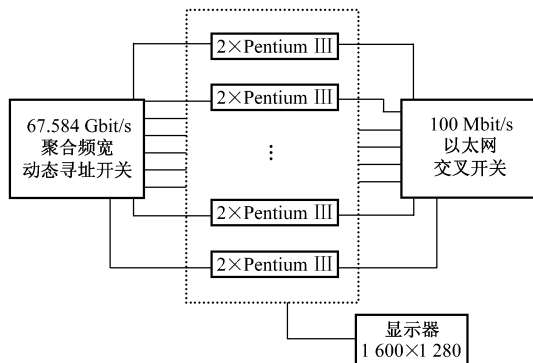


图 4 硬件支撑结构

Fig. 4 Structure of hardware support

统 DPS 的硬件支撑条件。在未来 5 年~10 年中,我国各省电力系统有可能完成这样的数字电力系统。

5 结语

这里提出的 DPS 与已有的 EMS,DTS 并不抵触,而且包含了 EMS,DTS 的功能。现有的 EMS 可以认为是初级阶段的 DPS,正像高射炮的功能融入了地-空导弹之中那样。

DPS 是逐步发展而且是“步步可用”的。它是在不断的建立过程中不断地被人们利用的。处于初级阶段的 EMS 不是也在使用的吗?在没有建立 EMS 以前的 SCADA 不是也在使用的吗?我们要一步一步地由简到全,步步可用。阶段成果的可用性对 DPS 推广有重大的意义。

作为 DPS 的第 1 步,我们要建立实时仿真系统。这个“实时”包括电磁暂态、机电暂态以及稳态运行。我希望中国的各个大学、研究所、企业单位的科技人员与国际同行一起来完成这个伟大的工程。

卢 强,男,教授,中国科学院院士,主要从事电力系统稳定与控制领域的教学与研究。

DIGITAL POWER SYSTEMS

Lu Qiang

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The concept of the digital power systems (DPS) is set forth in this paper. The definition, the contents, the functions, the hardware and the software conditions for implementing it are discussed. Moreover, the necessary basic research work for implementing DPS has also been discussed. The DPS may be defined like this: the digital power system is the digital, figuration and real-time description and reappearance of physical structure, technical characteristic, management system as well as personal information system of a real power system which is in operation. The DPS will be able to make a significant contribution to administrating and decision-making more scientifically, improving security and stability on line, on line making and implementing economical operation strategy and carrying out emergency and anti-fault control, etc.

This project is supported by National Key Basic Research Special Fund of China (No. G1998020300).

Keywords: digital power systems (DPS); security and stability; economical operation; real-time simulation