

南方电网超级能量管理系统的 混成控制系统构想

张 弥¹, 卢 强²

(1. 中国南方电网公司 电力调度通信中心, 广东省 广州市 510623;

2. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084)

A Speculation on Hybrid Control System of Super-EMS of China Southern Power Grid

ZHANG Mi¹, LU Qiang²

(1. CSG Dispatching Center, Guangzhou 510623, Guangdong Province, China; 2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments (Department of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: A hybrid control system (HCS) is such a control system, which takes the “event-drive” as core and by means of the definition of event the objects of both economic operation and secure operation of power system are concentrated into a single framework to implement the optimized control of complex objects. In this paper the authors propose an HCS by which the optimization of multi-objects is realized, and the essence of event-drive is revealed; meanwhile, the classification method of events and the forming condition of principal events are given. As the core component to construct a super-EMS for China Southern Power Grid (CSPG), the proposed HCS can be used to guide the construction of digitized CSPG in theory and in engineering practice, and provides powerful ensure for secure and economical operation of CSPG

KEY WORDS: hybrid control system (HCS); event-drive; real time simulation; super real time simulation; controlled system separation

摘要: 混成控制系统以事件处理为核心, 通过定义事件将经济运行和安全运行目标统一到一个处理框架内, 实现复合目标趋优化控制。文中介绍了实现多重目标趋优的混成控制系统, 提示了其“事件驱动”本质, 同时指出了事件的分类和一些主要事件的形成条件。该系统作为构造南方电网超能量管理系统的核心组件, 可从理论和工程实践上指导“数字南方电网”的建设, 并为南方电网的安全、经济运行提供有力

的保障。

关键词: 混成控制系统; 事件驱动; 实时仿真; 超实时仿真; 主动解列控制

0 引言

南方电网覆盖 5 省(区), 东西跨度近 2000 km, 目前已形成 500 kV 输电线“六交三直”西电东送的格局, 输电能力达到 11.75 GW。对于这样一个远距离、大容量、超高压输电和交直流并联运行的大电网, 如果要进行“数字南方电网”的建设, 其核心之一就是建设一个多重目标趋优的混成控制系统(hybrid control system, HCS)^[1-4]。

电力系统的多重目标优化问题, 从理论上说, 可描述为

$$\min J(x, y) = \int_0^{\infty} \sum_{i=1}^n q_i F_i(x, y)$$

$$\text{s.t. } \dot{x} = f(x, u, w)$$

$$0 = j(x, y)$$

$$l < \Omega < b$$

上述模型需用非线性高维微分方程组来描述, 这样该问题成为了一个具有特高维约束条件的变分问题。从数学和计算机科学已取得的成果和发展趋势来看, 该问题在未来一段时间内很难得到满意的解决。

本文提出通过 HCS 途径来解决上述高难度问题。HCS 是一个趋优控制系统^[5], 它将一切不满足要求和不满意的状态都分类地定义为事件, 通过控

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2004CB217903); 国家自然科学基金资助项目(NSFC)(50595411, 50377018, 50507013)。

The National Basic Research Program (973 Program); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC)(50595411, 50377018, 50507013).

制使得系统处于无事件运行状态, 则系统的各项指标(电能质量、稳定性和经济性)一定是满足要求的。也就是说, HCS 的控制效果在工程上可以解决实际大电网的多重目标趋优化控制问题。

1 HCS 系统概述

1.1 混成控制系统的总体结构

HCS的一般模型如图1所示。它由3个层次构成: 包括最高决策与指挥层、中间处理与操作层和底层的动态电力系统^[6-8]。它们之间的信息交互包括以下几类: ①从底层向中间层和决策层发送的数据信息; ②从中间层和决策层向可视化输出系统提交的数据信息; ③从决策层发送到中间层的控制指令(control command, CC); ④从中间层向底层发送的操作命令(operating order, OO); ⑤由调度员直接发送到各层的常规控制命令; ⑥底层设备的反馈控制。

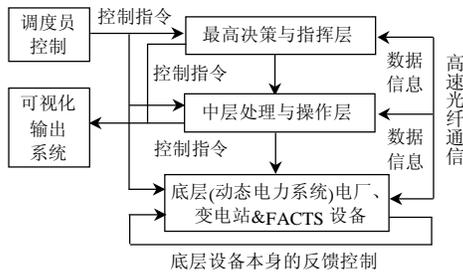


图1 HCS系统的总体结构

Fig.1 Overall architecture of HCS system

需要指出的是, 上述3层结构只是相对于一级调度系统而言, 如果要在南方电网投入实际应用, 则需要网、省、地3级调度控制中均采用HCS系统, 显然这需要建设一个3级9层的混成控制系统。

在最高决策与指挥层中, 首先需要对电力系统调度中心已有 SCADA 系统进行改造以形成动态 SCADA 系统(D-SCADA), 并通过它从中间层和底层接受事件判断所需要的信息, 这些运行信息通过数据处理后提交给事件判断机构, 该机构根据对事件的定义和分类来判断是否形成事件, 该过程可以表示为

$$E_{\lambda} = E(D) \quad (1)$$

其中: E_{λ} 为事件; D 为受控层上递的实时数据的集合, 即有事件集合 $E=\{E_i\}$, $i=1,2,\dots,n$ 为不同的事件类型的编号。

若事件判断机构判断没有事件发生, 则将系统交给常规的 EMS 系统(或称之为 OEMS, 以便区别于 S-EMS)处理。若判断有事件发生, 则用输出的

事件触发决策系统, 使之产生控制指令, 该过程可以表示为

$$C_C = L(E_{\lambda}) \quad (2)$$

其中: C_C 表示控制指令集合(control command set), 即 $C_C=\{C_{Ci}\}$, $i=1, 2,\dots,n$; L 为事件处理逻辑函数, 用来判断事件类型并将其转换为相应的控制指令。

中间层针对接收的控制指令, 结合从本层 D-SCADA 系统获得的状态和数据, 经过计算处理后, 生成有效的控制策略, 也就是操作指令 O_O 下达给底层, 该过程可以表示为

$$O_O = M(C_C) \quad (3)$$

其中: $O_O=\{O_{Oi}\}$, $i=1, 2,\dots,n$; M 为命令转换逻辑函数, 将控制指令转换为可控装置的操作指令。

底层的发电厂、变电站以及各种 FACTS 装置收到来自中间层的操作指令 O_O 后, 通过自身控制器的反馈控制, 完成操作控制以实现控制目标。

HCS 系统通过对采集的数据进行数据处理和事件判断就可以确定运行中的系统有无事件, 若有, 则综合地应用控制命令和操作指令来消除事件, 即使系统的事件集合 E 成为空集

$$E \rightarrow 0 \quad (4)$$

这样系统就运行在可以接受的状态(多重目标趋优状态)之下。由此可见, 系统始终处于事件的发现、处理和消除过程中, 因此事件驱动是 HCS 系统的灵魂。结合式(2)(3), 可以得到

$$O_O = M(L(E_{\lambda})) \quad (5)$$

这表明决策层下达给底层的 O_O 集合是事件集合 E 的一个复合逻辑函数, 这从本质上揭示了 HCS 控制系统事件驱动的特征。相对于控制论中的时间基(time base), 可称 E_{λ} 为事件基(event base)。式(4)则表示事件驱动控制所需要达到的效果。

1.2 实时、超实时仿真系统

为配合 HCS 系统的运行, 需要对电网的实时特性进行全面、详尽、快速、准确的认识与把握, 而目前对所有的信息都进行实时采样还存在一定的难度, 因此需要通过实时仿真系统来获得较为准确的状态信息。此外, 对于 HCS 决策层给出的控制命令, 若需要进行关键性操作或者控制紧急状态, 还需要利用超实时仿真平台来对决策的正确性进行验证。基于以上原因, 本文建议建设南方电网实时和超实时仿真平台。

图2为实时系统仿真图, 实时仿真系统可以从运行中的南方电力系统获得实时采样数据, 并在此基础上对该系统进行仿真以获得实际系统的镜像

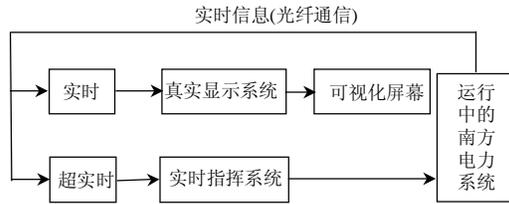


图2 实时、超实时仿真示意图

Fig.2 Diagram of real-time and super-real-time simulations system (mirroring system). 该镜像系统中的电网的关键设备运行状况和关键节点状态, 通过可视化屏幕直接提交给调度员, 作为调度员发出调度指令的参考。由于实时仿真系统与实时采样数据之间存在着同步机制, 因此实时仿真的数据具有很高的可信度, 对于调度员有很高的参考价值。

与实时仿真平台类似, 超实时仿真平台也需要从运行中的电力系统获得实时采样数据。不同的是超实时仿真系统具有更强的运算能力, 可以对大型系统实现超实时仿真。现有的技术水平, 已经可以实现对母线电网超实时3倍的仿真, 即在3s内完成系统10s的仿真。这使得超实时仿真平台具备了用于实时指挥系统的能力, 可以对关键操作或紧急调度的操作结果进行提前验证。

对于电网这样一个大型、非线性、多变量、时变的动态系统, 实时镜像仿真需要非常高的计算能力的支撑。利用计算机集群技术和分布式并行计算技术, 结合网络拓扑的可分性、电路等值理论和网络区域分解策略, 目前已经可以实现大型和超大型复杂交直流电网详细机电暂态和电磁暂态实时仿真。

2 事件的形成条件

HCS系统以事件驱动为核心, 因此准确地定义事件并明确事件产生的条件是系统可靠运行的基础。一般来说, 使得系统偏离可以接受的运行状态的事件大致可以划分为3类:

(1) 安全性事件, 指系统运行状况超出了某些预先设定的安全指标。

(2) 经济性事件, 指系统运行状况下能耗指标的越限。

(3) 电能质量事件, 指电能质量指标达不到规定的标准。

按照上述分类, 针对电压和频率2个电力系统的关键指标, 可以进一步定义6类事件并确定它们的形成条件:

第1类: 关键节点的电压质量事件 $E_{V,Q}$, 它代表代表全网电压水平的关键节点电压越界, 其越限

预警为

$$|V_{Pilot,i}^{(t)} - V_{Pilot,i}^{ref}| \geq \Delta V_E > 0 \quad (6)$$

第2类: 电压稳定性事件 $E_{V,S}$, 它表示电网在某种情况下电压安全稳定程度不能满足规定的要求, 其产生可以通过判断电压稳定的 J 矩阵最小模特征值来实现

$$I_{min,mod}^{ref} - I_{min,mod}^{(t)} \geq \Delta I_{ref} \quad (7)$$

第3类: 逼近最优潮流事件 $E_{P,LOSS}$, 它表示系统当前潮流与最优潮流之间的差距大于某个预先给定的值。其判断可以通过将实际潮流与优化潮流比较来进行。即

$$P_{loss}^{(t)} - P_{loss}^{opf} \geq \Delta P_E \quad (8)$$

第4类: 南方电网的频率质量 $E_{f,P}$, 它表示系统的频率偏移超出了规定的范围

$$|f(t) - f_{ref}| \geq \Delta f_{set} > 0 \quad (9)$$

第5类: 小扰动稳定性事件 $E_{f,Lfo}$, 它表示系统的运行点(状态点)移至小信号稳定域边界点的一个微小的 e 邻域, 则形成小扰动稳定性事件, 判断条件为

$$D_{min} \leq e_{Lfo}, \quad e_{Lfo} > 0 \quad (10)$$

式中: D_{min} 为状态点距小信号稳定边界的最小距离; e_{Lfo} 为以平衡点距低频振荡域边界距离表示的最低限度的稳定储备值。

第6类: 大扰动稳定性事件 $E_{f,TS}$, 图3表示南方电网受到大干扰, 运行点到达预警域或者紧急域^[9-10]。

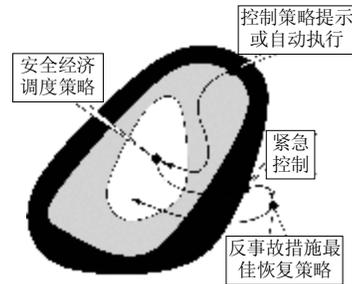


图3 稳定边界示意图

Fig.3 The plot of stability boundaries

上面给出的6类事件及相应判据只是事件形成条件的一个部分。实际上, 从不同的角度出发还可以定义更多的事件及相应的判据, 它们都可以纳入到HCS系统的框架内解决, 这表明该系统具有很强的灵活性和可扩展性。

3 南方电网紧急控制策略

3.1 紧急状态的判断

建设“数字南方电网”最重要的目的之一是提

高南方电网灾变防治能力。因此 HCS 必须提出有针对性的控制策略，处理好紧急控制的问题^[11]，诸如：如何判断系统是否进入了紧急状态；决定采用怎样的控制策略以及怎样保证紧急控制策略的有效性；面对极端情况必须进行解列时，怎样才能确定一个合理的解列策略。

紧急控制策略的正确产生是基于对紧急状态出现的准确判断。紧急状态意味系统的失稳，理论上可以采用李雅普诺夫(Lyapunov)判据，定义一个关于系统状态的能量函数 $V(x)$ ，并以

$$\frac{dV(x)}{dt} > 0 \tag{11}$$

作为系统失稳的判据。在失稳状态下，通过对发电和负荷的调整使系统回到稳定的状态，实现条件为

$$\frac{dV(x, u_{G1}, u_{Gn}, u_{L1}, u_{Lr})}{dt} < 0 \tag{12}$$

式中 $u_{G1}, u_{Gn}, u_{L1}, u_{Lr}$ 表示紧急控制的调节输入，分别表示机组的控制和负荷的控制^[12-15]。

上述只是理论方法，在工程实践中找到一个合适的李雅普诺夫函数加以应用很困难。为解决系统失稳的判据问题，HCS 提出了另外一个思路，即利用超实时仿真来协助判断系统，通过式(13)所示的系统能量积分来判断系统是否处于稳定状态

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T \Delta P_e(t) dt = 0 \tag{13}$$

由于超实时仿真具备很强的计算能力，所以可以提前对该积分进行计算，从而提前确定系统是否处于失稳状态。

3.2 紧急控制策略的产生和验证

当电力系统由于意外遭受如三相短路、发电机跳闸等事故产生的大扰动冲击时，故障后电力系统的运行状态位于稳定域边界之外，所以必须采取相应的紧急控制措施。在 HCS 系统中，这些事故已被定义为相应的事件。针对这些事件，HCS 系统可以采取包括紧急制动电阻的投切、切机、切负荷等措施来实现系统的稳定。从能量的观点来看，这些措施实际上就是向网络中注入或抽取一定数量的能量，以达到削弱故障过程中所积聚的能量不平衡对电力系统稳定的影响。如果故障中所积聚的不平衡的暂态能量能够迅速的被平衡，则紧急控制后的电力系统就是稳定的。因此，基于能量的紧急控制的核心思想就是通过向故障后的电力系统注入或抽取一定数目的能量，使紧急控制后电力系统的初始状态位于其相应的渐近稳定平衡点的稳定域内，从而达到稳定故障后受扰电力系统的目的。例如，

针对南方电网的特点，可以采用一个可行的紧急控制策略，即 DC 系统对 AC 系统的紧急支援。

图 4 为交直流并联系统。为防止紧急状态下 AC 线路连跳，可以紧急调整 DC 功率值，在整流侧与逆变侧两端加以式(14)所示的控制就可以取得较好的控制效果。

$$u_{DC} = \frac{H_1 H_2 T_d}{H_1 + H_2 w_0} \left[\int_0^t w_{12} dt + 2.29 w_{12} + (2.14 - \frac{D}{H}) w_{12} \right] + (P_{DC} - P_{DCref}) \tag{14}$$

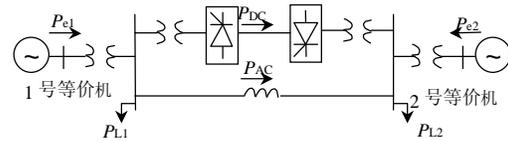


图 4 DC-AC 并联系统

Fig.4 DC-AC parallel system

图 5 给出了肇庆换流站出口一回线三相短路时采用 DC 紧急支援的仿真结果，系统在短时间振荡后就回到了原工作点的附近。

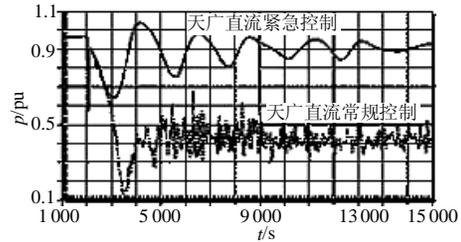


图 5 DC-AC 紧急支援仿真结果

Fig.5 Simulation result of DC-AC emergent supporting

HCS 的紧急控制系统与其他系统相比，除了采用基于事件的混成控制方式以外，另一个重要的不同是将超实时仿真引入了紧急状态的判断和紧急控制策略的验证过程。利用超实时仿真，我们可以实现紧急控制效果的可视化预演，从而保证调度人员在发出控制指令时对控制效果有足够的信心。

3.3 南方电网受端系统合理解列策略的自动生成

当电力系统遭受巨大的外界干扰，为最大程度保证电网用电，减轻电网事故的影响，避免发生大面积停电事故，就需要进行电力系统的紧急解列控制。实际上，若及时地采取主动解列控制(controlled system separation)措施，将有可能避免系统全面崩溃的发生。虽然在解列后整个电力系统并未工作于正常状态，而是被分割为若干个电力孤岛，但是各电力孤岛内的子电力系统仍能够保持同步稳定地运行。因此，主动解列能保证绝大多数用户持续地

获得供电,实现停电最小化,避免因全面停电而带来的巨大经济损失^[16]。

本文提出了基于能量平衡的合理解列策略自生成及执行系统,实现了电力系统的合理解列策略的快速搜索算法,并最终在调度中心加以实现和运行^[17]。

基于有序二叉决策图(ordered binary decision diagram, OBDD)法,同时针对电力系统的实际情况,本文提出了灾变下在线搜索电力系统的合理解列策略的3阶段方法:

第1阶段,建立电网的图模型并完成参数初始化,进而利用图论和电网特征对电网的图模型进行预处理,采用包括吸收度唯一点、除去权为零点和除去决策冗余线与边等手段以形成供搜索解列策略的简化图。

在第2阶段,利用基于OBDD的算法搜索能分离异步的发电机群且使各电力孤岛内能量供需平衡的解列策略。

在第3阶段,对第2阶段给出的解列策略,通过快速的电网潮流计算检验各传输线容量约束是否满足,给出备选的合理解列策略。

上文提出的紧急解列控制方案仅考虑了部分约束,因此得出的控制措施只满足了系统稳定运行的必要条件。但是,搜索加校验的求解思路为考虑更多的约束提供了灵活的框架。同样的约束既可以在搜索阶段也可以在校验阶段考虑,而且考虑几次并不影响解列策略的正确性。因此完全可以根据南方电网的实际情况和目前已有的技术手段,合理增加需要进一步考虑的约束条件,选择相应的计算方法并将其整合到搜索加校验的求解过程中。

4 结束语

HCS利用超实时仿真来协助判断系统,通过系统能量积分来判断系统是否处于稳定状态。HCS的紧急控制系统与其他系统相比,除了采用基于事件的混成控制方式以外,另一个重要的不同是将超实时仿真引入了紧急状态的判断和紧急控制策略的验证过程。

HCS代表了新一代电力系统的技术方向,可作为构造南方电网超能量管理系统的核心组件,从理论和工程实践上指导“数字南方电网”的建设,并为南方电网的安全、经济运行提供有力的保障。

参考文献

[1] 卢强. 新世纪电力系统科技发展方向—数字电力系统(DPS)[J]. 中

国电力, 2000, 33(5): 15-18.

Lu Qiang. Digital power system—the power system technological trend in the new century[J]. Electric Power, 2000, 33(5): 15-18(in Chinese).

- [2] 卢强. 数字电力系统(DPS)[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(9): 1-4.
Lu Qiang. Digital power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(9): 1-4(in Chinese).
- [3] 胡伟, 卢强. 混成电力控制系统及其应用[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2): 11-16.
Hu Wei, Lu Qiang. Hybrid power control system and its application [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(2): 11-16(in Chinese).
- [4] 胡伟. 电压混成自动控制(HAVC)系统的研究[D]. 北京: 清华大学电机工程与应用电子技术系, 2002.
- [5] 王智涛. 大电网混成自动电压控制理论及其工程实现的研究[D]. 北京: 清华大学电机工程与应用电子技术系, 2006.
- [6] 郑大钟, 赵千川. 离散事件动态系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [7] Galan S, Barton P I. Dynamic optimization of hybrid systems [J]. Computers & Chemical Engineering, 1998, (22): 183-190.
- [8] Avraam M P, Shah N, Pantelides C C. Modeling and optimisation of general hybrid systems in the continuous time domain[J]. Computers & Chemical Engineering, 1998, (22): 221-228.
- [9] 薛安成, 沈沉, 梅生伟, 等. 基于稳定域边界理论的暂态稳定指标及其应用[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 1-6.
Xue Ancheng, Shen Chen, Mei Shengwei, et al. Transient stability index of power systems based on theory of stability region and its applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 1-6(in Chinese).
- [10] 薛安成. 电力系统动态安全域研究[D]. 北京: 清华大学电机工程与应用电子技术系, 2006.
- [11] Hu W, Lu Q, Mei S, et al. Hybrid emergency control for power system [J]. Electric Power Components and Systems, 2001, 29(8): 683-693.
- [12] 余贻鑫, 陈礼义. 电力系统的安全性与稳定性[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [13] 余贻鑫, 王成山. 电力系统稳定性理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [14] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [15] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [16] 沈沉, 吴佳耘, 乔颖, 等. 电力系统主动解列控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 1-6.
Shen Chen, Wu Jiayun, Qiao Ying, et al. Studies on the active splitting control of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(13): 1-6(in Chinese).
- [17] 孙凯. 大型电网灾变下基于OBDD的搜索解列策略的三阶段方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

收稿日期: 2007-05-10。

作者简介:

张 弥(1954—), 男, 教授级高级工程师, 硕士, 从事交直流电力系统技术研究与管理工作;

卢 强(1936—), 男, 教授, 中国科学院院士, 研究方向为电力系统分析与控制、电力大系统灾变防治理论及应用, 以及绿色能源的开发利用, E-mail: luqiang@mail.tsinghua.edu.cn.

(实习编辑 王晔)