

暂态稳定预防控制和紧急控制的协调

薛禹胜

(国家电力公司电力自动化研究院, 江苏省南京市 210003)

摘要: 研究了预防控制与紧急控制的互补性; 强调在线预决策对暂态稳定控制的重要性; 指出量化分析是决策优化的一个关键。指出预防控制和紧急控制的协调对电力市场下互联电网安全经济运行非常重要, 并提出协调控制的数学模型、框架和逻辑-差分-微分-代数方程的稳定性分析和控制优化方法。

关键词: 电力系统; 预防控制; 紧急控制; 逻辑-差分-微分-代数方程; 优化

中图分类号: TM712; TM762

0 引言

电力系统的暂态稳定控制包括需要用差分方程和逻辑语句描述的支路过负荷相继开断及低压低频自动切负荷等事件, 其数学模型是典型的逻辑-差分-微分-代数方程(LDDAE)。稳定分析与决策长期以来依赖于对仿真曲线的定性分析、经验和离线的试探, 既无法量化控制效果, 也不适应电网结构和运行方式的迅速变化。因此, 迫切需要建立稳定性量化理论, 开发在线的定量算法和能跟踪系统工况进行在线决策的稳定控制系统。

对于暂态稳定控制, 在长期付出较小代价的预防控制和仅在故障发生后付出较大代价的紧急控制之间, 存在着决策优化问题, 需要统一考虑故障前的预防措施和故障发生后的紧急措施。两者的协调和自适应能力对电力市场环境全国联网的规划、运行的经济性和安全稳定性具有重要意义。

本文先讨论暂态稳定分析、预防控制和紧急控制的现状, 研究 LDDAE 的有界稳定性、量化分析、在线跟踪工况和决策优化问题, 然后提出对预防控制和紧急控制进行统一决策的框架和混合优化算法。

1 暂态安全稳定分析

一个局部故障可能导致一系列难以预计的相继开断, 最终酿成灾难性事故。按典型场景的离线计算结果制定的运行规程难以保证电力系统的安全运

行。若能在两次相继开断的时间间隔内, 按实际工况评估完所有潜在的下一个事件(不是整个事件序列), 那么不但可避免大量无关工况的分析, 也可将一个 m 重相继开断事件下的暂态稳定分析($n - m$) 问题分解为一系列单事件的分析 n 问题, 并在不同时段内分别处理。这样, 不论系统中相继发生了多少开断, 运行人员仍能清楚地把握住系统的实际稳定程度和必要的稳定控制措施, 从而克服了维数灾。对于电力市场新的转送申请, 也就可以根据系统在当时工况下承受的风险变化来确定合理的过网费。在线动态安全的量化分析正在成为控制中心的必备功能^[1,2]。

为了提高速度, 文献[3]用人工神经网络来估计临界切除时间; 文献[4]采用决策树分析稳定; 文献[5]利用专家系统预测负荷和运行情况的变化趋势。对于高维非自治非线性动力学问题, 这些方法均难以满足可靠性要求。

受扰轨迹本身的稳定裕度不但反映了稳定的机理, 也是用灵敏度技术推算参数极限值和参数裕度的基础^[6]。理想的稳定分析算法除了要满足精确性、强壮性、快速性等要求, 并适用各种模型和受扰场景外, 还应支持量化评估及决策, 在 5 min 内对全部故障场景完成在线跟踪分析, 提供深层信息。

数值积分法不但计算量大, 而且依赖于经验。它既无法估计稳定的充要条件, 也难以分析各参数对稳定性的影响。不论反复积分试探多少次, 也无法定义和计算轨迹裕度。等面积准则只能定量地分析经典模型的单机系统。充分利用这两种方法之间的互补性来实现上述目的是极富吸引力的思路^[7]。

对于任何可积的 LDDAE, 用数值积分得到的受扰轨迹包含了该模型和场景的全部信息。建立在实际受扰轨迹上的扩展等面积准则(EEAC)没有采

收稿日期: 2001-11-18。

国家重点基础研究专项经费(G1998020301)、国家自然科学基金(59920037)和国家电力公司(SP11-2001-01-04)资助项目。

用任何近似假设,它将评估平面从数值积分空间中脱离出来,并在将多自由度轨迹向一系列单自由度评估平面映射的过程中保持稳定的充要条件和算例的排序。这样一来,通过数值积分和线性保稳变换,就将 LDDAE 问题、强非线性、强非自治性、复杂模型及场景、多自由度等一系列困难统一地转换为单自由度非自治映象轨迹的稳定性特征抽取及量化的问题。在各映象中进行严格的定量分析后,再返回多自由度空间,得到原轨迹的稳定裕度。利用灵敏度技术,经过迭代就可以得到与零裕度对应的临界轨迹和参数极限^[8]。

EEAC 已在规划、运行和控制决策的实际工程中得到广泛应用^[9,10],成为美国电科院应用软件中心在国际工程咨询中的标准工具,成功地分析了规模接近 5 000 机、50 000 母线的美国东部联网系统。有关的商业软件包已被美国得州 ISO, Ameren UE, Louisiana 州的 Entergy Services Inc. 以及加拿大和韩国的大学所购买。

2 暂态稳定控制

预防控制和紧急控制是维持电力系统安全运行的两种重要手段(见图 1),具有很强的互补性。

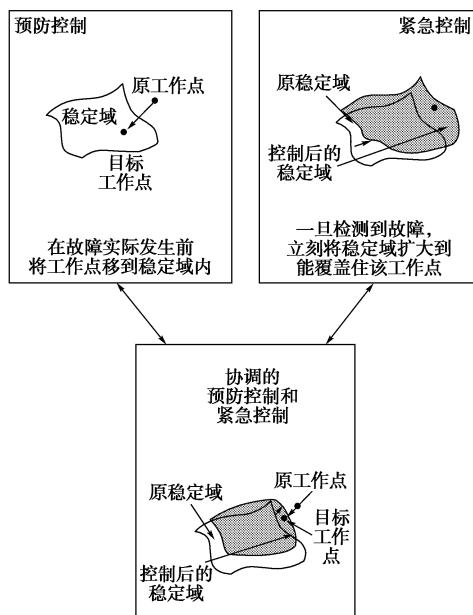


图 1 预防控制与紧急控制

Fig. 1 Coordinating preventive and emergency controls

对于预防控制来说,它在扰动未发生时就通过改变运行条件将系统运行点引入安全状态,因此预防措施在扰动瞬间就起作用,性能代价比好。但由于在没有扰动时也会增加运行费用,故不可能采用控制代价大的措施,总的控制效果也就有限。

对于紧急控制来说,只在检测到特定扰动后才采取措施,以扩大稳定域,因此紧急措施在扰动初期来不及起作用。虽然平时并不增加运行费用,但一旦发生扰动,必须采用较激烈的措施,控制的代价大。

稳定控制决策是在保持系统稳定的前提下,使控制代价最小的优化问题。预防控制措施往往是连续量,对应于非线性连续规划;紧急控制往往是离散量,对应于非线性整数规划,其协调问题是混合型的非线性规划问题。如果可供选择的措施种类及数目较多,但没有可靠的量化指标及相关的灵敏度分析技术,或者没有一个有效的搜索策略,那么即使只对单个工况下的单个故障进行控制措施的优化,也不是易事。

3 预防控制

在缺乏有效方法的情况下,人工智能技术^[11,12]和启发式方法^[13,14]引起了广泛注意,但其效果值得商榷。如果系统运行点足够靠近稳定边界,那么无论多么小的一个参数变化都可能导致原稳定的系统失稳。为了有效地搜索最佳控制措施,功率注入空间中的稳定域和稳定裕度对控制变量的灵敏度等概念非常重要^[15]。

传统的在线稳定监视方法只能离线对各预想典型工况(例如 x_p)和预想故障集 Y_p 进行积分试探,求出重要参数的稳定极限和综合的预防措施 z_p ,并建立数据库来存储各个 $z_p = f(x_p, Y_p)$ 。在单纯采用预防控制时,要求 z_p 使系统对于 Y_p 中的任何故障都具有足够的稳定裕度。在线运行时,将实际工况 x_a 近似地与 X_p 中最相似的工况(例如 x_p)匹配,将 $z_p = f(x_p, Y_p)$ 近似地代替理想的 z_a ,为调度员提供决策支持。但若数据库中没有相近的 x_p ,调度员可能不知所措。

如能按实际工况 x_a 和预想故障集 Y_p (例如 50 个场景),在线准实时地(例如计算周期小于 10 min)选择最优的预防措施 z_a ,就不会有工况的匹配误差或失配问题^[16]。

4 紧急控制

紧急控制决策必须在故障发生后的 10 ms 内,针对具体故障完成对控制地点、措施种类及控制量的最佳决策。为此,需要极其快速的量化算法、灵敏度分析技术,以及在多维离散空间中快速寻优搜索技术。否则,离线决策都很困难,更不用说在线预算了。

按照对控制措施评估和选择的时机可以将紧急控制系统分为“实时计算,实时控制”、“离线预算,实

时匹配”和“在线预算,实时匹配”3类方案^[17]。

用全球定位系统可以得到系统实际的受扰轨迹,但无助于对控制措施效果的评估,故理想的“实时计算,实时控制”方案并不现实。

如果没有可靠的稳定裕度指标,就只能采用传统的“离线预算,实时匹配”方案。紧急控制措施 $z_p = f(x_p, y_p)$ 针对的是单独的故障场景 y_p 。与预防控制一样,离线预算时必须考虑所有可能出现的工况,但计算得再多也无法保证实际工况 x_s 与典型工况 x_p 的合理匹配,并且一旦电网有大的变化就必须离线地重复全部计算,缺乏适应能力。

若能在合理的时间内完成对一个工况的稳定性分析,就可以跟踪实时工况的变化,不断刷新控制决策表,将紧急控制方案改进为“在线预算,实时匹配”的框架。

文献[18]介绍了一个按仿真得到的发电机的动能大小来周期地刷新切机序列的控制系统。该方法没有稳定裕度和灵敏度的概念,如果需要切除 n 台发电机,就需要 $(n+1)$ 次详细的仿真。该系统既不能考虑多摆失稳,也无法考虑切负荷等其他控制措施。

EEAC 的快速定量分析能力将最优控制措施的搜索从启发性的策略和专家交互式参与中解脱出来,为在线自适应决策创造了条件^[19]。新框架将 EEAC 稳定量化分析技术、灵敏度分析技术、在多维离散空间中快速寻优搜索技术^[20]、面向对象的分布式并行处理平台^[21]和区域稳定控制装置集成为一体,周期性地刷新决策表,构成自适应的紧急控制装置。其精度接近于理想但不现实的“实时计算,实时控制”方案。这样的—个自适应紧急控制装置已在二滩等电网试运行^[22]。

5 预防控制和紧急控制的协调

预防措施必须同时考虑故障集中的每个故障,而紧急措施则分别针对不同故障。预防控制付出的代价与扰动是否发生无关,而紧急控制则只有在扰动确实发生时才付出代价。预防控制和紧急控制决策的协调问题是混合型的非线性规划。假设通过预防控制 p ,将系统运行点由给定点 x_0 移到靶点 x_T 。 x_T 对于某些扰动可能仍然不稳定,故一旦发生危及系统安全的扰动 i 时,立即执行专门针对该扰动的紧急控制 e_i ,以保证系统的稳定性。因此,协调的目标是使从 x_0 到靶点 x_T 的预防控制代价和 x_T 对应的各紧急控制代价的概率加权之和为最小。其数学模型可表示为:

$$\begin{aligned} \min C(x_T) = \\ \min (C_p(x_T) + C_e(x_T, e)) = \\ \min (C_p(x_T) + \sum_{i=1}^{n_i} \alpha_i C_{e_i}(x_T, e_i)) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{s. t. } g(x_T) = 0 \quad (2)$$

$$h(x_T, e) \geq 0 \quad (3)$$

其中, C (或 C_p) 为一年中稳定控制的总代价 (或预防控制代价); C_e (或 C_{e_i}) 为紧急控制 e (或 e_i) 的代价; e_i 及 α_i 分别表示针对第 i 种扰动的紧急控制措施及期望次数; n_i 为需要考虑的扰动场景总数。式 (2) 为运行的等式约束,如潮流方程;式 (3) 包含控制量的容量限制和对稳定裕度的要求,后者必须通过稳定分析来判断。目标函数中的 $C_{e_i}(x)$ 由下面的紧急控制子问题给出:

$$\min C_{e_i}(e_i(x_T)) \quad (4)$$

$$\text{s. t. } g(x_T) = 0 \quad (5)$$

$$f(e) \geq 0 \quad (6)$$

$$\lambda_i(x_T, e_i) \geq 0 \quad (7)$$

式 (6) 代表紧急控制设备的容量限制;式 (7) 保证系统的安全稳定性,往往无法直接用函数式表达。

高维的决策空间、措施间的非线性交互、稳定控制的负效应、稳定裕度的非凸性和目标函数的局部极值进一步增加了协调预防措施和紧急决策的复杂性,需要为寻优开发新算法。为此,计算各措施的性能代价比,即单位控制量引起的稳定裕度的变化除以其控制代价,该值与已采用的措施有关。根据性能代价比的大小来选择措施的种类;根据稳定裕度的灵敏度来选择措施的强度。同时注意 EEAC 所揭示的机理,例如稳定控制的负效应增加了新的动态约束:当切机使某厂的机组从临界群移至剩余群时,进一步切这些机便会对前摆稳定不利;当切机使得稳定裕度增加很小或甚至下降时,不应再切同类机;当快关使得反摆失稳时,不应再增加快关措施。

先在不采用紧急控制的条件下,针对扰动全集对式 (1) 求取预防控制的最优解。若不存在可行解,说明必须考虑紧急控制;将 x_0 取作 x_T ,对式 (4) 进行优化。否则,将式 (1) 的最优解 p_{opt} 和对应的靶点 x_T 作为对式 (4) 进行优化的条件,并将其代价记为 $C_{p, min}$ 备查。再逐个地针对单个扰动,求取紧急控制子问题的初始可行解。过程如下:先求得 x_0 处各候选措施的性能代价比,按其大小顺序依次增加各措施的控制量,并考虑相关约束和控制负效应,直至找到能使系统稳定的措施组合。这个初始解往往不是控制总代价最小的解。

搜索紧急控制子问题最优解的过程如下。以初始可行解为起点,沿具有最小性能代价比的措施方

向减小控制量,直至系统不稳;再在性能代价比高于该值的措施子空间中按性能代价比的大小依次增加控制量,直至不但系统稳定,而且减小其任何措施的控制量,都无法用性能代价比更高的措施来改进。这一稳定解就是在不采取预防控制措施的情况下,能使系统稳定且代价最小(记为 $C_{ei, \min}$) 的最优紧急控制解。

如果 $\sum_{i=1}^{n_i} \alpha_i C_{ei, \min}(x_T) < C_{p, \min}$, 说明紧急控制比预防控制合理,这可能发生在远距离传输水电时。否则,就应该在两者之间进行协调,即以子问题的最优解为式(1)的初始解,开始优化。若该初始解各项紧急控制性能代价比中的最小值大于预防控制性能代价比中的最小值,则用后者取代之。如此不断寻优,直到两者相等。

6 结语

长期以来,对预防控制和紧急控制的研究一直被割裂开。一方面,对于小概率的严重事件,预防控制并不合理甚至不可行;另一方面,紧急控制的代价往往很高,并且不利于事后的恢复控制。在预防控制和紧急控制之间存在很强的互补性,它们的优化和协调对于市场环境中的互联电网的规划和运行极为重要。稳定性的量化分析是实施先进的预防控制和紧急控制及其协调的基础,而对于不断发展中的电力系统,稳定控制的自适应是关键技术。

参考文献

- EPRI Final Report. System Disturbance Stability Studies for WSCC. EPRI TR-108256, 1997
- Riverin L, Huang J A, Velette A, et al. Basic Requirements for a System of On-line Stability Limit Analysis at Hydro-Quebec. In: ICPST. Beijing: 1994
- Sobjic D, Pao Y. Artificial Neural Network Based Dynamic Security Assessment for Power Systems. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(1)
- Wehenkel L, Pavella M. Decision Tree Approach to Power Systems Security Assessment. Int J Electric Power Energy Systems, 1993, 15(1)
- Fouad A A, Venkataramans, Davis J A, et al. An Expert System for Security Trend Analysis of a Stability-limited Power System. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(3): 1077~1084
- 薛禹胜(Xue Yusheng). 电力系统稳定性的在线评测(Quantitative Study of General Motion Stability). 1998 中国科学技术前沿(中国工程院版)(Science and Technology at the Frontier in China, Chinese Academy of Engineering). 北京:高等教育出版社(Beijing: Higher Education Press), 1999
- 薛禹胜(Xue Yusheng). EEAC 与直接法的机理比较(A Critical Comparison of Various Methods for Transient Stability Assessment). 电力系统自动化(Automation of Electric Power System), 2001, 25(11~14)
- 薛禹胜(Xue Yusheng). 运动稳定性量化理论-非自治非线性多刚体系统的稳定性分析(Quantitative Theory of Nonlinear Stability and Its Application to Power Systems). 南京:江苏科学技术出版社(Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press), 1999
- Xue Y. On-line Transient Stability Assessment with EEAC. In: IFAC/CIGRE Symposium on Control of Power Systems and Power Plants. Beijing: 1997
- Euxibie E, Goubin M, Heilbronn B, et al. Prospects of Application to the French System of Fast Methods for Transient Stability and Voltage Security Assessment. In: CIGRE'92, Paris: 1992. 38~208
- Yamashiro S. On-line Security-economy Preventive Control of Power Systems by Pattern Recognition. IEEE Trans on Power Systems, 1986, 1(3)
- Miranda V, Fidalgo J N, Pecos Lopes J A, et al. Real Time Preventive Actions for Transient Stability Enhancement with a Hybrid Neural Network-optimization Approach. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 1029~1035
- Fouad A, Tong J. Stability Constrained Optimal Rescheduling of Generation. IEEE Trans on PWRs, 1993, 8(1)
- Kuo D H, Bose A. A Generation Rescheduling Method to Increase the Dynamic Security of Power System. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(1): 68~76
- Xue Y, Th Van Cutsem, Pavella M. Real-time Analytic Sensitivity Method for Transient Security Assessment and Preventive Control. IEE Proceedings, Pt C, 1988, 135(2)
- Xue Y, Yu Y, Li J, et al. A New Tool for Dynamic Security Assessment of Power Systems. IFAC Journal, Control Engineering Practice, 1998(6)
- Xue Y. Power System Emergency Controls. In: 6th Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning. Brazil: 1998
- Ota H, Kitayama Y, Ito H, et al. Development of Transient Stability Control System Based on On-line Stability Calculation. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(3)
- Xue Y. An Emergency Control of Framework for Transient Security of Large Power System. In: International Symposium on Power Systems. Singapore: 1993
- 陈永红,薛禹胜(Chen Yonghong, Xue Yusheng). 区域紧急控制的优化算法(Optimal Algorithm for Regional Emergency Control). 中国电力(Electric Power), 2000, 33(1)
- 范文涛,薛禹胜(Fan Wentao, Xue Yusheng). 面向对象分布式处理系统(Object-oriented Distributed Processing System). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1998, 22(8)
- Fang Y J, Xue Y. An On-line Pre-decision Based Transient Stability Control System for the Ertan Power System. In: POWERCON'2000. Australia: 2000

薛禹胜(1941—),男,博士生导师,中国工程院院士,总工程师,主要从事电力系统自动化方面的研究工作。E-mail: yxue@nari-china.com

