

混杂控制理论及其在电力系统中应用概述

曾湘勇^{1*}

(^{1*}国网湖南省电力有限公司新化县供电分公司, 湖南 新化 417600)

摘要: 电力系统控制是确保电网稳定和供电质量的核心手段, 随着新能源发电占比的不断提升, 其动态特性呈现高度非线性与混杂性, 为系统稳定性分析与控制带来新的挑战。本文综述了电力系统的电压稳定性问题, 探讨了其作为混杂系统的动态特性、稳定性分析方法以及安全控制研究进展。针对电压崩溃事故的防治, 分析了现有控制策略的局限性, 并指出基于混杂系统理论和新兴安全控制方法的研究潜力。最后, 结合“十四五”节能减排目标, 展望了未来电力系统在稳定性增强与安全性优化方面的研究方向。

关键词: 电力系统稳定性; 混杂系统控制; 电压崩溃预防; 安全性优化

Overview of hybrid control theory and its application in power systems

Zeng Xiangyong^{1*}

(^{1*} State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Xinhua County Power Supply Branch, Xinhua, 417600, China)

Abstract: Power system control is essential for ensuring grid stability and power supply quality. With the increasing integration of renewable energy sources, the dynamic characteristics of power systems exhibit strong nonlinearity and hybrid nature, posing new challenges to stability analysis and control. This paper reviews voltage stability issues in power systems, particularly those with high renewable penetration, and discusses their hybrid dynamic features, stability analysis methods, and advancements in safety control. For preventing voltage collapse accidents, the limitations of existing control strategies are analyzed, and the potential of hybrid system theory and emerging safety control approaches is highlighted. Finally, aligned with China's 14th Five-Year Plan energy conservation goals, future research directions for enhancing stability and safety in power systems are proposed.

Keywords: Power system stability; hybrid system control; voltage collapse prevention; security optimization

引言

电力系统控制是指通过对电力系统中的发电、输电、变电和配电等设备进行监控和调节, 以确保电网的稳定运行和供电质量。它主要包括系统监控、自动化控制、保护及调度等方面^[1]。在电力系统中, 系统监控是指对电力系统各个设备(如发电机、变压器、开关设备等)的运行状态进行实时监测和分析, 以获取电力系统的运行信息。通过监控系统, 可以实时获取电气量、电压、电流、功率因数等参数的数值, 同时也可以通过数据分析和故障诊断功能, 实时判断设备的运行状态是否正常, 及时发现和处理可能存在的问题。电力系统控制是通过系统监控、自动化控制、保护和调度等手段, 对电力系统中的设备进行监控、调节和管理, 以保证电力系统的稳定运行和供电质量。它在电力系统中发挥着重要的作用, 对于保障人们的用电需求和电力系统的安全可靠运行具有重要意义^[2]。

2015年, 风电和太阳能发电容量的增加比例分别为22%和28.1%。到2015年底, 全球风电

装机容量为 433 GW, 太阳能发电装机容量为 231 GW, 新能源发电占全球发电总量的 6.7%^[3]。根据国务院 2017 年印发的《“十三五”节能减排综合工作方案》, 到 2020 年, 全国能源消费总量控制在 50 亿吨标准煤以内。全国挥发性有机物排放总量比 2015 年下降 10% 以上。十四五”节能减排综合工作方案指出到 2025 年, 全国单位国内生产总值能源消耗比 2020 年下降 13.5%, 能源消费总量得到合理控制, 化学需氧量、氨氮、氮氧化物、挥发性有机物排放总量比 2020 年分别下降 8%、8%、10% 以上^[4]。为了实现深化污染物减排、落实节能减排目标, 在未来的几十年内, 中国仍然会不断推动新能源发电的发展。

新能源电源, 如风力发电机、太阳能光伏板, 均通过电力电子变换器接入电力系统。风力发电机将风中所含机械能转化为电能, 太阳能光伏板将太阳能转化为电能, 其共同特点是最大电能的输出量受限于外部气候条件, 即风速和光照强度。由于新能源电源对外界天气因素的高度依赖性, 以及新能源电源电力电子接口的控制方式的影响, 含有大规模新能源电源接入的电力系统表现出与传统基于同步发电机的电力系统截然不同的动态特性, 这为含有大规模新能源电源接入的电力系统的运行控制带来了新的机遇和挑战。

1. 电力系统介绍

电力系统是一个强非线性、多维、动态大系统。随着电力工业的迅速发展, 电力系统单机容量不断地增加, 电网结构日益复杂和庞大, 使得稳定性问题极为突出^[5]。因而设计先进的控制系统, 在提高电网传输能力的同时, 保证足够的稳定裕度成为电力系统的重要研究课题之一。电力系统的大干扰特性用包括连续动态特性和离散事件的复杂系统来描述, 诸如发电机和负荷等部分可视为连续动态行为, 他们遵守牛顿力学等物理规律, 通常由相互关联的微分和代数方程组来表达。其他一些部分则表现出事件驱动的离散特性, 如有载调压变压器, 保护装置等。这些部分的动态特性通常由依赖于连续动态信号输入的逻辑规则所决定^[6]。上述系统的特征是连续控制与离散控制的混合, 因而是一种典型的混杂系统^[7]。总的来说, 除了表现出高维数和强非线性特征之外, 最突出的性质就是发电过程的动态连续性, 输配电系统的代数逻辑约束, 以及包含或受离散事件驱动的调度控制过程的多目标优化需求。这些特征无论从结构形式上看, 还是从行为组态上分析, 均表现出混杂系统所共有的特征。所以应用混杂控制系统的理论方法解决电力系统的优化调度和稳定问题就是一种既理想又实用的选择了。

混杂系统控制方法的诞生虽然时间还不长, 但却已经在很多领域的研究中受到重视, 在一些实际系统中也得到了应用。因此, 针对电力系统的特点, 对混杂系统的结构和特点进行进一步分析, 以得到可以用于电力系统分析和控制的方法, 并分析其在电力系统中的应用及前景是极其具有工程价值的。

电力系统电压稳定性是指系统在受到扰动后, 在系统特性和负荷特性共同作用下, 维持负荷点电压运行在平衡点附近的能力。近二十年来, 电力系统向大机组、大电网、高电压和远距离输电发展, 对于合理利用能源, 提高经济效益和保护环境具有重要意义, 但是也给电力系统的安全运行带来了一些新的问题, 其中之一就是一些电压崩溃恶性事故, 而引起大面积停电, 比较典型的有: 1978 年 12 月 19 日法国电网, 1987 年 7 月 23 日东京电网, 1989 年 3 月 13 日加拿大魁北克电网, 造成巨大的经济损失和社会生活的混乱^[8]。这些事的严重后果引起了人们的广泛重视, 电压稳定性问题成为国际电力界普遍关注的课题之一, 电力系统为一种典型的混杂系统^[9], 因此研究电力系统稳定性可采用混杂系统稳定性理论。

2. 电力系统稳定性分析的现实意义

首先, 由于风速和光照强度变化的随机性和不可控性, 风力发电和太阳能发电均存在间歇性和随机性的特点, 给电网的动态增加了更多的不确定性。依据系统在平衡点的线性化模型设计的系统控制器无法应对这样的不确定性, 在电力系统受到暂态扰动时, 控制设备的性能没有得到最大限度的发挥, 以至于系统性能降低甚至失稳。因此, 在占电力系统主要能源供应者的同步发电机的励磁控制系统、调速系统中做相应的增强电网弹性的控制器设计对保障系统稳定运行有重要的意义。

其次, 电力系统是一个复杂的大规模非线性动态系统, 其稳定性分析是电力系统规划和运行的最重要也是最复杂的任务之一。电压稳定作为电力系统稳定性的一个重要方面, 直到八十年代

才吸引了国际电力界的广泛关注。我国在 2020 年新版的电力系统稳定导则中, 将电压稳定定义为电力系统受到小的或大的扰动后, 系统电压能够保持或恢复到允许的范围内, 不发生电压崩溃的能力^[10]。并指出:电压失稳可表现为静态小扰动失稳、暂态大扰动失稳、大扰动动态失稳、长过程失稳。电压失稳可以发生在正常工况, 即电压基本正常的情况下;也可能发生在不正常工况即母线电压已明显降低的情况下;还可能发生在扰动以后。因此, 如何在扰动存在的情况下, 基于混杂与切换系统理论, 通过有载调压变压器 (OTLC) 调节, 确保电力系统的电压稳定也是一个电力系统研究的一个极其重要的方面。此外。电力系统运行过程中的电压安全、频率安全、防止电力系统崩溃的研究也是非常重要的一个方向。

3. 电压稳定性研究概述

电压稳定的研究一直可以追溯到四十年代马尔科维奇提出的一个电压稳定性判据, 但是直到七十年代末期, 这一领域没有多大进展。1978 年法国电网的灾难性电压崩溃事故把这个长期被忽视的课题变成了电力界关注的焦点。早期普遍认为电压稳定是一个静态问题, 研究的重点集中在静态的机理探讨和基于潮流方程的极限运行状态的求取。而后碰到的困难使人们认识到电压稳定问题的复杂性和动态研究的必要性, 因此可把电压稳定的研究化分为三个阶段, 第一阶段, 从马尔科维奇提出的第一个判据到七十年代中期, 是电压稳定问题未引起足够重视的阶段。

第二阶段, 从七十年代末期到八十年代中期, 是注重静态研究的阶段;第三阶段, 从八十年代中期到现在, 是以动态机理的探讨为基础的全面研究阶段。

目前的研究工作按照其目的不同可以分为三大类:电压崩溃现象机理探讨、电压稳定安全计算和预防措施研究。目前普遍认为, 加强无功备用、提高紧急状态下的无功应变能力、防止无功功率的远距离传输、紧急切负荷、闭锁甚至反调 OLTC 是预防严重事故的有效方法^[11]。

电力系统电压稳定的研究方法主要有四种:仿真方法^[12]、小扰动线性化分析方法^[13]、能量函数方法^[14]和基于分岔理论的方法^[15]。

仿真方法是通用的方法。早先认为静态研究可以使电压稳定得到解决, 仿真分析没有得到重视, 只是近年来认识到电压稳定的动态属性以后, 才陆续有这方面的文章发表。仿真方法将电力系统各元件模型根据元件间拓扑关系形成系统模型, 这是一组联立的微分方程组和代数方程组, 然后以稳态工况或潮流解为初值求扰动下的数值解, 即逐步求得系统状态量和代数量随时间的变化曲线, 并根据发电机转子摇摆曲线来判别系统在大扰动下能否保持同步运行。

小扰动分析方法也是一种通用的方法, 用来进行小扰动稳定性分析, 并已得到广泛的应用。在电压稳定性研究中需用动态负荷模型, 可适当地简化发电机及其控制系统模型。小扰动分析就是把描述系统运动的非线性微分方程和代数方程在运行点处线性化, 形成状态方程, 并通过状态方程的特征根分析来判断该运行点的稳定性。安全控制研究现状。

随着系统自主智能性的不断提高, 保证控制系统的安全性 (Safety) 变得越来越重要^[16]。现在, 切换系统的安全分析与控制已经成为了当今控制领域的主流方向之一。

如今, 安全性的研究已经从多个角度同时开展。当前的安全分析与控制方法主要包括模型检测^[17]、可达性分析^[18]以及障碍函数^[19]等。模型检测通过穷举系统所有可能发生的动态行为以检测安全性。值得注意, 现代控制系统往往同时包含连续和离散两种动态。连续动态的存在导致系统具有无穷多种可能的动态行为, 从而造成模型检测方法在控制系统的安全分析与控制上受到巨大的限制。可达性分析是另一种能够有效解决连续控制系统安全分析与控制的方法。该方法具有成熟的计算工具包, 并已经被广泛地应用于现实中带有安全性约束的控制问题。然而, 可达集计算需要在状态空间上求解哈密顿-雅可比偏微分方程, 而这个过程对于切换系统来说通常是比较困难的。障碍函数最早应用于优化领域。与模型检测和可达性分析相比, 障碍函数方法可以高效地解决。

4. 小结

电力系统控制是保障电网稳定运行和供电质量的关键, 涉及系统监控、自动化控制、保护及调度等方面。随着新能源 (如风电、光伏) 的大规模接入, 电力系统的动态特性变得更加复杂, 其间歇性和随机性对传统控制方法提出了挑战。电力系统作为高维非线性混杂系统, 兼具连续动态与离散事件驱动的特性, 使得稳定性分析成为重要研究方向。历史上多次电压崩溃事故凸显了

电压稳定研究的紧迫性,目前主要通过仿真、小扰动分析、能量函数和分岔理论等方法进行研究。此外,安全控制领域的新方法为电力系统的安全性提供了新思路,但仍有待进一步探索。未来,结合混杂系统理论和先进控制方法,提升电力系统的弹性和抗干扰能力,是实现“双碳”目标下电网安全稳定运行的重要途径。

参考文献:

- [1] Machowski, Jan, et al. Power system dynamics: stability and control. John Wiley & Sons, 2020.
- [2] Morison, Kip, Lei Wang, and Prabha Kundur. "Power system security assessment." IEEE power and energy magazine 2.5 (2004): 30-39.
- [3] 王婧. 2022 年可再生能源装机容量增幅创历史之最[N]. 经济参考报,2023-06-28(004).
- [4] 金观平. 抓好节能减排推动绿色转型[N]. 经济日报,2022-01-28(001)
- [5] Meegahapola, Lasantha, et al. "Power system stability with power-electronic converter interfaced renewable power generation: Present issues and future trends." Energies 13.13 (2020): 3441.
- [6] Chen, Shuji, et al. "Application of switched system theory in power system stability." 2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). IEEE, 2014.
- [7] Noghreian, Elizabeth, and Hamid Reza Koofgar. "Power control of hybrid energy systems with renewable sources (wind-photovoltaic) using switched systems strategy." Sustainable Energy, Grids and Networks 21 (2020): 100280.
- [8] 袁季修,孙光辉.电力系统安全稳定控制的现状与进展[J].电力系统自动化,1989(04):11-16.
- [9] Susuki, Yoshihiko, et al. "A hybrid system approach to the analysis and design of power grid dynamic performance." Proceedings of the IEEE 100.1 (2011): 225-239.
- [10] 冷喜武.《电力系统安全稳定导则》7 月 1 日起实施[J].农村电工,2020,28(05):1.
- [11] 刘洋.基于切换控制系统的电力系统稳定性控制[D].华南理工大学,2017.
- [12] Deuse, J., and M. Stubbe. "Dynamic simulation of voltage collapses." IEEE Transactions on Power Systems 8.3 (1993): 894-904.
- [13] Amjady, Nima, and Mohammad Reza Ansari. "Small disturbance voltage stability assessment of power systems by modal analysis and dynamic simulation." Energy conversion and management 49.10 (2008): 2629-2641.
- [14] Odun-Ayo, Theresa, and Mariesa L. Crow. "Structure-preserved power system transient stability using stochastic energy functions." IEEE Transactions on Power Systems 27.3 (2012): 1450-1458.
- [15] Vahdati, Pouya Mahdavi, et al. "Hopf bifurcation control of power system nonlinear dynamics via a dynamic state feedback controller – part I: theory and modeling." IEEE Transactions on Power Systems 32.4 (2016): 3217-3228.
- [16] 朱哲人.一类连续非线性动态系统安全性分析研究[D].重庆大学 2020.
- [17] Kumar, Vinay, et al. "Reliability analysis and safety model checking of Safety-Critical and control Systems: A case study of NPP control system." Annals of Nuclear Energy 166 (2022): 108812.
- [18] Zhuo, Yixin, et al. "Design of power supply network based on 500/110 kv for load center and comprehensive accessibility evaluation." CSEE Journal of Power and Energy Systems 2.1 (2016): 30-39.
- [19] 陈杰,吕梓亮,黄鑫源,洪奕光.非线性系统的安全分析与控制:障碍函数方法.自动化学报,2023, 49(3): 567–579