

# 电力系统暂态稳定控制综述<sup>\*</sup>

刘玉田

杜正春 夏道止

(山东工业大学电力系·250061·济南) (西安交通大学电力系·710049)

**【摘 要】** 从全局控制和局部控制两个方面评述了电力系统暂态稳定控制的研究工作和实际应用情况，分析指出了非线性控制、人工智能、FACTS 技术等几个有前途的研究方向。

**【关键词】** 电力系统 暂态稳定 控制

## 1 引言

随着电力系统规模的不断扩大，暂态稳定性问题日趋严重。电力系统一旦失去稳定，往往造成大范围、较长时间停电，给国民经济和人民生活造成巨大损失和严重危害，在最严重的情况下，则可能使电力系统崩溃和瓦解。

长期以来，国内外的专家、学者对如何保证和提高电力系统的暂态稳定性进行了大量的研究工作，并且至今仍将其作为电力系统方面的一个重要研究课题。特别在我国，由于目前输电系统建设滞后于电源的建设，高低压电磁环网结构较多，且电网间联系薄弱，从而更易发生暂态稳定性破坏事故；而且在一些电网中，由于受暂态稳定性要求的制约，使某些输电线路的传输容量受到限制。在这些情况下，研究和实现相应的暂态稳定控制措施，不但可以提高系统运行的可靠性，而且可以因传输能力的提高而产生直接经济效益。

## 2 电力系统暂态稳定控制的研究现状

实际上，如何保证和提高电力系统的暂态稳定性是从多个方面进行考虑的。在系统规划阶段应合理选择发电厂厂址，采用合理的输电方案以及配置相应的保护和自动装置等。在运行管理方面，控制中心对运行方式的良好安排也有助于保证电力系统的安全稳定运行；在线动态安全评价，通过对发生预想事故后系统的暂态稳定性进行分析，可以为在线进行预防性控制提供依据。当系统遭受扰动后，施加控制是改善和提高电力系统暂态稳定性最经济有效的方法之一，而严重故障后的紧急控制措施可将由于安全性破坏而对系统造成的影响减小到最低程度。

电力系统在突然遭受大扰动后的暂态过程中，由于发电机组的机械功率输入与电气功率输出的不平衡，引起发电机转子间产生相对摇摆，如果系统没有足够的能力阻尼这种摇摆，使系统达到新的平衡状态，那么系统将失去稳定。因此，暂态稳定控制的作用应当是减少因扰动引起的不平衡功率或提供适当的阻尼。多年来，电力系统研究人员正是沿着这条思路致力于暂态稳定控制问题的研究，提出过多种控制措施和方法。

文献[1]将暂态稳定控制分为主控和辅助的断续控制，文献[2]则将后者归类为紧急控制。下面主要按暂态稳定控制的作用范围将其分为全局性控制和局部性控制两类，并主要对稳定控制

\* 1995—11—01 收稿。

刘玉田，男，博士，副教授，主要研究方向为电力系统分析与控制以及人工智能在电力系统中的应用。

方面的研究工作和实际应用情况作一简要综述。

## 2.1 全局控制

电力系统中发生故障的地点具有随机性。全局性稳定控制力图针对因各种不同的扰动地点所引发的稳定问题都能从系统范围内得到有效的控制。下述各方法在一定条件下可实现全局控制,但并不排除用来设计局部控制器的可能。

线性最优控制理论可以根据对控制的要求,用解析方法得出使某种给定的性能指标达到最优的控制规律<sup>[3]</sup>。在此基础上发展起来的大系统理论将全系统最优化分解为各子系统的最优化,然后通过某种方式协调或解耦(递阶控制和分散控制),达到全系统优化的目的<sup>[4]</sup>。这类方法均以运行点附近线性化为设计依据,而当电力系统遭受大干扰产生较大幅度的振荡时,实际系统的运行状态偏离所选平衡点较远,控制效果将会有减弱。

电力系统的“运行点”是在时刻变化的,按某特定运行点设计的固定参数控制器在其它运行点通常不能达到预期的性能。对此,自适应控制系统从原理上可以跟踪系统运行状态的变化并在线调整控制参数和控制策略,使之适应不同的运行点<sup>[5]</sup>。这类控制方法需要较多的在线计算,并难以跟踪快速变化的电力系统暂态过程,而且分散自适应控制是否能保证系统的稳定性,在理论上尚有待进一步研究。

电力系统暂态稳定问题本身是非线性的,因此非线性控制理论和方法具有更大的吸引力。近年来,微分几何法在非线性系统的控制中得到了广泛重视和应用,它适用于一类仿射非线性系统,使之在一定范围内实现精确线性化。其基本原理是通过合适的坐标变换,找到相应的非线性反馈,使在这个反馈作用下,原非线性系统在新坐标系下被映射成为一个线性系统,从而将设计非线性系统控制器的问题转化为相应线性系统控制器的设计问题。文献[6]应用微分几何控制理论,提出了多机电力系统中发电机非线性反馈解耦控制器的设计方法及相应的以解析形式表示的闭环非线性励磁控制和调速汽门(或快速汽门)等控制规律。所得到的控制规律是分散的,并且独立于输电网络参数。这种方法在原理上需要在系统中设置一个参考点(或无穷大机),而且对每台机组都施加控制。

直接大范围线性化方法不需要进行复杂的坐标变换和大量的数学推导,即可找出非线性反馈补偿规律将非线性因素加以抵消。对此文献[7]应用动态反馈补偿的概念和理论,提出了一种设计励磁和汽门等动态反馈补偿非线性控制器的方法。当系统中存在无穷大电源且每一机组都施加控制时,控制器可以做到与系统完全解耦、对系统网络结构和运行点的变化具有很强的鲁棒性,并从理论上保证全系统的稳定性。

变结构控制具有高速响应、良好的暂态特性及鲁棒性强等特点,为控制非线性系统提供了有效手段。它利用高速开关将系统的状态轨迹驱动到一个由设计者选择的滑行面或开关面上。在这一方面,文献[8]根据变结构理论和微分几何控制的思想,提出了多机交一直流电力系统非线性协调暂态稳定等控制方法。在每台机组都施加控制的情况下,从理论上证明了系统的稳定性;这种控制方法的优点是所设计的控制器是分散的,滑行面和控制器的设计均在子系统级进行,并且参数易于选取。

## 2.2 局部控制

众所周知,电力系统在遭受大扰动后,将引起扰动点附近发电机机组机械功率输入与电气功率输出间的较大不平衡,从而导致转子间的摇摆,在阻尼不足和控制乏力时,摇摆逐渐加剧并波及远方的发电机组,从而可能使系统失去稳定。针对电力系统暂态稳定性的这种特点,特别是对于发生某些特殊的故障时,及时进行有效的局部暂态稳定控制,往往能以较小的代价取得系统的

暂态稳定。

暂态稳定局部控制措施包括很多方面，例如切机、快速汽门控制、制动电阻控制以及串联电容的强制补偿等都有其各自的特点和作用<sup>[1]</sup>，下面仅主要综述切机和快速汽门控制的研究和应用情况，因为它们在目前应用比较广泛。

### 2.2.1 切机控制

切机作为提高电力系统暂态稳定性一种局部控制措施已经有多年的研究历史并得到了实际应用。目前，一般应用固定逻辑，通过查阅表或在线估算等方法来决定切机控制规律，包括是否需要切机以及切几台机。

通过查阅表确定暂稳控制规律是在大量离线稳定分析计算基础上，经过归纳整理，将电力系统运行方式、故障方式等及其对应的暂态稳定控制规律综合成控制策略表，实际应用时，“对号入座”确定控制规律<sup>[9,10]</sup>。但是，暂态稳定性问题具有很强的非线性，而控制策略表不可能非常详细，因此难以适应多种运行方式及不同的故障类型和位置，并且需要较多的经验来综合控制策略表。

从理论上来说，通过实时估算确定暂态稳定控制规律可以克服查阅表的缺点，但由于判断系统是否稳定往往需要求解微分代数方程组，而为了满足实时计算速度的要求，则不得不将复杂多机系统简化为单机无穷大系统或两机系统，这种简化难免产生误判。在这一方面，文献[9]将电力系统在装置所在地按运行方式、故障母线建立起一系列动态等值单机无穷大系统模型，在使用时实时测量故障开始后的功率突变量，然后差分求解发电机转子运动方程来确定切机控制规律。文献[10]则应用能量函数法估计切机需要，但各种能量法从原理上来说都是基于单机无穷大系统理论的直接或间接推广，并且为了满足实时性，又不得不作单机无穷大系统或两机系统等值的假设，因此难以期望在复杂系统下得出准确的决策。

近年来，人工智能技术被用于确定切机需要。其中文献[11]采用“在线预想计算，实时匹配”方案，结合 EEAC 和专家系统技术用于在线刷新紧急控制策略表，对网络结构和运行工况的适应性大大提高。而文献[12]则利用了模式识别技术识别发电机是否失步。文献[13]则基于连续函数关系分析，合理选择前向神经网络的输入和输出，并对如何应用于实际的大规模电力系统局部暂态稳定控制进行了探索性研究，所提方法易于实现。由于人工神经网络具有很强的信息存储和处理能力，因此它至少可以相当于一个更复杂、具有更高维数的查阅表。如果再利用神经网络的分类和函数逼近能力，则它完全可以容易地计及故障后发电机间各种不同的摇摆模式。

### 2.2.2 快速汽门控制

deMello F P 1966 年开始研究快速汽门控制(fast valving or early valve actuation)用以提高电力系统暂态稳定性，然后逐渐被电力公司采用<sup>[14]</sup>。目前，有些厂家生产的大型汽轮机组已带有快速汽门控制机构，但其应用仍主要限于远距离大容量输电的发电厂机组，且一般采用固定逻辑或通过查阅表决策，至于在线估算汽门控制规律仍仅限于研究。

文献[14]介绍了美国四个电力公司应用快速汽门控制及现场试验的情况，比较全面地讨论了快速汽门控制的效益、控制阀选择、控制的启动方法以及对锅炉、再热器的影响等相关问题。Kundur P 等人研究了快速汽门控制中各段时间(控制延迟时间、阀门关闭时间、关闭持续时间亦称“闷缸时间”及开启时间)对稳定性影响的敏感度，给出了较为详细的仿真结果<sup>[15]</sup>。文献[16]介绍了通用电气公司生产的汽轮机组进行快速汽门控制的能力以及控制对稳定性提高的效益，并指出：快速汽门控制应当被作为暂态稳定控制的辅助措施，但在应用时要小心地进行试验。文献[17]则提出用扩展等面积定则法实时估算快速汽门控制规律。另外，文献[13]提出了一种快速汽门控制决策的神经网络方法，并提出了一种两电站间切机和快速汽门控制协调的方案。

### 2.2.3 其它措施

除了以上所提到的各种控制措施以外，原本为抑制低频振荡而提出的电力系统稳定器(PSS)，近年来被赋予新的使命，使之同时用于改善和提高系统的暂态稳定性，并开始应用人工智能技术设计控制器<sup>[18]</sup>。

值得注意的是，近年来随着电力电子器件和超导技术的发展，直流输电功率调制控制、静止无功补偿(SVC)、可控串联强补(TCSC)、快速大功率360°移相以及大功率超导储能等FACTS技术的应用或研究，为快速控制系统间的潮流提供了条件，也为电力系统暂态稳定控制或改善系统阻尼提供了新的手段。另外，应用全球定位系统(GPS)构成在线数据收集系统，可实现故障的精确定位和实时的相位测量，如何将之用于启动暂态稳定控制的研究也已开始。

## 3 研究展望

通过以上关于电力系统稳定控制目前的实际应用情况及理论研究方面的综述，我们提出如下意见或建议：

(1) 基于各种非线性控制理论而提出的全局性暂态稳定控制具有很大的吸引力和应用前途，但是，要使它们真正得到实用，还有很多理论和实际问题需要进一步研究和解决。

(2) 应用人工智能技术于局部暂态稳定控制决策，从而实现自适应控制，应该是一个很有前途的研究方向。应用适当的控制技术利用FACTS设备提高电力系统的稳定性也是一个非常有前途的研究方向。另外，应研究如何利用全球定位系统来实现实时稳定控制。

## 参 考 文 献

- 1 IEEE Report. A Description of Discrete Supplementary Controls for Stability. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1978, 97 (1): 149~165
- 2 IEEE Report. Emergency Control Practices. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1985, 104 (9)
- 3 卢 强, 王仲鸿, 韩英铎. 输电系统最优控制. 科学出版社, 1982
- 4 Singh M G et al. Decentralised Control Design: An Overview. Large Scale Systems: Theory and Application, 1985, 9 (3): 215~225
- 5 Pierre D A. A Perspective on Adaptive Control of Power Systems. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2 (2): 387~396
- 6 卢 强, 孙元章. 电力系统非线性控制. 科学出版社, 1993
- 7 李 华. 电力系统稳定的非线性控制：直接大范围线性化方法的理论和应用. 清华大学博士学位论文, 1991
- 8 荆朝阳. 多机电力系统变结构控制. 浙江大学博士学位论文, 1990
- 9 朱 琦等. WHQJ型微机稳定控制切机装置. 电网技术, 1993, 17 (5): 22~26
- 10 Fouad A A et al. Calculation of Generation Shedding Requirements of the B C Hydro System Using Transient Energy Functions. IEEE Trans on Power Systems, 1986, 1 (2): 17~23
- 11 陈永红, 薛禹胜. 用EEAC和专家系统技术计及模型影响以在线刷新紧急控制决策表. 中国电机工程学会自动化学术年会论文集, 山东淄博: 1995
- 12 大浦好文等. 电源系統の事故波及防止システムの方式と構成. 电气学会论文志B, 1992, 112 (7): 593~601
- 13 刘玉田. 神经网络用于电力系统暂态稳定控制研究. 西安交通大学博士学位论文, 1994
- 14 IEEE Report. Turbine Fast Valving to Aid System Stability: Benefits and Other Considerations. IEEE Trans on Power Systems, 1986, 1 (1): 143~153
- 15 Kundur P, Bayne J P. A Study of Early Valve Actuation Using Detailed Prime Mover and Power System Simulation. IEEE Trans on Power Apparatusand Systems, 1975, 94 (4): 1275~1287
- 16 Tounkins T D et al. Fast Valving with Reheat and Straight Condensing Steam Turbines. IEEE Trans on

- Power Systems, 1987, 2 (2): 397~405
- 17 蔡泽祥, 倪以信. 考虑暂态稳定紧急控制的扩展等面积法. 中国电机工程学报, 1993, 13 (6): 20~26
- 18 Hassan M et al. A Fuzzy Logic Based Stabilizer for a Synchronous Machine. IEEE Trans on Energy Conversion, 1991, 6 (3): 407~412

## A REVIEW ON TRANSIENT STABILITY CONTROL IN POWER SYSTEMS

*Liu Yutian* (Shandong University of Technology, 250061, Ji'nan, China)

*Du Zhengchun, Xia Daozhi* (Xi'an Jiaotong University, 710049, Xi'an, China)

**Abstract** This paper presents a review on the recent advance of transient stability control in electric power systems. Nonlinear stability control, artifical intelligence and FACTS technology show to be promising.

**Keywords** power system    transient stability    control