

·学科进展·

电力系统安全经济综合控制理论与应用 研究现状及发展趋势

孙元章

(清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

[摘要] 本文通过介绍电力系统安全与经济综合控制的研究背景及国内外对安全稳定控制和经济运行的研究现状,探讨安全经济综合控制理论的研究内容,并展望电力系统安全经济综合控制理论的发展趋势及应用。

[关键词] 电力系统,安全控制,经济运行,混杂系统

1 科学背景

电力系统安全控制和经济运行是各国电力系统长期发展中的关键研究课题。由于电力系统安全稳定控制理论的研究远远落后于电力系统自身规模的发展和复杂性的增加,因此,世界各国电力系统均发生过数起因电力系统稳定性被破坏而导致大面积的停电事故,给国民经济造成了重大的经济损失和社会秩序的严重紊乱,甚至危及国家安全。

众所周知,电力作为国家的能源支柱和经济命脉,在国民经济可持续发展中起着不可替代的作用。目前,我国电网装机容量达2.5亿千瓦,居世界第2位。三峡电站的建成将促成中部电网的形成;澜沧江、红水河水电和贵州火电开发东送的形成将持续加强南部电网;西南水电的进一步开发和黔桂水火电基地的建设可促进中部和南部电网互联;内蒙古火电基地的建设将促成东北电网和华北电网互联。由此可见,随着我国国民经济的进一步发展将促成西南水电、“三西”火电、内蒙古中东部火电和黔桂水火电4大能源基地的开发,从而形成西电东送,北电南送的互联电网格局。电网互联后会带来诸如错峰、水火电互补、功率紧急支援等一系列的经济效益,但电网的稳定性有可能降低,如网架较薄弱的电网内部的安全稳定水平降低;多个大容量直流输电线路在受端电网集中落点可引起受端电网的电压稳

定问题;而小送端电网通过直流输送容量较大时,受端电网的故障将影响送端电网的稳定性;各大区电网经交流线路互联后,可能产生弱阻尼或负阻尼的振荡问题,同时也会给潮流控制带来较大的困难^[1]。从我国各大电力系统在过去20年里曾发生过的100多起故障可以看出,随着电网规模的扩大,对电力系统安全稳定性的破坏所造成的损失呈现大幅度上升的趋势。因此,研究大电力系统安全经济综合控制理论,保证大电力系统安全稳定和经济运行已成为电力系统中头等重要的任务,并具有重大的理论意义和深刻的应用背景。

2 国内外研究现状

在过去几十年里,对电力系统的安全稳定控制和经济运行的研究都是各自孤立地进行,即当研究电力系统安全稳定控制问题时并不考虑系统的经济性指标和约束,而研究电力系统经济运行问题时,也不考虑在该种运行方式下系统是否具有足够的安全稳定裕度。造成这一结果的主要原因还是问题的复杂性和难度。

电力系统安全稳定控制措施包括大型发电机组的励磁与调速控制,电力网络中高压直流输电控制,柔性交流输电控制(如静止无功补偿器 STATCOM,可控电容器 TCSC,可控移相器 TCPS,以及统一潮流控制器 UPFC等),以及在紧急情况下的切机、切负

本文于1999年2月3日收稿。

荷控制等。仅从电力系统安全稳定角度研究控制问题时,可归纳为研究以下一类动态系统的控制问题:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, y, u) \\ 0 &= g(x, y, u) \quad (1) \\ \min_u J &= \int_0^t F(x, u) dt \end{aligned}$$

其中 x 为状态, u 为控制, y 为电力网络方程的输出。由于网络方程 $g(x, y, u)$ 是一类由三角函数表示的复杂非线性代数方程, 因此在通常情况下很难解出 $y = g^{-1}(x, u)$ 的表达式, 致使上述控制问题变成了一类混杂系统 (Hybrid system) 的控制问题^[9]。有关混杂系统的控制理论是非线性系统研究的热点和难点, 而目前这一理论在电力系统的应用也是刚刚提出。本文将在第 3 部分详细讨论该领域的研究设想和发展趋势。鉴于已有的理论和方法都无法求得问题(1)的解, 因此, 研究电力系统的安全控制问题都要进行一系列的假设或针对电力系统特定的稳定问题进行简化研究。

在 70 年代和 80 年代期间, 当电力系统机组容量较小, 负荷增长较快, 而电力网络的建设还落后于线路传输容量的增长速度, 即电网结构较薄弱时, 电力系统小干扰问题就显得较突出。电网中经常出现各种频率的小功率振荡。电力线路传输功率极限主要受静态稳定极限的约束。因此在当时的电力系统发展背景下, 研究电力系统小干扰稳定控制理论与方法解决电力系统小干扰稳定性控制, 抑制各种频率的小功率振荡已成为电力系统安全控制中的重要研究课题。开展这一领域的研究是在以下几个假设条件下进行的:

(i) 假设电力网络结构和参数不变; (ii) 假设负荷动力群动态模型可用恒定阻抗特性代替; (iii) 假设将式(1)在某一平衡点处劳线性化并忽略二次以上高次项。

在以上假设条件下, 研究电力系统(1)的小干扰稳定控制可归结为研究 MIMO 线性系统的最优控制问题^[2,3], 即

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + BU \\ Y &= CX \end{aligned} \quad (2)$$

设计上述系统的控制器时, 若选择二次型性能指数,

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (X^T Q X + U^T R U) dt \quad (3)$$

则由 LQR 方法即可得到最优控制解为

$$U = -R^{-1} B^T P X \quad (4)$$

其中 P 为代数 Riccati 方程的解。

从上面的解可以看出, 电力系统小干扰稳定控制问题的解为系统全状态变量的定常反馈。但由于电力系统中众多控制设备在地理位置上是高度分散的, 在各种控制设备之间进行实时状态信息传输是极其困难的, 因此实现电力系统小干扰稳定最优控制几乎是不可能的。这种在实际系统中所遇到的困难进一步促进了电力系统小干扰稳定控制理论的发展, 用时域分析方法提出了若干种电力系统次最优分散控制的设计理论和方法^[4], 用频域方法提出了带辅助控制变量的多变量控制的设计方法^[5]。但迄今为止, 研究电力系统小干扰稳定性分散控制的理论和方法仍然是一个具有挑战性的研究难题。

尽管电力系统小干扰稳定性研究方面还存在许多未能解决的课题, 但随着电力系统的发展, 机组容量不断增大, 电网建设速度加快, 电力系统小干扰稳定问题已逐步得到缓解。影响电网安全运行的主要矛盾已转化为电力系统大干扰稳定性问题, 即暂态稳定性问题。改善与增强电力系统大干扰稳定性必然要研究大干扰安全稳定控制理论与方法, 即可归纳为研究一类非线性混杂系统(1)的控制问题。由于系统(1)的控制问题至今仍未有较为成熟的理论和方法求得其控制解, 因此解决电力系统大干扰安全稳定控制问题仍需作以下假设:

(i) 电力网络结构和参数不变; (ii) 用恒定阻抗特性代替负荷动力群的动态特性。

在以上假设条件下, 非线性系统(1)可转化为以下一类仿射非线性控制系统, 即

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x) u_i \\ y_i &= h_i(x) \quad i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (5)$$

经过近 10 年的研究, 应用微分几何控制理论终于找到了一组非线性坐标变换和控制变换^[6]

$$Z = T(x) \quad (6)$$

$$V = \alpha(x) + \beta(x) U$$

将电力系统(5)精确线性化成以下线性控制系统

$$\dot{Z} = AZ + BV \quad (7)$$

$$Y = CZ$$

为此, 电力系统大干扰下的安全稳定控制的研究已转化为寻找合适的坐标变换和控制变换(6), 将非线性系统的控制问题(5)精确转化为一类线性系统(7)的控制问题。由此得到电力系统在大干扰下的安全稳定控制策略, 即

$$U = \frac{-\Lambda T(x) - \alpha(x)}{\beta(x)} \quad (8)$$

这里 K 为线性系统(7)的反馈增益矩阵。显然控制律(8)仍然是一类系统全状态的非线性反馈控制律,在实现上仍然遇到了难以克服的困难。但是,当假设电力系统存在一台较理想的无穷大机组时,控制律(8)将变为可解耦的形成。这一假设为实现电力系统非线性分散控制的研究奠定了基础,并且在电力系统大干扰安全稳定控制方面取得了突破性进展。

尽管如此,在电力系统大干扰条件下的安全稳定控制方面仍存在以下几个研究难题:

(i) 在定常非线性系统(5)下,研究具有明确物理意义性能指数下的电力系统非线性最优控制问题;

(ii) 由于各种大小扰动及结构与参数的变化均存在于一个实际电力系统中,因此研究电力系统安全稳定鲁棒控制问题仍面临着挑战;

(iii) 从全系统安全稳定的角度研究 FACTS 控制设备的控制规律仍然是世界各国学者所追寻的目标;

(iv) 尽管区域安全稳定措施已在各电力系统中运行,但区域安全稳定控制的理论研究结果仍然很少。

3 电力系统安全经济综合控制发展趋势与预期成果

利用市场机制对电力工业传统的生产方式和管理方式进行改造,使一度被称为“夕阳”工业的电力行业呈现出勃勃生机,也是世界上许多国家非常关注的重要问题——电力市场^[7]。电力市场的建立使民用电和工业用电的电费大幅度下降,并为它们提供公开、公平以及公正的输电服务。但对电力工业本身的发展来说,追求发电成本的最优化、输电与配电网损耗的最小化、以及电力系统更高的安全稳定裕度是建立电力市场后电力系统所面临的重要研究内容。因此,在研究电力系统安全稳定控制的同时,考虑电力系统运行的经济性是当今电力系统中引入电力市场化机制后又一具有挑战性的研究领域。

理论上,在电力系统安全稳定控制的基础上考虑电力系统运行的经济性正是电力系统安全与经济综合控制的研究内容,也是研究一类动态系统与代数系统综合最优解的理论与方法,即研究电力系统在满足安全稳定运行条件下是否处于较经济的运行状态。研究这一类问题可归结为研究下列一类混杂

系统的多目标控制问题,即

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, y, u) \\ 0 &= g(x, y, u) \\ \min_u J_1 &= \int_0^t h_1(x, u) dt \\ \min_y J_2 &= h_2(y) \end{aligned} \quad (9)$$

其中 J_1 为满足电力系统安全稳定控制的动态性能指标, J_2 为满足电力系统经济运行的性能指标,其值可以是发电煤耗或网络损耗等^[8]。

系统(9)是一类典型的混杂系统,以下几个因素使得现有的控制理论方法在发展电力系统安全经济综合控制问题研究方面苍白无力:首先,“混杂”是系统(9)的固有特性,电力系统在调度和控制策略上呈现数值信号和逻辑信号混合的特点。比如,紧急情况下的切机、切负荷措施均可归结为决策指令的离散作用,而励磁和调速控制以及电力网络直流输电控制等则可归结为连续作用;其次,系统(9)是高度非线性的,其运行特性表现为性质各异的动、静两态方程的交互作用,稳定运行条件为能有效抑制外界干扰及内部不确定性,运行范围应包括可控和不可控的离散事件约束等。之外,由于系统(9)的优化指标中安全与经济目标的互为竞争性,必须利用现代控制理论和多目标优化理论等一系列最新工具求得系统最佳平衡点,并以此来求得系统具有足够安全稳定裕度的经济运行策略。

根据以上问题的描述,结合电力系统的动态学特点,预期在以下几方面的研究将取得成果:

(i) 建立基于混杂系统理论的电力系统安全经济综合控制模型

首先在发电机励磁与调速控制系统模型基本成熟的基础上,建立混杂系统的动态模型部分,而系统的静态模型部分则用于描述现代电网中的电力电子控制设备以及基于逻辑信号的控制调度指令等。这是因为电力电子控制设备的动态过程很快,因此,再建立一类代数控制系统模型是一条有效的途径。而诸如切机、切负荷等逻辑指令实际上对应着混杂系统共有的切换性,即可建立一类离散事件自动机模型。最终将动静两态模型相耦合,即可得到一类动态控制与代数控制相结合的混杂系统模型。

(ii) 混杂系统多目标控制问题解的理论与方法

对于电力非线性控制系统,研究多目标控制问题的一般解的理论和方法是电力系统安全经济综合控制的重点任务。从电力系统稳定性指标和经济性指标的特定形式出发,寻找满足电力系统多目标控

制问题的解,为全面解决电力系统中功角稳定和电压稳定,安全控制和经济控制提出较系统的设计理论。具体设想如下:应用和发展非光滑分析方法,将系统的静态方程离散化并将此离散状态看成是脉冲输入的结果,从而利用一类迁移算子表征系统的切换性。如此可将混杂系统多目标控制问题转化为由微分方程表述的非光滑优化的标准设计问题。有关复杂非线性系统的非光滑分析是目前数学、运筹学和控制论最深刻有力的工具之一,完全可以期望这一工具在混杂电力系统的多目标控制方面取得重要突破。

(iii)具有最大安全域的经济运行最优解的理论与方法

电力系统安全域定义一直是电力系统安全分析的重要研究内容,如何恰当定义电力系统稳定控制的安全域度,并在此基础上研究电力系统在经济运行指标下的代数最优解的理论也是安全与经济综合控制研究的重点,这一理论的核心内容是快速算法。众所周知,由我国著名学者冯康院士创立的辛几何算法在复杂非线性系统的分析与计算方面卓有成效。为建立满足实时性要求的快速优化算法,需建立一套面向目标的控制系统的设计和配置理论体系及求解方法。设想应用和发展混杂系统辛几何方法,构造针对各个目标的辛格式,并发展一套利用组合辛格式的分析方法和算法。

4 小 结

电力系统的控制问题是与电力工业自身的发展息息相关的。60年代至70年代期间,当时电力系统运行中的突出矛盾是电力系统的静态稳定问题,因此,世界各国将线性多变量控制系统设计理论与方法应用于电力系统安全稳定控制方面,为解决电

力系统静态稳定性作出了贡献。到80年代至90年代,由于电网建设速度加快,电力系统稳定问题主要表现为抵抗大干扰的稳定问题,即暂态稳定问题,由此,有关电力系统的暂态稳定性分析与控制手段和方法应运而生,先后提出了电力系统非线性控制理论与方法,暂态能量函数法等,为解决电力系统在大干扰下的安全稳定分析与控制奠定了基础。随着市场机制对电力工业传统的生产方式和管理方式的渗透,电力系统中实施电力市场化运营是电力工业发展的必然趋势。为此,电力系统运行的经济性与安全稳定性一样是电力市场化赖以生存的基础。在电力市场运行机制下,电力系统安全与经济控制理论与方法预期将会成为电力系统的重要研究内容与方向。特别是随着现代数学、运筹学及控制论的深入发展,该领域的研究与上述学科的联系将日益紧密,从而在解决电力系统安全经济问题的同时,必将在基础科学领域迈出重要的一步。

参 考 文 献

- [1] 郭俊波,姚国灿,徐征雄等.我国未来大区电网互联可能出现或该注意的若干技术问题.电网技术,1998,22(6):63—67.
- [2] Y N Yu. *Electric Power System Dynamics*. Academic Press, 1983.
- [3] 卢强,王仲鸿,韩英铎.输电系统最优控制.北京:科学出版社,1982.
- [4] 韩英铎,王仲鸿,陈准金.电力系统最优分散协调控制.北京:清华大学出版社,1997.
- [5] F P deMello, P J Nolan, T F LasKowski et al. Coordinated application of stabilizers in multi-machine power system. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* May/June, 1980, 892—901.
- [6] 卢强,孙元章.电力系统非线性控制.北京:科学出版社,1993.
- [7] 于尔铿.电力市场.北京:中国电力出版社,1998.
- [8] 李文沅.电力系统安全经济运行.重庆:重庆大学出版社,1989.
- [9] Rajeev Alur, Thomas A, Henzinger et al. D. Sontag, *Hybrid Systems III*. Lecture Notes in Computer Science 1066, Springer, 1996.

SYNTHESIS CONTROL THEORY AND PRACTICE OF STABILITY AND ECONOMIC IN POWER SYSTEMS

Sun Yuanzhang

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University Beijing 100084)

Abstract Research background of synthesis control theory and practice of stability and economic in power systems has been introduced in this paper. The research and development in this field have been summarized briefly. The exist problems and their development trends about synthesis control theory of stability and economic in power systems were discussed, and analyzed in the paper. In the mean time the prospective research results in this field are presented.

Key words power system, stability control, economic operation, hybrid systems