

贾宏杰 著

STABILITY OF
POWER SYSTEM WITH TIME DELAYS

电力系统时滞稳定性



科学出版社

电力系统时滞稳定性

贾宏杰 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书重在阐述电力系统时滞稳定性研究中涉及的一些基本概念、适用模型、关键问题和相关分析方法。在简单回顾电力系统时滞环节的一些特点后,重点分析时滞现象带给电力系统稳定性的影响。内容涉及时滞系统稳定性的频域和时域两类分析方法、电力系统时滞稳定裕度计算方法、时滞稳定域的构建及求解方法、时滞电力系统的模型降维以及分岔分析等部分。

本书可作为高等院校电气工程专业的高年级本科生和研究生的参考教材,也可作为从事电力系统稳定性研究的相关技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统时滞稳定性/贾宏杰著. —北京:科学出版社,2016.11
ISBN 978-7-03-050256-8

I. ①电… II. ①贾… III. ①电力系统—时滞—稳定性
IV. ①TM712

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第252482号

责任编辑:赵艳春 / 责任校对:桂伟利
责任印制:徐晓晨 / 封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717
<http://www.sciencep.com>

北京九州迅驰传媒文化有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年11月第 一 版 开本:720×1 000 B5

2017年1月第二次印刷 印张:17

字数:342 000

定价:96.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

时滞是自然界中的一种常见现象，会对动力系统的稳定运行产生重要影响，如：时滞动力系统作为典型的无穷维系统，理论上存在无穷多的特征根，分析甚为困难；时滞会导致系统原有振荡模态发生改变，引起控制器失效；时滞可能诱发多种复杂的分岔现象，甚至导致系统出现混沌等，因此在航空航天、信息通信、工业生产、能源交通、社会调控等诸多领域内，都需要科学考虑时滞因素影响。电力系统作为最大的人造动力系统之一，时滞对其稳定运行也至关重要。本书是探讨时滞现象对电力系统稳定性影响的一本专业书籍，内容涉及电力系统时滞现象的成因和特点、电力系统时滞稳定性分析的适用模型和常见方法、时滞电力系统小扰动稳定域和时滞电力系统分岔现象等内容。通过本书，希望读者对电力系统时滞稳定性有一个基本认知。

作者所在课题组的研究生的科研工作构成了本书的主要内容，对尚蕊、陈建华、曹晓东、谢星星、宋婷婷、姜懿郎、安海云、姜涛、李晓萌、董朝宇、董晓红、王蕾等的辛勤工作表示感谢。在本书撰写过程中，天津大学的余晓丹副教授和穆云飞副教授给予了大力支持和帮助；本书初稿承蒙天津大学余贻鑫院士和王成山教授审阅，提出了很多宝贵的意见和建议，在此一并表示衷心感谢。

本书研究成果曾获得国家自然科学基金项目“基于自由权矩阵的电力系统数据延时可接受性研究”（50707019）和“基于空间分解及变换技术的高维随机时滞电力系统稳定性研究”（51277128）的共同资助。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

作 者

2016年8月

目 录

前言

第 1 章 电力系统与时滞环节概述	1
1.1 时滞动力系统	1
1.2 电力系统时滞环节及变化规律	4
1.2.1 广域协调控制中的时滞环节	4
1.2.2 智能电网场景中的时滞环节	5
1.2.3 电力系统时滞环节的特点	8
1.3 时滞动力系统稳定性分析方法概述	10
1.3.1 时域仿真法	10
1.3.2 线性时滞系统稳定性分析方法	11
1.3.3 基于 Lyapunov 稳定性理论的方法	13
1.4 电力系统时滞稳定分析的需求及本书关注	15
第 2 章 时滞电力系统模型及其稳定性	18
2.1 动力系统基本概念	18
2.2 动力系统平衡点的稳定性	20
2.2.1 平衡点及周期点	20
2.2.2 平衡点的分类	22
2.2.3 稳定平衡点的吸引域	24
2.2.4 Lyapunov 稳定理论初步	28
2.3 动力系统结构稳定性	32
2.3.1 结构稳定性	32
2.3.2 动力系统分岔	32
2.3.3 中心流形定理	33
2.3.4 几类常见分岔	36
2.4 电力系统微分-代数方程模型	41
2.4.1 电力系统模型简化	41
2.4.2 DAE 模型的平衡点及其稳定性	43
2.4.3 DAE 模型的分岔现象	45
2.4.4 电力系统小扰动稳定域及其边界	47
2.5 时滞电力系统稳定性研究所用模型	48

2.5.1	时滞微分方程模型及其线性化形式	48
2.5.2	时滞微分-代数方程模型及其线性化形式	49
2.5.3	时滞系统特征方程及其稳定性	51
2.6	时滞对系统稳定性影响示例	52
2.6.1	单机无穷大等值系统	52
2.6.2	不含时滞情况下的系统特征值及变动轨迹	53
2.6.3	考虑时滞时的系统特征值轨迹	54
2.6.4	小结与讨论	56
2.7	本章小结	57
第3章	电力系统时滞稳定裕度及其求解方法	58
3.1	电力系统时滞稳定裕度	58
3.2	基于 Rekasius 变换的单时滞系统时滞稳定裕度求解方法	60
3.2.1	线性单时滞系统模型及其时滞稳定裕度	60
3.2.2	基于 Rekasius 变换的时滞稳定裕度求解方法	61
3.2.3	算法验证及示例	63
3.2.4	小结	68
3.3	基于矩阵变换技术的时滞稳定裕度求解方法	69
3.3.1	特定方向上的时滞稳定裕度求解	69
3.3.2	全局时滞稳定裕度的求解	70
3.3.3	单机无穷大系统算例	71
3.3.4	WSCC 三机九节点系统算例	72
3.3.5	小结	80
3.4	实用时滞稳定裕度及其求解方法	81
3.4.1	实用时滞稳定裕度	81
3.4.2	实用时滞稳定裕度求解方法	82
3.4.3	单机无穷大系统算例	85
3.4.4	WSCC 三机九节点系统算例	89
3.4.5	小结	92
3.5	本章小结	92
第4章	电力系统 Lyapunov 时滞稳定分析方法	93
4.1	基于 Lyapunov 稳定性理论的时滞系统判稳方法	93
4.1.1	时滞系统稳定性	93
4.1.2	Lyapunov-Krasovskii 判稳方法和 Lyapunov-Razumikhin 判稳方法	95
4.2	线性矩阵不等式	97
4.2.1	LMI 的一般表示	97

4.2.2	LMI 的标准问题	100
4.3	改进自由权矩阵方法	101
4.3.1	自由权矩阵方法原理	101
4.3.2	改进自由权矩阵方法	104
4.3.3	时滞稳定裕度求解	116
4.3.4	算例验证	116
4.3.5	小结	118
4.4	考虑时滞轨迹影响的改进稳定判据	119
4.4.1	改进时滞稳定判据	119
4.4.2	新判据改进机理分析	126
4.4.3	判据待求变量及效率提升分析	130
4.4.4	新判据与基于自由权矩阵判据间的内在联系分析	131
4.4.5	算例验证	135
4.4.6	小结	139
4.5	含积分二次型的时滞稳定性改进分析方法	139
4.5.1	单时滞场景	139
4.5.2	多时滞场景	141
4.5.3	算例验证	145
4.6	本章小结	149
第 5 章	时滞电力系统模型改进与降维	150
5.1	电力系统时滞环节规律分析	150
5.2	时滞电力系统的改进模型	151
5.2.1	CTODE 模型及其线性化形式	151
5.2.2	CTDAE 模型及其线性化形式	154
5.2.3	算例	156
5.2.4	小结	160
5.3	一种单时滞电力系统的模型降维方法	160
5.3.1	模型降维方法概述	161
5.3.2	模型降维方法详细推导	161
5.3.3	算例分析与验证	165
5.3.4	小结	173
5.4	一种多时滞电力系统的模型降维方法	173
5.4.1	系统模型	173
5.4.2	模型降维方法	174
5.4.3	算例	178

5.4.4	小结	183
5.5	本章小结	183
第 6 章	电力系统时滞小扰动稳定域	185
6.1	电力系统时滞小扰动稳定域概述	185
6.2	不含时滞的系统小扰动稳定域	187
6.2.1	电力系统小扰动稳定域边界构成	187
6.2.2	小扰动稳定域边界追踪算法的实现思路	188
6.2.3	小扰动稳定域边界追踪算法的具体实现	188
6.2.4	算例分析	191
6.2.5	小结	197
6.3	含时滞情况下的电力系统小扰动稳定域	197
6.3.1	电力系统时滞小扰动稳定域及其边界构成	197
6.3.2	电力系统时滞小扰动稳定域边界追踪算法	200
6.3.3	算例分析	202
6.3.4	小结	208
6.4	时滞空间中的电力系统小扰动稳定域	208
6.4.1	时滞参数空间中的小扰动稳定域及其边界	208
6.4.2	时滞参数空间中的小扰动稳定域边界求解算法	208
6.4.3	算例分析	212
6.4.4	小结	214
6.5	本章小结	214
第 7 章	时滞电力系统的两类分岔	215
7.1	时滞动力系统的两类独特分岔现象	215
7.1.1	动力系统分岔概述	215
7.1.2	OEB 和 ODB	216
7.2	基于朗伯 W 函数的两类分岔机理分析	218
7.2.1	朗伯 W 函数简介	218
7.2.2	朗伯 W 函数在实数域内的性质	218
7.2.3	朗伯 W 函数与 OEB 和 ODB 的关系	219
7.3	一阶单时滞系统的 OEB 和 ODB	222
7.3.1	用朗伯 W 函数表示的一阶单时滞系统特征方程	222
7.3.2	基于朗伯 W 函数的一阶单时滞系统分岔分析	223
7.3.3	示例分析	225
7.3.4	小结	231
7.4	二阶单时滞系统的 OEB 判断方法	231

7.4.1	OEB 分岔判别方法	231
7.4.2	系统示例	236
7.4.3	小结	242
7.5	高阶单时滞系统的 OEB 判断方法	242
7.5.1	OEB 分岔判别方法	243
7.5.2	高阶时滞系统特征值追踪算法	244
7.5.3	三阶单时滞系统算例	248
7.5.4	WSCC 三机九节点时滞系统算例	251
7.5.5	小结	254
7.6	本章小结	254
	参考文献	255
	后记	260

第 1 章 电力系统与时滞环节概述

电力系统是一个非常复杂的非线性动力系统，时滞（time delay）是其中常见的一种现象，它会对系统的稳定性产生重要影响。本章首先简单介绍动力系统的基本概念，进而分析电力系统中可能存在的时滞环节及其影响。

1.1 时滞动力系统

电力系统是一个典型的动力系统（dynamic system），当动力系统存在时滞环节时，则称时滞动力系统（time delayed dynamic system）。动力系统在数学上有着非常严谨的定义，而本书并非数学专著，因此在这里我们只给出一个形象化的说明。

动力系统：当一个系统未来的发展趋势，可以完全由它先前的运行状态所决定时，这个系统就被称为动力系统。

在数学上，通常选用系统的一组关键动态参量来描述其运行状态，这组关键参量被称为系统的状态变量 $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{R}^n$ 。随着时间的演变， $\mathbf{x}(t)$ 会在相空间上绘出一条 n 维的运行轨迹 $\phi(t; \mathbf{x}_0(t_0))$ ，其含义是在 $t=t_0$ 时，该轨迹刚好通过 $\mathbf{x}_0(t_0)$ 点。因此动力系统指利用当前和以往的系统运行状态，可预测其未来运行轨迹的这样一种系统。动力系统可以是连续的，也可以是离散的，在电力系统中，我们更多关注连续型动力系统。连续型动力系统的运动变化规律，可用如下的一组微分方程（differential equation）加以描述，即

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{x}(t - \tau_1), \mathbf{x}(t - \tau_2), \dots, \mathbf{x}(t - \tau_k), \mathbf{p}, t) \quad (1-1)$$

式中， $\mathbf{p} \in \mathbf{R}^p$ 为系统控制参数； $\boldsymbol{\tau} = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k)$ 为系统时滞向量， $\tau_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, k$ 为系统时滞变量， $\tau_{\max} = \max_{1 \leq i \leq k} (\tau_i)$ ； $\phi(t, \xi)$ 定义了 $\mathbf{x}(t)$ 在区间 $[-\tau_{\max}, 0)$ 上的历史轨迹，即满足 $\mathbf{x}(t + \xi) = \phi(t, \xi), \xi \in [-\tau_{\max}, 0)$ 。

在自然界中，存在很多实际的物理系统，其未来的发展规律只受当前状态决定，而与其先前的状态无关（或近似无关），则此时方程（1-1）可简化为如下形式，即

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{p}, t) \quad (1-2)$$

进一步，当动力系统的运动变化规律与所观测的时刻无关时，相应微分方程的右端将不再显含时间 t ，此时系统模型将进一步简化为如下形式，即

$$\frac{dx}{dt} = f(x, p) \quad (1-3)$$

我们称式(1-3)所描述的动力系统为定常(time invariant)动力系统,而式(1-3)所示模型被称为常微分方程(Ordinary Differential Equation, ODE);当系统中存在随时间变化的参数时,则需用式(1-2)来描述其动态,它被称为时变(time varying)动力系统,相应地,式(1-2)也被称为时变微分方程;而用式(1-1)描述的动态系统则更为复杂,我们称为时滞动力系统,相应的方程被称为时滞微分方程(time delayed differential equation)。当系统中仅包含时滞环节,而不包含其他时变参量时,式(1-1)也常被简化为如下形式,即

$$\frac{dx}{dt} = f(x, x_{\tau_1}, x_{\tau_2}, \dots, x_{\tau_k}, p) \quad (1-4)$$

式中, $x_{\tau_i} = x(t - \tau_i), i = 1, 2, 3, \dots, k$ 。注意,尽管从形式上看,式(1-4)右侧不再显含时间 t ,但由于时滞环节的存在,该系统仍属于时变动力系统。因为除时滞环节外,系统不包含其他时变环节,所以称该模型为定常时滞系统。下面,我们以图 1-1 所示简单电路系统为例,对上述模型进行示例和讨论。

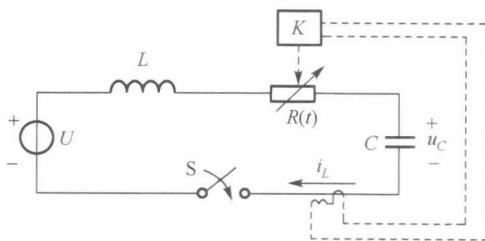


图 1-1 简单 RLC 电路

例 1-1 对于图 1-1 所示电路系统,假设外加电源为恒电压源,电感 L 和电容 C 的大小均不变。由电路的知识可知,当任何时刻该系统电感上的电流 $i_L(t)$ 和电容上的电压 $u_C(t)$ 已知时,整个系统的运行状态即已知,因此它们构成该系统的状态量,即 $x(t) = [i_L(t), u_C(t)] \in \mathbf{R}^2$;当系统外加电压 U 发生变化时,整个系统的运行状态也将发生变化,因此这里的外加电压 U 可考虑为该系统的控制参数,即 $p = U \in \mathbf{R}^1$ 。下面分几种情况来讨论该系统的动态模型。

(1) 情形一,电阻 R 取值为常数:此时由于系统参数 R, C, L 均为常数,由电路知识可知,该系统的动态可由如下常微分方程来刻画,即

$$\begin{cases} C \frac{du_C}{dt} = i_L \\ L \frac{di_L}{dt} = U - R \cdot i_L - u_C \end{cases} \quad (1-5)$$

(2) 情形二, 电阻 R 取值为时变参数: 这里我们假设电阻 R 的取值随着时间会发生变化, 此时系统动态需由如下时变的微分方程来描述, 即

$$\begin{cases} C \frac{du_C(t)}{dt} = i_L(t) \\ L \frac{di_L(t)}{dt} = U - R(t) \cdot i_L(t) - u_C(t) \end{cases} \quad (1-6)$$

(3) 情形三, 电阻 R 为被控制对象: 假设电阻 R 的取值大小受回路电流 i_L 的控制, 满足 $R = K \cdot i_L$ 。但考虑到控制回路中存在一定的数据传输时滞 τ , 则在 t 时刻控制回路形成的控制信号, 实际上是基于 $t - \tau$ 时刻的测量数据形成的, 即 $R(t) = K \cdot i_L(t - \tau)$, 则系统模型将变为

$$\begin{cases} C \frac{du_C}{dt} = i_L \\ L \frac{di_L}{dt} = U - K \cdot i_L(t - \tau) \cdot i_L - u_C \end{cases} \quad (1-7)$$

具体说明如下。

(1) 在情形一下, 系统方程的两端不显含时间 t , 其物理含义是, 对于该电路系统, 若我们现在做一个实验, 与我们两年前、十年前或更长时间以前做同样的实验, 所观测到的规律是完全一样的, 则相关规律不受实验时间的影响。电气领域的很多定理和规律均满足这一性质, 如麦克斯韦方程在一百多年前发现, 现在还成立; 法拉第定理在发现时成立, 我们还在应用, 表明这些规律与我们所观测的时间是无关的。

(2) 在情形二下, 由于电阻的时变性, 情况会略为复杂。我们知道, 白炽灯的内阻就是一个典型的时变参数, 开灯时间不同, 其内阻取值会发生变化。假设图 1-1 中的电阻即代表一只白炽灯的内阻, 则我们在它刚刚点亮和过一会儿再做同一个实验, 其实验结果会因为电阻值的不同而存在差异; 同样, 我们用两个型号一样的白炽灯做上述实验, 一个已用了很长时间, 一个刚刚出厂, 则实验结果一定也存在差异。因此, 当系统中存在时变参数时, 实验结果会受实验观测时刻前“历史”因素的影响。

(3) 在情形三下, 电阻的大小受“远方”测量数据 i_L 的控制, 由于测量系统存在传输时滞, 系统动态最后用一个时滞微分方程来描述。这一场景可看成对电力系统真实场景的一种抽象: 电阻可考虑为电力系统中的一条输电线路, 我们通过安装在其上的控制设备(如 FACTS 设备)来调节其阻值大小, 控制环节的输入量来自远方的测量数据, 存在一定的时滞。不难看出, 情形三与情形二相似, 系统的运行变化规律会与实验时刻前的“历史”有关, 而情形三可看成情形二的一种特殊形式。

上述式 (1-1) 和式 (1-4) 所示的时滞动力系统模型, 将成为本书主要讨论和研究的对象。在现代电力系统中, 当采用广域信号(即远程测量信号)进行控制器设计时, 时滞环节将难以避免, 使得系统的变化规律与定常系统相比会更为复杂。

1.2 电力系统时滞环节及变化规律

电力系统是有史以来最为复杂的人造系统之一，事实上时滞现象存在于电力系统运行控制的很多环节，但多数情况下，人们并不考虑它的影响，这主要基于如下两点考虑。

(1) 传统的电力系统控制环节，多采用本地测量信息作为其控制输入量，由于输入环节的时滞非常小（一般小于 10ms），时滞对分析结果和控制器控制效果的影响完全可以被忽略。

(2) 控制回路中存在的时滞固定不变，此时就可以用一些补偿手段（如 Smith 预估器）直接抵消时滞环节，使得在系统模型中不用再考虑它的影响，从而简化分析和计算过程。

但随着现代电力系统的不断发展，已出现了很多时滞明显而难以忽略的场景，且多数情况下时滞的大小会随时间随机变化，无法通过传统补偿手段直接消除其影响，此时就需要适合的分析手段来科学考虑这些时滞环节的影响。下面将简单回顾一些电力系统中存在明显时滞且需要在分析和研究中加以科学考虑的场景。

1.2.1 广域协调控制中的时滞环节

如前所述，传统的电力系统运行控制手段，均基于本地测量信息来实现，如传统的继电保护设备、励磁控制装置、电力系统稳定器（PSS）、稳控设备、负荷控制装置、FACTS 设备等均直接基于本地测量信息实施就地控制。这类控制环节的特点是，以电力系统的单个元件（如线路、变压器、发电机、用户等）为保护或控制对象，以快速切除被保护元件的内部故障或维持其最佳运行状态为目标，不同的控制环节间不存在协调关系，彼此相互独立。这类控制的优点是，本地测量信息准确且几乎不存在时滞，因此控制环节反应迅速，可有效保障关键设备在故障过程中免受损害；但其缺点也显而易见，控制策略完全基于本地信息，控制执行单元无法掌握系统的整体运行状况，因此极容易出现为了保护局部利益而导致系统全局利益受损的情况。一个典型的例子是 2003 年 8 月 14 日的美加大停电事故，由于在事故发展过程中，数以千计的线路、变压器、发电机的保护装置和低频、低压切负荷装置都基于本地信息进行动作，实施就地控制，缺乏系统级的协调与配合，在故障演变过程中，部分关键的联络线路快速退出，在保护了个别元件的同时，却导致整个系统稳定性状况的不断恶化，并最终引发了系统大面积的停电事故。

为避免上述在故障过程中因保护局部利益而导致全局利益受损情况的发生，一种可能的办法就是在电力系统中采用广域协调控制。而协调控制需要基于系统的全局实时信息来实施，这些信息则由广域测量系统（Wide Area Measurement System, WAMS）来提供。WAMS 是基于全球定位技术（Global Positioning System, GPS）发展起来的实

时测量系统，它的核心设备是相量测量单元（Phasor Measurement Unit, PMU）。PMU 设备可看成一种改进的故障录波器，它采集系统在运行过程中的各类运行数据（如电压、电流、功率、频率等），但与传统故障录波器不同，PMU 为每一个测量信息都打上一个全球唯一的时间坐标信息（由 GPS 提供）。WAMS 则将采集于不同区域的远方测量信息，在统一的时间坐标下加以归并，从而使人们可在时间-空间-幅值三维坐标下，在线实时地观察并分析散布在广袤地域上复杂互联电力系统的全局机电动态，并为广域协调控制系统提供支持。至今，在电力系统中，基于广域测量信息，人们已经提出了多种全局控制策略，在了解系统全局运行状况的情况下，可通过全局优化以决定控制设备的动作策略。

但在广域协调控制过程中，需要科学考虑 WAMS 测量数据中存在的复杂时滞。由于 WAMS 采集的数据，可能来自数千千米之外设备的运行信息，测量数据在传输和处理环节的时滞非常明显，且在通常情况下时滞的大小会发生随机变化；同时，不同测点数据的时滞变化规律和时滞的大小也不相同，如美国 BPA 系统曾对其 WAMS 数据进行分析，当采用光纤通信时，WAMS 数据的单向（上传或下传）采集时滞为 38~40ms；而采用微波通信，该时滞则在 80ms 以上，同时发现采集数据的时滞与测量地点、传输途径存在密切联系，时滞大小随机分布。我国江苏电网 WAMS 工程的实测数据显示，基于国家电力数据网络（SPDNet）的数据时滞在 40~60ms；而当 WAMS 采用由不同介质（如光纤、电话线、数字微波、卫星等）组成的异构通信系统进行数据传输时，时滞将大于 100ms，甚至高达数百毫秒；同时，随着系统运行工况的不同，数据时滞呈现随机变化。已有的一些研究表明，对于电力系统的广域协调控制器，当其控制回路中输入数据存在的时滞大于 20ms 时，即使是固定时滞，也可能会完全改变系统的稳定状况，如导致其主导特征根和主导振荡模式发生变化，导致控制设备由稳定状态变为不稳定等；此外，已有研究也表明，随机时滞对动力系统稳定性的影响较固定时滞的情况要复杂得多，而电力系统广域协调控制所用广域测量数据的时滞均随机变化，如何科学考虑其影响就显得尤为重要。

1.2.2 智能电网场景中的时滞环节

智能电网技术的不断发展，未来可使电力用户通过双向互动的通信手段参与电网的优化运行中，如用户通过响应来自系统的控制信号（或电价信号），主动参与电力系统的削峰填谷或在紧急情况下为系统提供紧急备用等；还能实现可再生能源发电的大规模并网运行（集中并网或分散的分布式并网），从而为减排温室气体、降低环境污染和最终实现人类能源可持续供应提供支持；电力系统将支持大量电动汽车并网运行的要求，不仅为电动汽车提供方便的插拔充电服务，而且通过对大量车载电池系统的协调调度和有效管理，电动汽车系统可为电力系统运行优化及安全防控提供宝贵的储能支持。但无论用户的主动参与、可再生能源的大规模开发还是电动汽车的大规模并网运行，都需深入考虑测量和监控环节时滞对系统稳定运行的影响。

1. 用户通过双向互动技术主动参与电网运行过程中的时滞

图 1-2 给出了国际上一种常见的智能电网功能框架，从功能上考虑，智能电网将由四部分构成：即高级测量体系（Advanced Metering Infrastructure, AMI），高级配电运行（Advanced Distribution Operations, ADO），高级输电管理（Advanced Transmission Operations, ATO）和高级资产管理（Advanced Asset Management, AAM）。其中，基于双向通信构建的 AMI，被认为是智能电网的基础。它由数以万计、具有双向通信功能的智能电表以及在此基础上数据采集分析和监控系统共同构成，主要负责对大量用户运行信息的收集、整理、分析和处理；同时通过所安装的辅助控制手段，帮助电力用户响应来自电力系统的各种控制信号，以实现用户主动参与电网优化运行的目的。

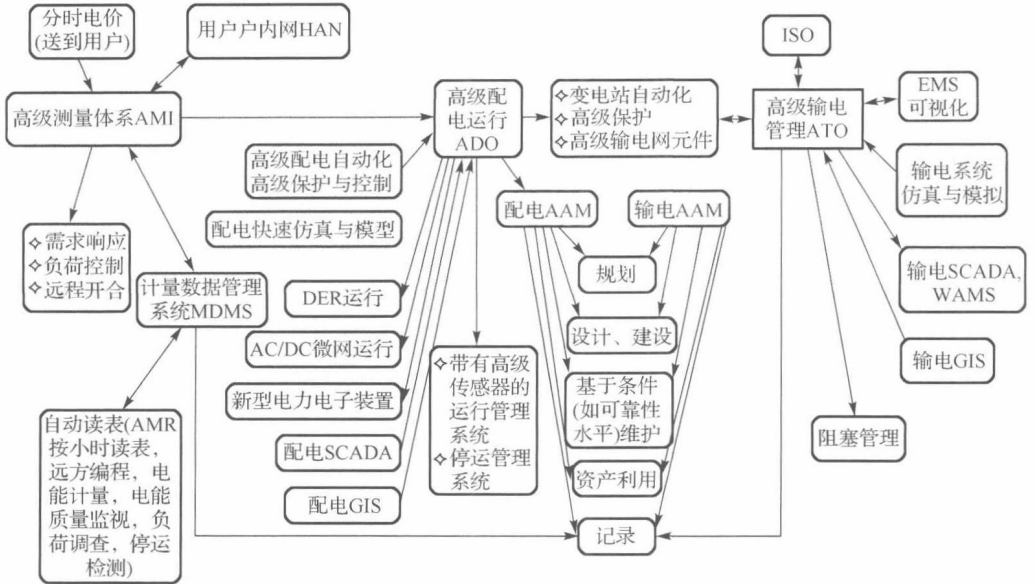


图 1-2 智能电网功能构成

考虑到电力终端用户数量非常庞大，以天津为例：2010 年天津居民户数约为 366.18 万户，再加上各类工业、企业及商业电力用户，若他们未来全部更换为智能电表，实现用户用电信息的实时采集和双向互动，则天津 AMI 系统需采集和处理的实时用户信息将超过 400 万户；已完成智能电表更换的意大利，其 AMI 实时采集用户数已达 3200 万户；而按照国家电网公司的总体规划，到 2020 年，智能电表安装数将超过 5 亿只。面对如此众多的电力终端用户，出于经济上的考虑，我国在构建 AMI 系统时，不可能采用输电网 WAMS 的通信方式，而只可能综合运用各种可行的低成本通信手段来实现，如综合运用电力载波、无线通信（ZigBee, WiFi, GPRS, WiMAX, WCDMA, CDMA2000, TD-SCDMA 等）、电话线（ADSL, HDSL, ISDN）等技术，从而形成了 AMI

系统复杂的异构式通信网络体系。用户数量极其庞大，所用通信手段又形式多样，这将导致AMI系统的数据采集时滞特性极其复杂，如美国现有在建AMI系统的双向通信时滞在数十秒到分钟级。当基于AMI系统进行负荷需求侧响应时，稳态情况下（主要实现削峰填谷），通信回路时滞对系统稳定运行的影响较小；而在大电网故障，人们欲借助AMI系统及负荷需求侧响应为电网提供紧急备用时（此时等效于为电力大系统提供紧急切负荷控制），AMI系统时滞的影响就非常关键。

2. 可再生能源大规模并网运行中的时滞

中国已进入工业化时代，经济发展迅速，但高能耗、高污染排放所带来的负面影响也越来越严重。我国如何在发展自身经济的同时，在环境保护、节能减排和能源可持续发展方面发挥更大的作用，就成为我国未来能源领域发展所面临的根本问题。而实现可再生能源（如水能、风能、太阳能、生物质能、潮汐能等）的规模化开发利用，无疑是解决上述问题的最可能途径。考虑到我国自然资源分布与电力负荷需求分布的不平衡性，现阶段可再生能源规模化开发存在两种途径：①集中式、大容量的规模化开发，如我国西北部在建的数个大规模风电基地和太阳能发电基地，即属于此类；②在用户侧进行分布式的、分散的开发，如在天津中新生态城构建的微网示范工程，目的是实现可再生能源发电在用户侧的就地开发和并网运行。无论何种开发方式，均需考虑控制回路时滞对系统稳定运行的影响。

首先，对于集中式的可再生能源开发。由于这些电能难以在本地被完全消纳，大部分要经长距离输电线路外送到远方（如我国中东部地区）的负荷中心，为消除可再生能源发电间歇性和随机性对输电通道及受端系统的不利影响，更好地消纳这些宝贵的绿色能源，需要受端与源端系统进行很好的协调配合。而两端系统一般相距上千千米，交互信号的时滞不可避免，数据时滞与源端输出电能及受端负荷的随机波动夹杂在一起，会使问题变得更为复杂。因此，在进行可再生能源发电外送控制系统设计时，需要深入研究数据时滞以及两端系统电能随机波动的影响。

其次，对于用户侧分散、分布式的可再生能源开发。为实现未来基于可再生能源的分布式发电设备即插即用的入网需求，同时为有效消除可再生能源发电随机波动对并网系统的影响，一种可能的解决方案，是将分布式发电设备首先构成微网，然后再接入用户侧的配电系统。微网是指由分布式电源、储能装置、能量变换装置、相关负荷和监控、保护装置汇集而成的小型发配电系统，是一个能够实现自我控制、自我保护和自我管理的自治系统，既可以与大电网并网运行，又可以孤立运行。只有对微网内部所包含的各类分布式发电设备进行有效协调，才能真正达到消除可再生能源发电随机间歇性影响、提高终端能源供应品质的目的。但出于经济性的考虑，微网控制系统难以采用输电系统较昂贵的专用通信手段，而需综合运用载波、无线通信及电缆通信等手段来实现设备的协调控制，这一点与前述AMI系统类似；同时微网控制器在设计时，信息采集往往采用传统电力SCADA系统中所用信息轮询模式来实现，数据采

集及控制信号传输中存在较明显的随机时滞,为保证各种分布式发电设备的协调工作,同时保证微网的安全稳定运行,在其监控系统设计时,数据时滞现象必须加以考虑。

3. 电动汽车大规模并网运行中的时滞

电动汽车作为一个潜在的动态储能设备,通过它与电网的有机互动,以及对汽车充放电过程的动态管理,可对电网的优化运行(如削峰填谷、平滑负荷波动、提高设备利用率、降低系统损耗)和故障应对起到很好支撑,因此备受世界各国关注,其核心是电动汽车能量转换及有序充放电技术。目前世界范围内已建成的公共电动汽车充电设施,多采用单向无序电能供给模式(即所谓的V0G模式),在这种模式下,电动汽车作为一种流动的用电设备,无序、无协调地接入电网,电动汽车的流动性和充电的随机性,会增大电网调峰难度,对系统安全运行极为不利。而被人们寄予厚望的两种未来的充放电模式分别为:单向有序充电模式(V1G)和双向有序电能供给模式(V2G),两种模式的特点均要求电动汽车与电网进行实时通信,并根据电网控制信号进行有序充放电,区别仅在于,在V1G模式下,电动汽车不向电网反送电能,仅作为一个可调度负荷出现;而在V2G模式下,每辆电动汽车既可作为一台可协调的用电设备,进行有序充电,又可作为一个储能设备,在必要时根据电网指令向电网反送电能。

无论采用V1G还是V2G模式,电动汽车由于需要与电网进行实时通信,通信系统的时滞必将对其性能产生影响。例如,对于V1G模式的一个典型方案,由美国西北太平洋国家实验室(PNNL)发布的名为“Smart Charger Controller”的电动汽车充电控制装置,配备了采用ZigBee技术的近距离无线通信模块,可接收来自电力企业的电价等信息,目的是自动避开高峰时间充电;而作为V2G的试验样板,美国特拉华(Delaware)大学的Kempton教授所研制的配备无线通信手段的电动汽车,可接收来自电网的调度命令,从而作为调频和备用发电设备。两种试验车型,均基于无线手段与电网进行数据通信,而电网命令则通过公共Internet网络进行传输,考虑到电动汽车充电地点的不确定以及Internet拥塞程度随时间的不断变化,电动汽车与电网的双向互动通信呈现出复杂的时滞特性。未来,当大量电动汽车与电网进行实时交互时,必须考虑通信回路复杂时滞对系统稳定运行的影响。尤其在V2G模式下,电动汽车被用于电力系统的一种紧急控制手段,在严重故障出现后为电网提供储能服务,此时控制回路的时滞将会对系统稳定运行产生重要影响,需要特别加以关注。

1.2.3 电力系统时滞环节的特点

通过上述分析不难看出,无论已有的广域测量系统,还是未来智能电网中的双向互动环节,数据采集中的时滞将非常明显。而已有研究表明,时滞是造成系统工作性能恶化,引发系统振荡、失稳乃至崩溃的一个重要原因,若不加以科学考虑,即使系统只存在很小的随机时滞,也可能导致原本稳定运行的系统出现失稳,因此深入研究电力系统各类时滞对其稳定运行的影响意义重大。