

# 系统控制漫谈

## 系统论、中华文化与SYNDEM<sup>1</sup>电网

钟庆昌 美国伊利诺伊理工学院；SYNDEM公司

世界是一个有机的整体，由大小、各种各样的系统组成。各系统又由很多子系统组成。比如，人是一个系统，家庭是一个系统，社会是一个系统；人是家庭的一个子系统，家庭是社会的一个子系统。这些系统之间以及系统内部各子系统之间是相互联系、相互依赖、相互作用和相互制约的，各个（子）系统自身也是不断发展变化的。系统论是从系统的角度观察和研究客观世界的学科，涉及自然科学和社会科学的方方面面，其核心是探究适用于各类系统的本质规律，做到举一反三，从而提高人类认识和优化各类系统的能力。

任何一个系统，其关键有二：一是系统结构，二是系统内各子系统之间的相互作用机制，这二者的结合决定了该系统的发生、发展（行为）和消亡。

从系统论的角度来说，无论是具有成千上万节点的电力系统（也称电

网），还是拥有五千多年历史文化的中华文明，均是由许多相互作用的子系统所构成的复杂系统。虽然二者看似差异巨大，但却存在着很多相似的本质规律。本文将从系统论出发，阐述中华文化之所以能够持续五千多年、不断发展壮大的系统级精髓，并提出采用中华文化的精髓来构建世界电网，解决当前世界电网发展面临的难题，最终建成“同步民主”（SYNDEM）电网，实现世界电网的大统一和可持续发展。

### 1 世界电网发展面临的根本问题

电与我们的日常生活密切相关，电网已经成为一个国家最根本的基础设施之一。通过100多年的发展，电网已经成为了人类历史上规模最大、结构最复杂的人工系统，支撑着全世界生产和生活的方方面面。2000年，美国国家工程院将电气化选为了二十世纪最伟大的工程成就，电网的重要性毋庸置疑。

现代电网还在不断发展与变化。一方面，电网规模仍在不断扩大。欧洲将通过高压输电线路把各成员国的电网连成一体，美国将通过高压直流输电把东部电网、西部电网和德州电网连成一个大电网，中国自2006年以来更是建

<sup>1</sup> SYNDEM的意思是同步民主，是英文Synchroniz-(同步)和Democratiz-(民主)的组合简称。

成了图1所示的19条特高压线路，形成了覆盖全国大部分地区的超级电网，并于近几年牵头提出了“全球能源互联网”的发展战略，从而实现全球电网互通互济，这将进一步扩大电网的规模。

另一方面，电网也在逐渐向“去中心化”或“民主化”发展。越来越多的小容量分布式电源和新型可控负荷正逐渐接入电网，如可再生能源发电、储能系统和电动汽车等等。这些分布式电源和负荷一般归属于各个独立的用户，其运行方式具有较大的自主性，因而不便于电网调度控制。随着可再生能源的发展和互联网技术的进步，电网的参与者将不仅仅是大容量的传统发电厂，同时也包括大量的分布式电源和负荷。

在上述发展趋势下，电网的稳定运行受到了极大的挑战，甚至会导致大停电事故，影响大量的用户。例如，2003年北美大停电中，5500万用户受到影响；2009年巴西和巴拉圭大停电中，8700万用户受到影响；2012年的印度大停电中，6亿7000万用户受到影响。在一些停电事故中，分布式可再生能源有可能是重要的诱因。例如，2016年澳大利亚



图1 全国已投入使用的特高压线路<sup>[1]</sup>

大停电的调查报告指出，造成南澳大利亚大停电的一个重要原因是“系统中基于逆变器接入的非同步电源的增加”。

大规模分布式电源和负荷接入电网以后，如何确保电网的稳定性成为了一个极具挑战性的问题。为了彻底解决这个问题，必需要先看清楚问题的本质。一方面，新能源和可控负荷的接入大多需要通过电力电子设备。另一方面，电网也要求更加高效、可靠地运行，这当然就需要对电网进行控制。由于电网中输送的交流电一般按照50赫兹或60赫兹的频率变化，目前最佳的控制手段是通过电力电子设备来实现。因此，当前电力系统发展的本质是电力系统正在从一个由电机占主导的系统转变为一个由电力电子设备占主导的系统，而且这些电力电子设备是不同步的参与者。这与传统的以“同步”为核心的电力系统显然是不兼容的，成为了当前电力系统所面临的根本挑战。

在认识到电力系统发展的本质和面临的根本挑战后，我们可以发现，表面上这是一个电力问题，但是本质上却是一个系统问题，是一个涉及数百万甚至上亿个参与者的大系统问题。如何解决这一问题？有什么系统方法可以用来处理如此大规模的问题？

中华民族是世界上人口最多的民族，更是唯一一个具有5000多年连续历史文化的民族。如果说电力系统是人类在自然科学和工程领域

所创造的最大、最复杂的系统，那么中华文化则是人类在社会科学领域所形成的最大、最复杂的系统。从系统论来看，中华民族的发展历史和中华文化的演变进程可以帮助我们解决世界电网所面临的挑战。

## 2 从系统论看中华文化和中华民族的发展

### 2.1 从春秋战国的百家争鸣（“民主”）到秦始皇一统天下（“同步”）——“同步民主”系统结构的形成

公元前770年，周朝国都从镐京（今陕西省西安市）东迁至雒邑（今河南省洛阳市），史称东周，前后延续500多年，直到公元前221年秦始皇统一中国。这一段时间又被称为“春秋战国”时期，在中国的历史发展和文化演变中发挥了关键的作用。这一时期是中国社会制度转变的关键时期，铁器开始广泛使用，农业有了长足的发展，人口不断增长，铜钱开始流行，商品经济和商人阶层开始出现，教育向平民普及，贵族与平民的界限也被冲破。

后人在谈论这个时期时，常常会用“百家争鸣”来形容，当时很多社会制度已经体现出了很多现代“民主”的特点。比如，各诸侯国在政治、经济、军事、外交等各方面是完全独立自主的，已有成熟的诸侯会盟机制来解决诸侯之间的重大事务。据《左传》记载，春秋时期诸侯会盟至少二百多次。人才可以自由流动，各种学术思想可以在不同的诸侯国之间传播，涌现出了诸如老子、庄子、孔子、孟子、荀子和墨子等一大批学术思想的代表人物，形成了诸如道家、儒家、墨家和法家等学术流派，成为了中华文化演变过程中的一大奇观、世界文明发展的一座高峰。

从系统论来说，“民主”的本质是求异，结果是发散的，是不稳定的。春秋战国时期，“民主”激发了大家的创意，但却带来了各诸侯国之间的长期纷争。尽管存在着“诸侯会盟”等调解渠道，但诸侯国之间战事不断。据史书记载，春秋二百四十多年间，有大小战事四百八十多次，有三十六名君主被杀，五十二个诸侯国被灭。虽然文化发展迅速，但是春秋战国时期实际上充斥着混乱、血腥

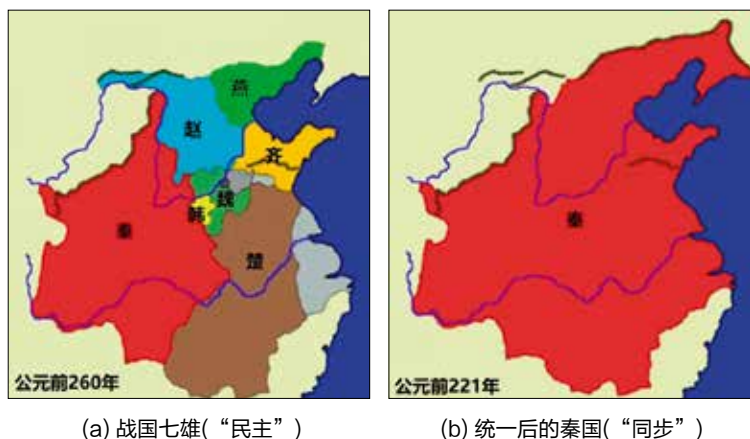
和战争。

“物极必反。”公元前230年，秦王嬴政开始了历时十年的统一中国战争，远交近攻，逐个击破。最终在公元前221年，随着齐国的投降，秦国结束了500多年来诸侯长期割据的局面，建立了中国历史上第一个统一的中央集权君主统治国家（如图2所示<sup>[2]</sup>）。秦始皇不仅统一了中国的版图，更在政治、经济等领域建立了统一的标准。如统一文字，立小篆和隶书为全国通用的字体，实现“书同文”；统一车轴距，规定车辆上两个轮子的距离为六尺，实现“车同轨”；统一度量衡和货币，规定六尺为步、二百四十步为亩等，实现“度同制”；以及统一道德规范，以法为教，建立相对一致的风俗习惯和信仰，实现“行同伦”。在一系列政策之下，中国的各方面达到了“同步”，实现了从分散向统一的结构转变。

从系统论来说，“同步”的本质是求同，结果是收敛的，是稳定的。秦始皇统一中国完成了中华文化发展从发散到收敛、从民主到同步的一个完整周期，把异构的中华民族和中华文化变成了同构的系统，形成了“同步民主”这一对立统一的系统结构。这为中华文化长期屹立于世界文明之林提供了系统理论的根本支持，为中华民族的发展和繁荣奠定了结构性的稳定基础。

### 2.2 中华文化的精髓——“和谐”系统机制的确立

春秋战国时期中华文化在极其“民主”的氛围下得到快速发展，之后秦



(a) 战国七雄(“民主”) (b) 统一后的秦国(“同步”)

图2 中国历史发展从“民主”到“同步”的过程形成了“同步民主”的系统结构

始皇统一中国所带来的各方面“同步”，实现了多样性的统一，为炎黄子孙注入了“统一”和“和谐”的基因，使不同个体之间相互协调、相互适应、相互平衡的重要性得到了充分的认识。从系统论来说，一个系统的发展历程是其自身结构不断优化、各子系统不断协调的过程。“和谐”就是各个子系统相互作用后达到系统平衡，在有外部干扰时只需要进行适当的调节就可以维持系统平衡。在这种“和谐”或平衡的状态下，能量消耗最小，有利于优化资源的配置。中华民族能够在2000多年前就摸索出如此优化的系统结构，确实伟大。

“和谐”的思想起源于先秦，形成于春秋时期，是道家追求的理想境界。天人合一、和谐是世界存在、发展、变化的基本规律。老子在《道德经》中说：“和曰常，知和曰明。”意思是说，“和谐”是天地万物的常态，能认识到这一点是需要智慧的。庄子在《庄子·让王》中说：“日出而作，日入而息，逍遥于天地之间而心意自得。”强调的是人与自然的和谐。不但道家讲和谐，儒家、墨家乃至佛家也都讲和谐。孔子在《论语·学而》中有“礼之用，和为贵，先王之道，斯为美”的论述，在《论语·子路》中有“君子和而不同，小人同而不和”的记载，强调了“和”在于多样性的统一而不是单一性的重复。墨子在《墨子·兼爱》中说，“视人之国，若视其国；视人之家，若视其家；视人之身，若视其身。是故诸侯相爱，则不野战；家主相爱，则不相篡；人与人相爱，则不相贼；君臣

相爱，则惠忠；父子相爱，则慈孝；兄弟相爱，则和调。天下之人皆相爱，强不执弱，众不劫寡，富不侮贫，贵不敖贱，诈不欺愚。”佛家信奉的“色即是空，空即是色”讲的也是包容万物。

经过两千多年的发展，“和谐”和“统一”的基因已经深深植入每个炎黄子孙的脑海，影响着每个人的修养、社会伦理道德以及国家治理等方方面面，成为了中华文化的精髓和最根本的系统机制。在2008年的奥运会开幕式中，“和”作为中华文化的精髓向全世界传递（见图3），以期促进世界的和谐。

### 2.3 “同步民主”这一系统结构以及“和谐”这一系统机制对中华民族的根本作用

如前所述，通过春秋战国时期的“民主”和秦始皇统一中国的“同步”两个阶段，中华民族形成了“同步民主”这一系统结构以及“和谐”这一系统机制。“同步民主”的系统结构确保了系统的结构稳定性，“和谐”的系统机制则确保了系统在面对重大突发事件时各个个体能够做出相应的反应来维持系统的“和谐”（平衡）。

这二者的结合带来了中华民族的巨大发展和繁荣，让中国在过去20个世纪中有18个世纪是世界上最大的经济体<sup>[3]</sup>。印刷术、造纸术、指南针和火药等四大发明相继出





图3 2008年北京奥运会开幕式上的“和”<sup>[3]</sup>

现，为世界的发展做出了重大贡献。这也为当今五十六个民族、十四亿同胞和睦相处提供了理论保障。

这二者的结合也帮助中华民族忍辱负重、历经难关。中国历史上朝代几经更替，也有数次外敌入侵，但是中华民族的根基稳定性没有受到影响。特别是从1840年第一次鸦片战争到1949年新中国成立的100多年时间里，中华民族受尽屈辱，一个个帝国主义国家侵略、瓜分中国，掠夺中国的资源，奴役中国的人民。但是，中华民族没有屈服，中华儿女没有被吓倒。各行各业的中华儿女“同步”地、“民主”地探索救国之路，投入到反帝、反封建、反侵略的洪流中，最终取得了胜利，使中华民族再次步入正轨。毛主席在《论联合政府》中说，“人民，只有人民，才是创造世界历史的动力。”具有“和谐”和“统一”基因的炎黄子孙更是如此。

“同步民主”这一系统结构以及“和谐”这一系统机制的结合是中华民族能够屹立于世界文明之林的根本原因，也是中华民族能够存续下去之“道”。老子说，“道生一，一生二，二生三，三生万物。”有“道”在手，通往未来的路途可能艰辛，但是不必担心未来不来；有“道”在手，也不必担心任何意外事件能够动摇中华民族的根基。

### 3 “同步民主”（SYNDEM）电网的理念和实现

世界电网正在经历着从集中式发电到分布式发电的“民主化进

程”，未来电网的参与者将不仅仅是大容量的传统发电厂，也会包括大量的分布式电源和负荷，这与春秋战国时期的群雄争霸很类似。常规电源不会马上消失，新能源正在不断接入，电网各个个体具有不同的特性，必将带来电力系统的稳定问题。因此，电网纯粹的“民主化”是行不通的，必须对电网的各个个体进行控制，以确保电网的稳定。

在前面一节谈到，“同步民主”这一系统结构以及“和谐”这一系统机制的结合是中华民族能够屹立于世界文明之林的根本原因，也是中华民族能够存续下去之“道”。那么能否采用这二者来构建世界电网呢？答案是肯定的，这就是“同步民主”（Synchronized and Democratized）电网，简称SYNDEM电网<sup>[5]-[9]</sup>。

实现SYNDEM电网的关键是能够采用一个共同的系统机制把不同种、不同类的发电设备和用电设备统一起来。电网100多年的发展表明，常规同步机（Synchronous Machine, SM）的同步机制能够使电网保持稳定，能够使电网不断发展壮大，这一机制与前面谈到的中华文化中的“和谐”机制本质上是一样的，具有自平衡

的作用，能够保持系统的稳定。由于分布式电源和大量负荷都需要通过电力电子变流器接入电网，只要把这些电力电子变流器控制成为虚拟同步机 (Virtual Synchronous Machine, VSM)<sup>[10]-[12]</sup>，就可以实现电网的同构化和大统一，实现SYNDEM电网。

SYNDEM电网的系统结构如图4所示，常规电站（包括火电站、核电站、水电站和自备电厂等）还是像原来一样通过常规同步机接入输配电网，分布式电源（包括风力发电、太阳能发电、直流微网、储能系统、电动汽车等）通过虚拟同步机接入电网，大量的负荷（比如电子设备、电机、照明等）也通过虚拟同步机接入电网。这样，从输配电网看到的大都是同步机，要么是常规同步机，要么是虚拟同步机，这些同步机通过输配电网相互作用，共同维护电力系统的稳定。因此，通常被称为“垃圾电源”的分布式电源也就成为了电网稳定的积极贡献者，彻底理顺了电网和电源的关系，为大规模消纳分布式电源提供了基础。同时，负荷也能够像电源一样参与电网的调节，为改善电网稳定性提供了另一条途径，为我国东南沿海大直流受端电网的稳定提供了一种解决方案。SYNDEM电网中的每一个参与者都具有一定的自主性，可以利用分布式电源和负荷的灵活性。每个电源，无论容量大小、分布式或集中式，都将得到平等对待，不存在主从、优劣之分，能够



图4 SYNDEM电网的系统架构[5]-[9]

真正实现电力系统的“民主化”。更为重要的是，这些参与者都遵循同步机的同步机制，从而实现“同步民主”，“和谐”地参与电网调节，维护电网的稳定。

#### 4 结束语

本文从系统论的角度来阐述中华民族经过春秋战国时期的“民主”和秦始皇统一中国的“同步”两个阶段后形成了以“同步民主”为特征的系统结构，以及以“和谐”为核心的系统机制。“同步民主”这一系统结构确保了系统的结构稳定性，“和谐”这一系统机制则确保了系统在面对重大突发事件时各个个体能够做出相应的反应以维持系统的“和谐”（平衡）。“同步民主”这一系统结构以及“和谐”这一系统机制的结合是中华民族能够屹立于世界文明之林的根本原因，也是中华民族能够存续下去之“道”。本文进一步阐明，可以利用这二者来构建世界电网，建成“同步民主”（SYNDEM）电网，解决世界电网面临的根本问题，实现世界电网的大统一，助力全球的可持续发展。更多技术细节请访问[www.syndem.com](http://www.syndem.com)。

## 参考文献

- [1] 特高压输电: 热潮后的冷思考. 中外对话. <https://www.chinadialogue.net/article/show/single/ch/10376-Sparks-fly-over-ultra-high-voltage-power-lines>. 数据来源: Lantau Group, news reports.
- [2] [https://en.wikipedia.org/wiki/File:De\\_stridande\\_staterna\\_animering.gif](https://en.wikipedia.org/wiki/File:De_stridande_staterna_animering.gif)
- [3] 2008年北京奥运会开幕式04-文字(活字印刷). <https://www.youtube.com/watch?v=hUS8n2iSn40>.
- [4] A.Lovins and J. Creyts, Three Energy Gamechangers for China and the World, Part 1: A Focus on Oil-Free Mobility, <https://www.rmi.org/news/three-energy-gamechangers-china-world-2/>. September 30, 2014.
- [5] Q.-C. Zhong, Synchronized and Democratized Smart Grids To Underpin The Third Industrial Revolution, in Proceedings of The 20th IFAC World Congress, Toulouse, France, July 9-14, 2017.
- [6] Q.-C. Zhong, Power Electronics-enabled Autonomous Power Systems: Architecture and Technical Routes, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol.64, no.7, pp. 5907-5918, 2017.
- [7] Q.-C. Zhong, Virtual Synchronous Machines - A unified interface for smart grid integration, IEEE Power Electronics Magazine, vol. 3., No. 4, pp. 18-27, Dec 2016.
- [8] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 336-348.
- [9] Q.-C. Zhong, Power Electronics-Enabled Autonomous Power Systems: Next Generation Smart Grids, Wiley-IEEE Press, to appear.
- [10] Q.-C. Zhong and G. Weiss, Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol.58, no.4, 1259-1267, 2011.
- [11] Q.-C. Zhong and T. Hornik, Control of Power Inverters in Renewable Energy and Smart Grid Integration, Wiley-IEEE Press, 2013.
- [12] Q.-C. Zhong等著 钟庆昌等译, 新能源接入智能电网的逆变控制关键技术, 机械工业出版社, 2016。