

我国变频及应用技术和产业发展路线图（一）

清华大学教授，新概念汽车研究院副院长
中国电源学会电气化交通专委会主任 李永东

编者按：国家“双碳”目标要求大力推广节能减排技术，交流电机采用变频调速后节能可达到 15-40%，节能效益巨大，一直是国家节能的重要举措；变频电源是国家重大工程高端装备的核心部件，广泛应用于国防、能源、交通、冶金、化工、机械制造中；交流伺服变频传动是高端制造中机器人、数控机床的核心部件；“变频家电”悄然走进千家万户。

在此背景下，以清华大学电机系李永东教授领衔的《我国变频及应用技术和产业发展路线图》重磅出炉。本报告立足新一轮科技革命背景下我国变频及应用产业发展，识别变频及应用产业技术发展方向和趋势，提出面向 2035 年变频及应用产业发展愿景，确定近期优先行动项目，凝练近中期关键核心技术研发需求，制定具有前瞻性、引领性的技术发展路线，为我国变频及应用产业的持续、快速、健康发展提供技术指引。

李永东现任清华大学电机系教授，博士生导师，先进电能变换与电气化交通团队负责人，清华大学新概念技术汽车研究院副院长。IEEE IAS Beijing Chapter Chair, IET and CES Fellow, 中国电工技术学会会士兼电力电子分会副理事长，中国电源学会常务理事兼电气化交通专委会主任，中国自动化学会电气自动化专委会副主任。2022 年 4 月荣获俄罗斯自然科学院外籍院士，同年 7 月李永东教授再次当选为俄罗斯工程院外籍院士。长期致力于高性能、大容量交流电机控制系统和应用；交流电机矢量控制和直接转矩控制理论及其数字化实现；高压大容量变换器及其在节能、高铁牵引和船舶推进等电气化交通系统中的应用。

报告分三期（2022 年 11 期、12 期和 2023 年 1 期）先后刊登本刊特约《变频器世界》编委会主任李永东教授的文章。以飨读者！

【中图分类号】TM921 【文献标识码】B 【文章编号】1561-0330(2022)11-0073-04

目录

1 编制背景及过程

2 变频产业与技术发展现状与趋势

3 家用电器变频技术的发展现状及路线图

4 数控/机器人伺服系统的发展现状及路线图

5 工业及通用变频系统的发展现状及路线图

6 中高压大容量变频系统的发展现状及路线图

1. 编制背景及过程

1.1 编制意义

“双碳”目标要求大力推广节能减排技术，交流电机采用变频调速可以节能 15-40%，节能效益巨大，一直是国家节能的重要举措。

变频电源是国家重大工程高端装备的核心部件，广泛应用于国防、能源、交通、冶金、化工、机械制造中，如：大型冷/热连轧机传动、工矿企业风机/泵负载和提升机、西气东输大型压缩机、南水北调大型扬水泵、国防风洞试验机、核电站给水泵等驱动系统中。

交流伺服变频传动是高端制造中机器人、数控机床的核心部件。

变频电源还可用于家电压缩机驱动，形成变频空调、变频冰箱、变频洗衣机、变频吸尘器等，“变频家电”走进千家万户。

1.2 编制背景

在中国电源学会领导下，希望在引领变频及应用产业和技术创新及引导社会资源集聚等方面发挥重要作用

“碳达峰和碳中和”压力下，要求尽快启动变频及应用产业和技术路线图编制

路线图编制工作将有力地支撑我国面向 2035 年的变频及应用规划研究及十四五科技规划的研究工作



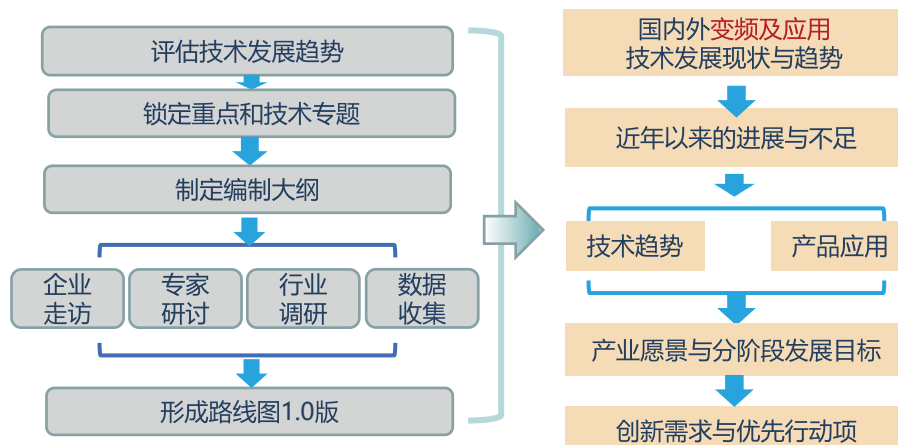
2021.01-08：持续开展了深化行业调研工作；

2021.09-12：各个课题组不断修改完善路线图报告；

2022.01-03：提交学会，和其他部分汇总将于近期出版。

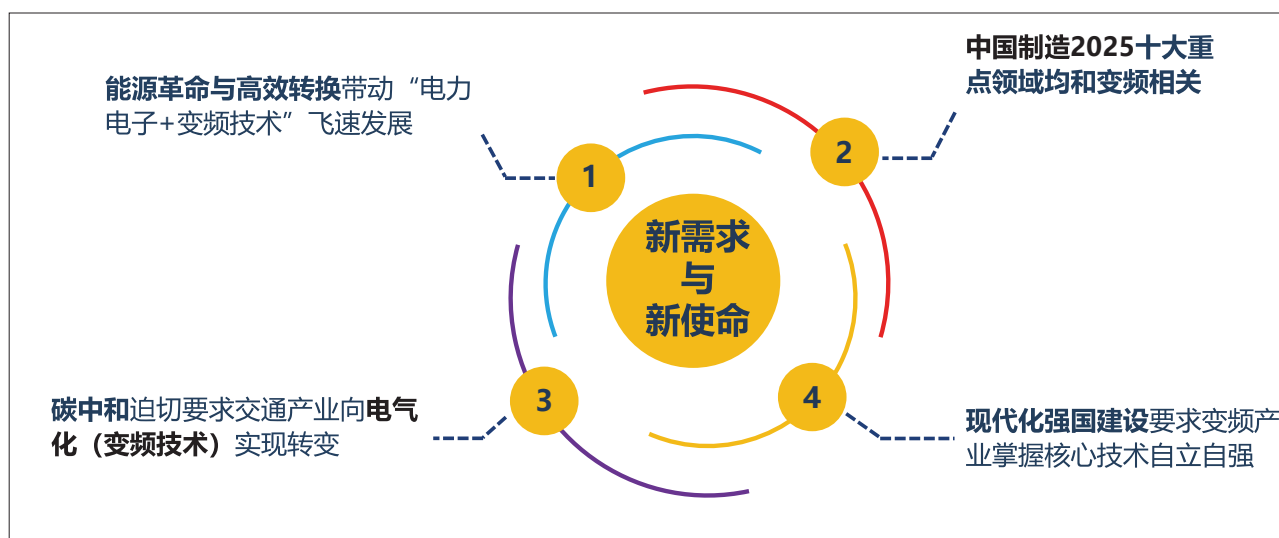
1.3 编制目标与思路

立足新一轮科技革命背景下我国变频及应用产业发展，识别变频及应用产业技术发展方向和趋势，提出面向 2035 年变频及应用产业发展愿景，确定近期优先行动项目，凝练近中期关键核心技术研发需求，制定具有前瞻性、引领性的技术发展路线，为我国变频及应用产业的持续、快速、健康发展提供技术指引。



2. 变频产业与技术发展现状与趋势

2.1 我国变频产业技术发展的新需求和新使命



2.2 变频产业技术发展现状

变频器极低速、极低频运行中的问题如下：

01

现象：电机运行在发电状态时，当电机定子电流频率接近0Hz时，电机很难保持稳定。

本质原因：
当定子电流频率为0Hz
时电机转速无法估计

02

现象：当电机由电动状态切换到发电状态时，在切换过程中，电机失控飞车。

04

现象：电机长时间运行在低速发电状态时，有可能出现飞车现象。

■ 变频器极低速、极低频运行：切割机、矿车、起重机等。

- 切割机切割物体时刀片需缓慢移动电机处在低转速运行状态；
- 矿车在运矿过程中会停留在斜面此时电机处在零转速状态；
- 起重机电机会经常处在零电流频率状态，电梯电机频繁起制动。

学术界知名学者的相关研究现状

针对的问题	研究方案	研究不足
电机模型法在定子电流频率为0 Hz时的系统发散问题	通过改进现有的磁链观测器，提升观测精度	只能使系统在零定子电流频率处空载短时间（小于1s）运行
电机模型法在定子电流频率为0Hz时的系统发散问题	向电机注入高频信号，利用转子凸极效应或互感饱和效应获得转子位置信息	感应电机转子凸极效应或互感饱和效应不明显，很难获得正确的转子位置信息。
高频信号注入对电机转子凸极效应设计要求很高的问题	向电机注入低频信号，利用互感饱和效应获得转子位置信息	感应电机转子凸极效应或互感饱和效应不明显，很难获得正确的转子位置信息。

2.3 变频产业技术发展趋势

永磁电机控制正往高精度、高动态、高转速、高压大功率（高铁，船舶）领域扩展



注塑机对驱动器的要求：

正反转运行（低速及零速）

转速响应快速：启动时间 50ms

转速控制精度： $< \pm 0.2\%$

运转噪音低：理想状态下低于 70 分贝

控制性能要求：

低速零速大转矩（2 倍过载）

快速升降速

抗阶跃负载扰动能力

对动态性能要求较高

西门子、安川等公司正在努力研究

“IPM 电机 + sensorless”替代传统“SPM 电机 + sensor”的驱动模式，以进一步降低成本。高稳态精度、动态品质 IPM 电机无传感器控制技术具有很好的应用前景！

技术发展趋势

极低转速（零速、零频）矢量控制策略。包含观测器法、信号注入法。涉及零速、零频条件下转速和磁链观测技术、变频器非线性误差补偿、电机参数在线辨识、负载惯量辨识、控制参数自整定及控制参数误差敏感性研究。

异步电机高速弱磁控制策略。涉及低载波比条件下的电流控制性能及转速观测精度提升，电机参数在线辨识技术，高精度离散化策略研究。

高功率/高转矩密度、高可靠性、高故障容限异步电机变频器。涉及 IGBT、电流传感器、速度传感器、电解电容的故障诊断、容错控制、寿命预测、健康管理。

基于碳化硅、氮化镓开关器件及FPGA的变频器。涉及基于FPGA的高速电流环设计、永磁电机高精度、高动态、高转速、大功率传动控制等

（未完待续）