

电气工程装备采用物理结构的优势探讨

伍泽涌

(成都祥和云端节能设备集团有限公司, 四川 成都 610000)

摘要: 光伏、风电等新能源大规模并网已成为电力系统发展的常态,但其发电出力具有显著的随机性、间歇性与波动性,给电网的电能质量与运行稳定性带来严峻挑战。传统电力电子型电气装备虽应用广泛,但存在着可靠性不足、高频适应性差、谐波干扰严重、故障率高、散热性差等等问题,难以有效应对新能源并网引发的复杂扰动。祥和节能集团(成都祥和云端节能设备集团有限公司)的纯物理结构电气装备,基于纯物理的虚拟电容技术、双向阻隔技术、反常霍尔效应技术,主回路上无实体电容或电力电子器件,通过特种电磁结构实现调流调压、滤波、抗冲击、抗叠加等电气功能。本文以云智慧抗冲调流型变压器、祥和电保镖——祥和安全保护装置及祥和中央节能保护装置为研究对象,阐述纯物理结构虚拟电容的技术原理与优势,并与全电力电子式高频可控变压器进行对比,分析电子器件类装备的技术瓶颈。研究表明,纯物理结构电气装备具备环境适应性强、抗冲击能力高、故障率极少、运行稳定可靠、谐波污染极轻、运维成本极低等综合优势,能够有效平抑新能源发电功率波动,提升光储并网电能质量,升级台区运行综合水平,抵抗用电端设备启停冲击,在现代电气工程领域具有重要的应用价值与推广前景。

关键词: 电气装备; 物理结构; 虚拟电容; 新能源并网; 电力电子设备; 运行可靠性; 新型电能质量; 台区升级改造; 新能源场站运行品质

一、引言

在“双碳”战略目标驱动下，我国电力系统正加速向高安全、高稳定、高效率及智能化方向演进。风电、光伏等新能源装机体量持续扩大，已成为电力供应的主体来源之一。然而，光伏与风电属于典型的气象约束型电源，其发电出力完全受制于光照强度、风速大小、昼夜交替及季节变化等自然因素，具有不可预测、不可调度、波动剧烈、间歇启停等固有特性，行业内常称之为“靠天发电”。

这种出力特性对电网造成显著冲击：并网点电压频繁闪变、频率持续偏移、谐波畸变率超标、三相功率失衡等问题频发，同时给电网的调压、调峰及新能源消纳带来巨大压力。更为严重的是，剧烈的功率冲击容易导致并网设备过载、发热甚至损坏，对配套电气装备的动态稳压能力、冲击缓冲能力、故障防护能力以及长期耐受能力提出了远超传统同步发电机接入场景的严苛要求。

当前电气装备主要分为电力电子器件架构与纯物理结构架构两大技术路线。电力电子型装备依托半导体器件与高频开关技术，具有体积小、集成度高等优点，但受限于材料特性与高频工作机理，普遍存在以下问题：器件长期运行可靠性不足，散热与绝缘矛盾突出，多模块控制稳定性差，且自身工作会产生瞬流、浪涌、谐波与电磁干扰，容易对电网形成二次污染。这些问题在新能源频繁波动的工况下被进一步放大，使得电力电子装备难以根本解决“靠天发电”带来的并网难题。

与之不同，纯物理结构电气装备基于虚拟电容技术，通过特种绕组与共振架构等纯物理结构实现电容功能的等效替代，无需任何实体电容或电力电子器件。该技术路线从硬件本源上规避了电子器件老化失效、温湿度敏感、抗冲击与抗叠加薄弱、故障率高等缺陷，理论上具备更高的环境适应性与运行可靠性。

二、纯物理结构虚拟电容技术概述

2.1 虚拟电容的基本定义

虚拟电容是一种区别于传统实体电容的新型等效电气技术。传统电气系统中，稳压、储能、无功补偿、滤波及抗冲击等功能必须依靠电解电容、薄膜电容等实体元器件实现。而纯物理结构虚拟电容技术无需任何实体电容元件，仅通过特殊的物理结构设计（如特种绕组与共振架构的组合），依托电磁耦合与结构等效原理，完整复现电容器的电气特性，达到“有电容之功能，无电容之实体”的技术效果。

需要指出的是，行业内也存在基于算法控制的电子式虚拟电容，其本质是通过电力电子变换器模拟电容的外特性。而本文所述的物理结构虚拟电容完全摒弃控制芯片与高频开关组件，依赖物理硬件本身实现等效功能，两者技术路径有本质区别。物理结构方案的稳定性更为突出，可全天候自适应工作，不存在软件失效或控制延迟问题。

2.2 纯物理结构虚拟电容的技术优势

相较于传统实体电容与电子式电容模块，物理结构虚拟电容实现了功能保留与缺陷消除的统一，具体优势如下：

（1）环境适应能力极强。传统电容的介质对温度、湿度敏感，抗冲击抗叠加能力弱，长期运行易出现容量衰减、漏电流增大乃至击穿故障。物理结构虚拟电容不含敏感电子材质，电气性能不随环境温湿度显著变化，可在野外光伏电站、山地风电场、高温车间、潮湿厂区等严苛条件下长期稳定运行。

（2）抗电气冲击能力突出。传统电容内部介质的瞬流、浪涌耐受能力有限，遭遇雷击、电压骤变、负载突变时极易损坏。该虚拟电容以整体物理结构承载电能冲击，耐受上限显著提高，能有效吸纳新能源因天气突变产生的瞬时功率冲击。

（3）电气功能完整全面。该技术可近乎等效替代实体电容的稳压、滤波、

谐波抑制、冲击缓冲、无功调节等多种功能，满足变电、保护、节能等不同类型电气设备的使用需求。

(4)运行可靠性高，故障率低。设备内部无半导体开关器件与易老化介质，不会出现电容鼓包、容量衰减、击穿脱落等常见故障。其服役周期远超常规电子式设备，可显著降低电力系统的运维成本。

(5)电网兼容性好，无次生干扰。该技术基于静态电磁原理工作，不存在高频开关动作，因此不会产生谐波污染或电磁辐射，符合现行电网运行标准，有助于改善因新能源并网而劣化的电能质量。

三、典型纯物理结构电气装备介绍

祥和节能集团围绕物理结构虚拟电容技术开发了多款核心产品，涵盖调压、保护、节能三大领域。

3.1 云智慧抗冲调流型变压器

该变压器是祥和节能集团的核心产品之一，技术水平经评价达到国际领先，并已入选《2023年版川渝工业领域节能目录》。

(1)核心技术构成。该变压器以华夏祥和霍尔虚拟电容芯管控子系统（物理结构虚拟电容的核心载体）为基础，融合特种共振架构与电磁耦合设计，无需任何实体电容与电力电子器件，实现了缓冲、调流、调压、抗冲、抗叠加等一体化功能。相关核心专利包括：一种配有监控系统的安全节能型变压器（CN202010568129.8）、绿电并网场景下的能源站模型、系统、控制方法及介质（CN202610305673.0）。

（2）主要功能

1) 双向隔离功能：阻隔供电侧与用电侧之间的相互干扰，削减雷击、瞬流、浪涌、谐波等危害。

2) 电能缓冲功能（核心优势）：专门平抑因光照、风速变化带来的出力波动，将波动剧烈的电能修整为相对平稳的优质电能。

3) 智能监测功能：配置低电压、过电压、低功率等多项预警指标，实时监测工况变化，辅助运维决策。

4) 电能质量治理功能：有效滤除新能源并网产生的谐波，抑制电压闪变与波形畸变。

5) 节能降损功能：降低线路损耗与无功损耗，提升电能利用效率，减少弃风弃光现象。

6) 安全防护功能：抵御短路、过载、雷击等电气冲击，保护并网设备与电网安全。

7) 远程监控功能：实时采集电能质量参数，支持远程控制与故障预警。

3.2 祥和电保镖——祥和反常安全保护装置

该装置采用纯物理结构设计，专注于应对新能源发电带来的频繁电气冲击与电能劣化问题。

（1）核心技术原理

该装置将虚拟电容与电抗技术融合，摒弃电力电子器件与控制芯片，通过特种绕组与物理共振结构，实现对异常电能的“吸纳—缓冲—阻断”式处理，区别于传统保护装置的“检测—切断”模式。核心专利支撑：并联式电压谐波滤除吸收装置（CN221828607U）。

(2) 主要功能

- 1) 冲击能量吸纳：快速吸收光照突变、风速骤变等产生的瞬时强功率冲击，防止设备击穿或烧毁。
- 2) 故障阻断隔离：在发生短路、过载或电压异常时，毫秒级阻断故障电流向后端扩散，保护下游设备。
- 3) 谐波滤除净化：滤除新能源发电产生的广谱杂波与畸变波形，持续改善并网电能质量。
- 4) 电压稳定支撑：平抑电压闪变、跌落与骤升，保障新能源连续并网发电。
- 5) 免维护长寿命：不含易老化电子元件，耐受恶劣环境，适用于偏远场站。

3.3 祥和中央节能保护装置

该装置同样集成物理结构虚拟电容技术，兼具节能降耗、电能净化与安全防护三重功能。其主要作用包括无功补偿、谐波滤除、冲击缓冲及降低线路损耗。该装置与前述变压器、保护装置共同构成了“调压缓冲—安全防护—节能增效”的系统化解决方案，可应用于工业企业、商业楼宇及新能源配套厂区等场景。

四、新能源“靠天发电”的挑战与装备需求

随着风电、光伏装机规模持续扩大，新能源并网带来的运行问题日益突出。与火电、水电等可稳定调度的电源不同，风光发电的“气象依赖性”衍生出一系列固有缺陷，对配套电气装备提出了特殊要求。

第一，出力随机性强，不可调度。光伏出力完全依赖太阳辐照强度，存在昼夜归零、阴晴骤降、云层遮挡瞬时波动的特点；风电出力受制于风速变化，静风停机、大风满发、阵风波动频繁。这种无规律、不可预判的出力特征，要求电气

装备具备快速响应和宽范围适应能力。

第二，间歇性突出，启停频繁。晨昏交替、天气转阴、季节更替会导致新能源发电功率阶跃式变化，机组频繁在空载、满载、停机状态之间切换。这容易引发电网功率震荡，并加速并网设备的疲劳老化。

第三，强波动性导致电能质量劣化。秒级、分钟级的剧烈功率波动直接造成公共电网电压偏移、频率不稳、闪变频发，同时间歇性启停与功率跳变会衍生大量高次谐波与无功扰动，造成全网电能质量整体下降。

第四，弃风弃光与消纳困难。在风光大发时段，若电网调峰能力不足，则出现电力过剩而被迫弃电；天气突变导致出力骤降时，又需火电快速补峰。这种“峰谷极端化、供需错配化”现象对源网荷协同控制提出极高要求。

第五，极端天气导致故障高发。新能源场站多位于旷野、山区、荒漠等开阔地带，雷雨、大风、高温、极寒、沙尘等恶劣天气频发。雷击浪涌、线路故障、设备冲击损坏的概率显著高于常规电厂，且偏远场站的检修难度大、运维成本高。

综上，新能源“气象依赖性”所引发的系列问题，已成为制约新型电力系统稳定运行与新能源高效消纳的关键瓶颈。传统电力电子型装备难以从根本上解决上述难题，亟需具备动态缓冲、主动调压、冲击吸纳、谐波根治及全天候耐受能力的新型电气装备。

五、虚拟电容技术的主要工程应用场景

基于高可靠、高稳定、强抗冲击、宽环境适应、抗雷击等特性，纯物理结构虚拟电容技术可广泛应用于以下电力工程领域。

（1）用电侧配电系统

作为抗冲调流型变压器的核心技术，该方案适配城乡配电网、工矿、商业、居民社区、科研院所、金融楼宇、国防军工、党政机关等场景，能够有效应对新能源功率波动带来的电压起伏，快速缓冲瞬时冲击，弥补传统变压器调压滞后、抗扰动能力弱的不足。

（2）新能源发电场站

搭载于祥和反常安全保护装置，该技术可广泛应用于光伏发电场站、风力发电场站的网格化管理，提升场站的电能品质、风险运维水平、提升电能转化率，改善并网适配性。

（3）电能品质要求较高的场景。在新能源并网场景下，故障率较高的全自动生产线、数控机床加工、银行、金融、算力中心、数据中心等数据存储、雷击区、医院高精尖设备等，适合安装祥和电保镖——祥和反常安全保护装置，通过其双向阻隔、抑制、滤除、吸收机制的协同而实现系统保护。

（4）新能源并网核心应用场景。针对风光发电“出力随机、波动剧烈、启停无常”的核心痛点，虚拟电容技术及配套设备可自适应跟随天气变化，自动平抑功率波动，稳定并网电压与频率，滤除谐波畸变，优化功率因数。同时，设备超强的抗冲击性能可吸纳极端天气带来的电流冲击，降低天气性故障次数，提升新能源并网稳定性与消纳水平。

六、电子器件类电气装备的核心技术瓶颈

为更清晰地呈现物理结构装备的技术优势，本节以全电力电子式高频可控变压器为对比对象，分析纯电子架构变压器难以突破的固有短板。

全电力电子式高频可控变压器完全摒弃传统工频变压器的铁芯调压结构，全程依托高频半导体开关、电力电子变换模块与数字控制算法实现电压变换与电网

调节。该类设备虽具备体积小、重量轻、响应速度快等优势，但在应对新能源“靠天发电”的复杂工况时，在高温高湿环境中，在冲击高、电流大、叠加重等田电条件下，存在以下结构性瓶颈。

(1) 长期运行可靠性不足。高压宽禁带半导体器件在高频、大应力工况下开关损耗大、发热集中，耐受短路时间短。面对新能源频繁、无规律的功率冲击，器件需频繁启停与调节，长期运行极易出现击穿、老化、键合脱落等失效模式，整体使用寿命显著缩短，难以满足新能源场站全天候连续运行的要求。

(2) 高频绝缘与热管理矛盾突出。高频方波电压会加速绝缘材料老化，产生电树枝效应等劣化现象。新能源野外场站天气复杂，高温、暴晒、严寒、风沙交替出现，叠加设备因功率波动而频繁调变导致的附加发热，使得散热与绝缘之间的矛盾进一步激化，设备老化损坏速度远超常规工况。

(3) 多模块控制稳定性差。全电力电子式变压器依赖复杂算法进行多模块协同调节，各模块参数存在离散性。当新能源出力无规律跳变、负载频繁切换时，控制算法容易出现追踪滞后、均压均流失衡、调节震荡等问题，不仅无法有效稳压，反而可能放大电网波动，加剧电能质量劣化。

(4) 成本高昂，电网兼容性不足。碳化硅、氮化镓等宽禁带器件价格昂贵，导致设备造价居高不下。同时，设备自身的高频工作模式会产生谐波与电磁干扰，在新能源并网电能质量本身较差的基础上形成二次污染，无法解决弃风弃光、电压不稳等核心问题。

综上所述，纯电子器件架构装备因其材料与工作原理的根本限制，难以从根源上有效应对新能源“靠天发电”带来的随机性与波动性挑战。

七、专利技术支撑

祥和节能集团围绕物理结构虚拟电容技术构建了较为完整的专利体系，为相关装备的技术落地提供了知识产权保障。主要核心专利如下：

1. 一种配有监控系统的安全节能型变压器（发明专利，申请号：CN202010568129.8）。该专利将物理虚拟电容芯体与特种共振结构相结合，集成了电压调节、冲击防护、节能降耗及波动平抑等功能，是抗冲调流型变压器的技术基础。

2. 并联式电压谐波滤除吸收装置（实用新型专利，授权号：CN221828607U）。该专利摒弃电子调控元件，依托物理虚拟电容拓扑结构实现高压线路谐波的长效抑制，是安全保护装置的核心技术支撑。

3. 绿电并网场景下的能源站模型、系统、控制方法及介质（发明专利，申请号：CN202610305673.0）。该专利将虚拟电容技术融入新能源并网系统架构，针对性地解决出力波动导致的电压畸变、并网不稳及消纳困难等问题。

八、物理结构电气装备的综合应用优势

综合上述技术原理、产品特性、应用场景及与电子式设备的对比，可以总结出纯物理结构电气装备的以下显著优势。

（1）技术原理可靠，使用寿命长。物理结构虚拟电容在完整保留电容电气功能的同时，消除了传统电容温湿度敏感、易老化、抗冲击薄弱等缺陷。相关主设备的设计使用寿命可达 30 年以上，远超电力电子型设备。

（2）工况兼容范围广，环境适应性强。无论严寒酷暑、风沙潮湿的野外新能源场站，还是负荷波动频繁的工业厂区，物理结构装备均可平稳运行。典型产品可在 $-40^{\circ}\text{C}\sim+85^{\circ}\text{C}$ 及高湿环境中稳定工作，免维护周期长达 10 年。

(3) 电网运行安全洁净，无次生污染。设备无高频开关动作，不会产生额外谐波与电磁干扰，可正向优化并网电能质量。实现配电系统三相电流谐波总畸变率减少率 11.43%，相电压谐波总畸变率减少率 21.58%以上。

(4) 经济运维效益突出。设备结构简洁，无需频繁更换内部元器件，检修维护工作量小，综合全生命周期成本更低。初步测算表明，采用此类装备的新能源场站，运维成本可降低 60%以上，年故障停机时间减少 90%，有助于提升发电收益与新能源消纳水平。

九、结语

在“双碳”目标与新型电力系统建设的大背景下，解决新能源“靠天发电”带来的并网扰动问题，已成为保障电网安全稳定运行的核心关键。以全电力电子式高频可控变压器为代表的电子类装备，受限于自身材料特性与工作原理，在可靠性、热管理、控制稳定性、电网兼容性等方面存在难以克服的短板，无法根本适应新能源强波动、多间歇的复杂并网环境。

纯物理结构电气装备基于创新的虚拟电容技术，从硬件结构层面规避了传统实体电容与电子式设备的多种缺陷，精准回应了新能源并网在电能质量治理、故障冲击防护、恶劣环境运行、电力消纳提升等方面的现实需求。祥和节能集团的相关核心产品及一体化解决方案，有效验证了该技术路线的实用性与先进性。

总体而言，纯物理结构电气装备具备可靠性高、抗扰性强、无次生污染、环境适应广、运维成本低、使用寿命长等显著优势，能够从根源上破解新能源“靠天吃饭”的行业瓶颈，为高比例新能源电力系统的安全、稳定、高效运行提供了一条可行且具有推广价值的技术路径。

参考文献

- [1] 国家能源局. “十四五”可再生能源发展规划[Z]. 北京: 国家能源局, 2021.
- [2] 刘子文, 苗世洪, 范志华, 等. 基于自适应下垂特性的孤立直流微电网功率精确分配与电压无偏差控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 795-806.
- [3] 任碧莹, 张锐翔, 孙向东, 等. 基于虚拟电容的并联逆变器无功环流抑制策略[J]. 电气传动, 2020, 50(3): 22-27.
- [4] 熊雄, 季宇, 李蕊, 等. 直流配用电系统关键技术及应用示范综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6802-6813.
- [5] 成都祥和云端节能设备集团有限公司. 一种配有监控系统的安全节能型变压器[P]. 中国: CN111681863A, 2020-09-18.
- [6] 成都祥和云端节能设备集团有限公司. 并联式电压谐波滤除吸收装置[P]. 中国: CN221828607U, 2024-10-22.
- [7] 成都祥和云端节能设备集团有限公司. 绿电并网场景下的能源站模型、系统、控制方法及介质[P]. 中国: CN202610305673.0, 2026-03-13.
- [8] 祥和节能集团. 华夏祥和抗冲调流变压器技术白皮书[R]. 成都: 祥和节能集团, 2025.
- [9] 王忠杰, 王议锋, 陈庆, 等. 基于 GaN 的高频 Boost 变换器优化设计[J]. 电工技术学报, 2021, 36(12): 2496-2504.

Advantages of Adopting Physical Structures in Electrical Engineering Equipment

Wu Zeyong

(Chengdu Xianghe Cloud Energy Saving Equipment Group Co., Ltd., Chengdu 610000, Sichuan, China)

Abstract: The large-scale integration of renewable energy sources such as photovoltaics (PV) and wind power into the power grid has become the norm in power system development. However, the power output of these sources exhibits significant

randomness, intermittency, and volatility, posing serious challenges to power quality and operational stability. Although conventional power electronic-based equipment is widely used, it suffers from inherent issues such as insufficient reliability, poor high-frequency adaptability, severe harmonic interference, high failure rates, and inadequate heat dissipation, making it difficult to effectively address the complex disturbances caused by renewable energy grid integration. The pure physical-structure electrical equipment developed by Xianghe Energy Saving Group (Chengdu Xianghe Cloud Energy Saving Equipment Group Co., Ltd.) is based on purely physical virtual capacitor technology, bidirectional blocking technology, and anomalous Hall effect technology. With no physical capacitors or power electronic devices in the main circuit, it achieves current/voltage regulation, filtering, surge resistance, and anti-stacking functions through specialized electromagnetic structures. This paper takes the Cloud-Intelligent Anti-Impact Flow-Regulating Transformer, the Xianghe Electric Bodyguard - Xianghe Safety Protection Device, and the Xianghe Central Energy Saving Protection Device as research objects to elaborate the technical principles and advantages of purely physical virtual capacitor technology. A comparison is made with fully power-electronic high-frequency controllable transformers to analyze the technical bottlenecks of electronic-component-based equipment. The results show that pure physical-structure electrical equipment possesses comprehensive advantages including strong environmental adaptability, high surge withstand capability, extremely low failure rate, stable and reliable operation, extremely low harmonic pollution, and very low operation and maintenance costs. It can effectively smooth power fluctuations from renewable energy generation, improve the power quality of PV-storage grid integration, upgrade the comprehensive performance of distribution station areas, and resist start-stop impacts from end-user equipment, thus holding significant application value and promotion prospects in modern electrical engineering.

Keywords: Electrical Equipment; Physical Structure; Virtual Capacitor; Renewable Energy Grid Integration; Power Electronic Equipment; Operational Reliability; New Power Quality; Distribution Station Area Upgrade and Renovation; Operation Quality

of Renewable Energy Stations