第 50 卷 第 1 期：1-18 高电压技术 Vol.50, No.1: 1-18
2024 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20232145

新型配电系统形态演化与安全高效运行方法综述

盛万兴，刘科研，李　昭，白牧可，贾东梨
（中国电力科学研究院有限公司，北京 100192）

摘　要：配电网是实现能源转型的重要支撑点，“双碳”目标驱动的配电网将发生重大变革，已快速从被动配送网络向主动平衡区域电力供需、支撑能源综合利用的资源配置平台转变，呈现更强的“系统化”特征，即从配电网向配电系统转变。在此背景下，该文首先从形态演化路径、多维度耦合关系以及核心研究手段 3 个维度梳理总结相关研究，并初步提出新型配电系统未来演化规律与演进方向构想。然后，对新型配电系统演进过程中涉及到的关键技术，即故障保护与自愈技术、振荡分析与抑制技术、系统稳定控制技术与协同调度技术进行了总结与讨论，并进一步通过分析关键技术在典型案例中的应用明确了现阶段技术现状与未来需求的差距。最后，对新型配电系统相关技术未来发展方向提出了展望。

关键词：新型配电系统；分布式资源；源网荷储；形态演化；故障与保护；振荡；协调调控

Review of Basic Theory and Methods of Morphological Evolution and Safe & Efficient Operation of New Distribution System

SHENG Wanxing, LIU Keyan, LI Zhao, BAI Muke, JIA Dongli
(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The distribution network is an important support point for energy transformation. The distribution network driven by the “carbon emissions peak and carbon neutrality” goal will undergo major changes, and it has rapidly changed from a passive distribution network to a resource allocation platform that actively balances regional power supply and demand and supports comprehensive energy utilization, showing a stronger feature of systematic, that is, from distribution network to distribution system. We first summarized the relevant research from three dimensions, namely, morphological evolution path, multi-dimensional coupling relationship, and core research methods, and preliminarily put forward the future evolution law and evolution direction of the new distribution system. Then, we summarized and discussed the key technologies involved in the evolution process of the new distribution system, namely, fault protection and self-healing technology, oscillation analysis and suppression technology, system stability control technology and collaborative scheduling technology. Furthermore, by analyzing the application of key technologies in typical cases, the gap between the current technical status and future needs is clarified. Finally, the future development direction of the new distribution system related technology is presented.

Key words: new distribution system; distributed resources; source-network-load-storage; morphological evolution; fault and protection; oscillation; coordinated dispatch and control

0　引言

配电系统是连接电网和负荷的关键环节，随着双碳目标和新型电力系统建设的推进，配电系统也逐渐发展为承载分布式新能源、电动汽车充换电站、电气化轨道交通等冲击性负荷以及电力电子设备的枢纽型平台，兼具电源侧“清洁替代”和负荷侧“电能替代”的作用。至 2022 年底，我国已有 157 GW 分布式光伏和 1045 万辆电动汽车接入配电系统。此类点多面广的分布式电源和冲击性负荷的大量接入，使得配电系统电力电子化程度显著加深，不确定性骤增，双向潮流特征更加凸显，交直流混联形态不断演进，“源-网-荷-储”间的电气耦合和能量信息耦合更加紧密。配电系统发展为高比例分布式电源、高比例电力电子化设备/负荷接入、高不确定性的新型配电系统是必然趋势。

传统配电网向新型配电系统的过渡过程及未

基金资助项目：国家自然科学基金联合基金重大集成项目(新型配电系统形态演化与安全高效运行的基础理论及方法)(U23B6007)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (Fundamental Theory and Methods for Form Evolution and High Efficient Safe Operation of New Power Distribution Systems)(U23B6007).

来新型配电系统的发展规律与发展方向是该领域的重中之重，把握准确、合理的形态演进规律与演进方向具有重大意义。论文首先对该部分进行了深入的研究及调研工作，并初步提出了新型配电系统演化构想与相关基础理论研究的介绍与分析。在此基础上，对演化过程中的关键技术，故障保护与自愈方法、振荡分析与抑制技术、稳定性控制方法及协同调度技术进行了深入分析与讨论，并进一步阐述了其在典型工程中的应用。最后，对新型配电系统形态演化、技术发展提出了建议与展望。

1 新型配电系统形态发展路径与基础理论研究介绍

高比例分布式电源、大规模电动汽等新型源荷的接入，推动传动配电网向新型配电系统快速演进[1-4]，对发展方向与路径的准确把握是未来配电领域建设规划、运行调控等环节的先决条件与重要基础。

由引言可知，新型配电系统是新型电力系统的重要组成部分，是由大量分布式电源、多元化负荷(储能)、高比例电力电子设备与传统配电网紧密耦合形成的复杂交直流配电系统，如图 1 所示。因此，本章拟从形态演化路径研究、耦合特性理论研究 2 方面展开相关研究的调研综述，以期为相关领域科研人员提供一定程度的选题与研究参考。

1.1 形态演化路径研究

当前多数关于形态演化过程、路径的分析研究均聚焦于结构形态的演化研究[5]。但实质上，新型配电系统的元素与控制方式均发生了革命性变化[6-10]。掌握结构形态演化、控制形态演化和设备形态演化规律及其之间的交互影响关系，是把握新型配电系统多维形态演化路径的必由之路。

1.1.1 结构形态演化

1）传统配电系统的基本结构概述

传统配电网基本接线方式有 3 种，即放射式、多回式及环状式。根据所在区域负荷的种类、实际需求及负荷重要程度不同，进一步发展出双环网、多分段单联络、多分段多联络等接线方式与供电模式[11]，其目的均是在兼顾投资成本和运维成本的前提下，进一步提升供电可靠性。

2）新型配电系统结构形态演化历程

网格状供电是较早期出现的形态，较为常用的是“4×6 网络接线”[12]。该种结构由多分段多联络形态演化而来，在保持了原有多分段多联络结构高可靠性的前提下，进一步提升了源荷接入的灵活性。

与网格状接线同期的新型接线方式还有“花瓣型”接线方式。“花瓣型”接线是指在配电网中，一个闭环网络由两路变电站出线，闭环网络之间也有联络，形成花瓣式网络。“花瓣”间互有联络，发生故障时能互相支援，迅速恢复供电。该种接线方式最早出现于 20 世纪 80 年代的新加坡城市电网中。我国雄安新区正在建设的双花瓣网络形态中，“双花瓣”之间接入的开关站分段开关开环运行、互为

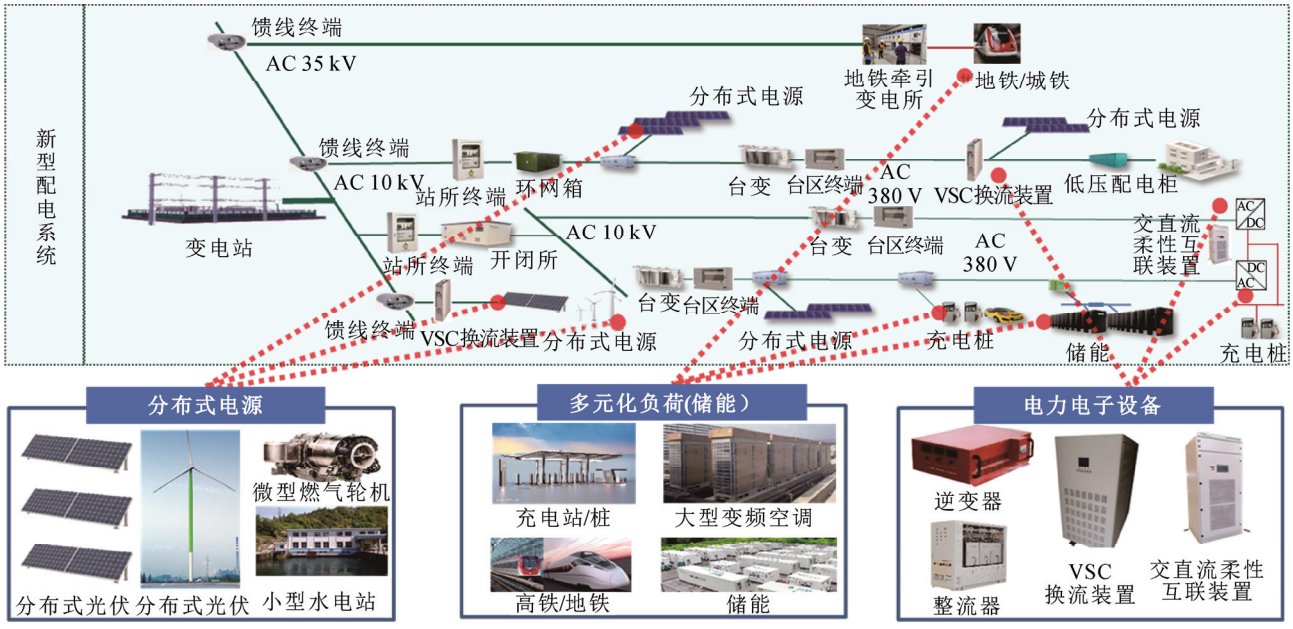


图 1 新型配电系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of new power distribution system

备用。研究人员进一步构建了“钻石型”配电网[13]。“钻石型”实质上是一种双环网结构与多个开关站、变电站、环网柜的结合体，在相同可靠性条件下，线路规模可较“单花瓣”、“双花瓣”接线方式分别降低 10%和 60%。

然而上述设计仍不能应对大规模分布式电源、高比例电力电子化接入引发的多重挑战，如电能质量问题、电压越限问题、设备重/过载问题等。为解决上述问题，研究人员引入交直流混联关键技术，提出了全对等配电网络架构，蜂巢状网络是全对等配电网的典型代表。蜂巢状配电网具有几个显著特征：柔性软开关/换流装置为核心节点、交直流混联、配微融合、闭环运行，可有效解决三相不平衡、相角差等问题[13]。

通过上述介绍与分析可知，配电系统形态结构的演化历程和路径可基本概括总结为：“供上电(简单、低成本供电网架结构)”—“不断电(多回、多转供)”—“供好电(兼顾高可靠性下的高质量供电)”。基于上述发展规律和发展规律，未来交直流混联单元将在配电系统中占比更高。此外，高度对称、弱中心化、能量互济联通更加灵活的网架结构也是未来新型配电系统的重要特征。

1.1.2　控制与设备形态演化

1）传统配电系统中的控制方法回顾

从配电网调度控制工程实际应用维度来看，传统配电网的调度控制主要通过配电自动化系统和配电调度自动化系统实现。从配电网调控架构与方法维度来看，传统配电网的调控为主从式集中控制，主要开展无功-电压控制，且几乎不涉及负荷侧。

2）先进控制技术在新型配电系统中的应用

低压层是目前分布式资源、柔性电气化负荷接入的“主战场”。在该种情况下，主要采取 2 种方式对低压侧多元利益主体进行“可观、可测”，即：通过“用采系统”采集低压侧多元利益主体的电气量数据，上送至电网资源业务中台/数据中台，而后提供至配电云平台分布式资源管控系统；另一种方式为在多元利益主体并网点直接设置量测装置，通过低压电力线高速载波通信(high-speed power line communition，HPLC)或 4G/5G 上送至台区智能融合终端，由台区智能融合终端上送至电网资源业务中台/数据中台。

从具体的控制方法研究维度来看，主要包括就地式控制、分布式控制、集中式控制及分布-集中控制、分布-就地控制等多种控制模式及其对应的控制方法[14-15]。常用的方式为：在中压层应用集中式控制，在低压层采取分布式控制，充分考虑了低压节点规模庞大、量测通信条件差的特点。在中、低压配电系统形成了多阶段分层调控的协调控制方法[14]。与传统配电网不同的是，控制对象增加了分布式资源的多类型控制器(逆变器、柔性互联装置、柔性智能开关等)。在多阶段分层调控方法具体实现时，依照不同场景或工况的实际需求，设定不同的优化目标与约束条件，如网损最小[15-16]、电压合格率最高[17-18]、三相不平衡度最小等。

由上述分析可知，对于新型配电系统，控制形态与设备形态的演化规律主要有以下特征：传统量测技术逐渐向精细化态势感知技术演进，集中式控制逐步向分布、就地式等弱中心化控制模式演进，一二次融合设备、通信设备及先进量测设备在新型配电系统中将扮演越来越重要的角色。

1.2　新型配电系统耦合特性

1.2.1　源-网-荷-储耦合关系分析

随着经济快速发展，社会用电量不断增长，供用电形式日益丰富，导致配电系统的规模也越来越大，现代配用电系统的复杂性与日俱增，尤其给类型分布式资源等新电网元素的加入使得各区域之间相互耦合关系越来越复杂。在目前大型配电系统互联的现实下，各区域之间复杂的耦合关系也越来越难以分析。因此，深入理解电气复杂网络的耦合特性对于防范电网大停电事故和规划电网运行建设有着重要意义。

电力系统分析中所应用的数学模型是对电力系统中多种元素耦合关系的最直观表达。当线路参数、元件参数与电量无关时，系统为线性系统；随着分布式电源的接入，元件参数与电量相关，系统转变为非线性系统，需要考虑动态支路参数的影响[19]。目前常用的动态分析法包括小干扰分析法、时域分析法、动态潮流法等[19]。

除电气耦合维度外，源网荷储多主体互动在可以在一定程度上体现出源网荷储耦合关系。源网荷储的关系从传统配电网的源随荷动快速转向源网荷储耦合互动。在构建耦合模型来分析上述问题时，除考虑前述提到的电气耦合关系外，有学者还考虑从数据驱动的角度补充电气耦合关系研究的不足[20]。文献[20]提出了一种基于数据驱动的分布式需求响应方法，将人工神经网络嵌入到优化决策中，加强

了源-荷-储之间的互动。

1.2.2 配电系统信息物理耦合关系

随着配电系统“信息化、自动化、互动化、数字化”建设和改造工作的推进，配电自动化、用电信息采集系统、智能电表、智能融合终端、一二次融合设备等信息通信系统在配电网中逐步普及，使得配电网中一次系统与二次系统相互耦合、紧密联系，具备了典型信息物理系统的基本特征，成为电网信息物理融合系统。新型配电系统信息物理耦合的主要特征有[21]：(1)电网物理系统与电网物理系统与信息系统融合；(2)电网连续过程与离散过程融合；(3)全景信息采集与灵活应用[21]。

目前学术界已尝试探索配电系统运行中的信息-物理交互过程，并取得一些研究成果：部分研究侧重于电力系统连续过程与信息系统离散过程的交互过程研究；部分研究侧重于实际业务中的信息-物理交互过程研究。但上述 2 个领域的研究仍存在一定程度的不足，即：研究手段仍局限于传统信息物理系统分析方法，套用一般其他行业信息物理系统(cyber-physical systems, CPS)分析手段；另一方面，缺少对信息-物理交互机理的全面研究。因此难以有效解释系统运行机制和运行状态的演化过程[22-25]。

2 新型配电系统的关键技术及挑战

2.1 故障保护与自愈方法

2.1.1 故障机理分析方法

多电力电子设备故障期间耦合交互、多电源馈入故障电流从本质上改变了配电系统的故障特性，原有单电源或含少量电力电子的配电网故障解析方法难以嵌套于新型配电系统解析，如何揭示新型配电系统故障机理成为研究配电系统继电保护的一个重要前提，新型配电系统交直流故障响应耦合如图 3 所示。现有配电系统故障机理分析的研究主要包括故障特征分析、故障演化传播机理揭示和短路电流解析计算 3 个方面。

故障特征分析从定性角度，分析不同类型、数量的分布式电源接入辐射型、环网型等典型配电网拓扑结构下的短路电流特性，揭示分布式能源、冲击性负荷及电动汽车等源、荷空间分布随机性对故障特征的影响规律[26]。故障演化传播机理方面，现有研究则重点关注故障暂态电气量与控制变量耦合响应对换流器故障输出电流的影响，以及交、直流间电力电子变流器的故障传递特性。文献[27]考虑

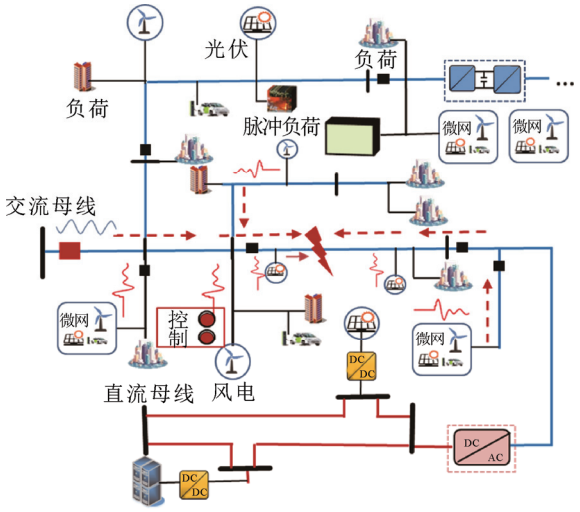


图 2 交直流故障响应

Fig.2 AC/DC fault response

故障期间锁相环的动态响应特性，研究锁相偏差对故障电流的影响机理；文献[28]基于开关函数研究电力电子变流器的故障传递特性，阐明交流侧不对称短路故障对直流侧功率、电压和分布式电源输出电压的影响机理。短路电流解析计算方面，现有文献综合考虑模型计算复杂度及精确性，通过频域降阶处理、分工作模式解析的思路，得到复杂非线性系统的故障电流表达式。文献[29]针对多机系统高阶求解的问题，提出适用于多端直流电网的故障暂态电流解析计算方法。

当前配电网故障特征分析研究在新能源分散接入、柔性负荷随机互动等方面均有开展，但未考虑源网荷储多重不确定性对故障特征的影响；故障演化传播机理及解析方法尚不完善，未涉及交直流统一的故障稳态分析方法与计及故障全过程控制切换特征的交、直流暂态分析模型，难以支撑适配新型配电系统的保护新原理研究。后续研究应揭示故障在交直流、跨电压等级的时空演化传播机理，着重研究适用于源荷双重不确定性与复杂网络拓扑的交直流配电系统态故障分析方法，实现考虑多电力电子控制环节作用下的暂、稳态故障电流特性解析。

2.1.2 新型配电系统保护原理

配电系统线路短、多分支且无明显边界，当前交直流配电系统保护仍以电流保护为主。交流配电系统故障潮流双向以及新能源不同接入位置引起的外汲、助增作用使得电流保护可能发生误动或拒动，故障电流幅值受限、相角受控则降低了差动保护灵敏性甚至造成拒动，如图 3 所示。直流故障电流上

升快、峰值高、非线性强，严重威胁设备和系统安全稳定运行，而直流输电线路常用的微分欠压保护、行波保护和边界保护等难以适用于配电系统。针对上述保护问题，现有研究提出了一系列过流保护、差动保护改进方案及新型保护方法，以期提高配电系统的运行安全性和供电可靠性。文献[30]提出根据故障类型调整过流保护定值的自适应过流保护改进方案；文献[31]提出基于节点分支电流幅值比的差动保护原理，有效解决了低渗透率场景下不可测分支对保护的负面影响。

然而，仅依靠保护定值调整或电流幅值特性难以从根本上消除源端特性对保护的影响，需进一步考虑换流器控制对保护的影响。文献[32]提出了基于线路两端高频阻抗比较的纵联保护策略，有效提升了故障特征受控下保护的可靠性，但存在采样率要求高、未考虑分支影响等问题；文献[33]提出了无需构造保护边界且速动性快的多端柔性直流配电系统单端测距式暂态保护方法，但该保护难以判别线路末端故障；上述文献分别对交、直流线路保护做出改进，但对交直流保护间的联系考虑较少。文献[34]从交直流统一模型出发提出基于频率阻抗模型的距离保护方法，能够自适应保护交、直流线路，但该方法的统一只体现在交直流距离保护计算公式形式，未充分体现交直流联络及耦合影响。

综上所述，当前配电系统保护原理研究主要集中于解决分布式电源集中接入、故障特征受控、不可测分支等因素引起的保护误动问题，不能有效适用于多网耦合、多类分布式源荷即插即用等场景，且未考虑多电压等级间的保护配合和拓扑变化后的保护定值整定及配合逻辑，难以完全满足新型配电系统的高性能保护需求。因此，为消除源端特性影响，应挖掘电力电子变换器控制影响下的故障特征及规律，利用控制特性规律提出与控制解耦的交直流保护新方法。

2.1.3　新型配电系统自愈重构方法

配电系统自愈是通过正常运行时的优化控制降低故障发生概率，故障后系统以快速切换开关、转供负荷、紧急控制等方式实现非故障失电区域不间断供电，最小化故障损失。网络重构是主要的自愈控制手段之一，在满足电网的各项约束的前提下，通过闭合/开断网络中的分段、联络开关改变网络拓扑结构来达到尽可能多地恢复非故障失电区域的目的。自愈重构本质为复杂网络的开关对问题，当前

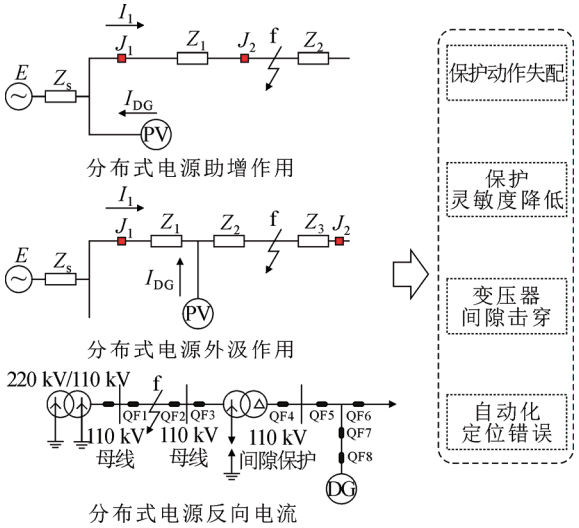


图 3　保护动作性能依赖电源及控制特性

Fig.3　Protection performance depends on power and control characteristics

研究更多考虑为开关动作次数、停电恢复时间等多目标的优化问题，主要通过智能优化算法[35]求解。智能优化算法虽有求解速度优势，但无法保证求得解为全局最优解。因此有部分研究将配电网重构问题转化为混合整数二阶锥规划(mixed integer second-order cone programming，MISOCP)的凸优化问题[36]，通过凸优化求解算法得到最优的重构拓扑。新型配电系统中存在着多种分布式发电资源和柔性负荷，这些分布式电源的出力和负荷波动的不确定性较强，同时新型配电系统内的新设备如智能软开关(soft open point，SOP)等也会影响自愈重构效果，充分考虑这些不确定性元素和新型开关设备是最大化利用网络资源实现最优重构效果的必要前提。近年来被广泛使用的不确定性分析方法有鲁棒优化(robust optimization，RO)和随机优化[37](stochastic optimization，SO)策略。文献[38]建立了 SOP 的数学模型，提出基于 SOP 的有源配电网供电恢复模型，并采用二阶锥规划方法进行模型转化和求解，验证了柔性开关装置对故障恢复的提升。

综上可见，配电网自愈重构方面的研究主要面向“源”或“荷”的单一不确定性影响因素，尚未考虑新型配电网演化发展中“源-网-荷”多重不确定性耦合作用的影响，难以充分利用新型配电网多重不确定性所带来的优势，获取交直流混联系统自愈重构的最优路径。应构建新型配电系统的随机鲁棒重构模型及自主进化机制，提出适应新型配电系统长期演化发展的快速自愈重构方法。

2.2 振荡分析与抑制策略

2.2.1 配电系统典型振荡问题概述

配电系统中包含分布式电源、柔性负荷、柔性开关等多样化电力电子设备，其中涉及变流器电流控制、功率控制、直流电压控制、交流电压控制、同步锁相控制、设备间的协同控制及无源设备动态等多个环节，这些环节动态特性覆盖多个时间尺度，作用频率跨越低频、次/超同步、中高频等多个频率段，因此配电系统中的振荡现象与现有输电系统振荡具有类似的宽频化特征[39]。然而配电系统中诸如新能源电流环控制引发的低频振荡、变流器锁相环诱发的次/超同步振荡、新能源经并补线路接入引发的高频振荡等问题与输电系统中对应振荡的机理是一致的，因此本文从新型配电系统的场景出发，突出说明区别于输电系统振荡的 2 类配电系统典型振荡问题：一是大量柔性负荷、冲击负荷等非线性负载所引发的谐波谐振问题[40]，此类问题振荡频率不固定，受负载动态变化影响；二是直流配电或微电网运行方式下的交直流混联振荡问题，此类问题由多层级控制、多设备间的动态交互引发[41]，且受直流负载和直流运行方式影响，在振荡机理分析和应对措施方面尚不成熟，具体核心研究需求见图 4。

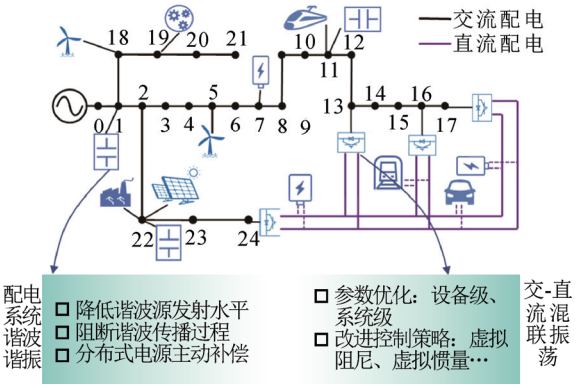


图 4 配电系统典型振荡抑制研究现状

Fig.4 Current suppression of typical oscillations in the distribution systems

1）配电系统谐波谐振问题

电力系统中电力变压器饱和、循环变流器及工业电弧炉等大型非线性设备都可能引起谐波畸变[42-43]。随着冲击性工业负荷、电气化轨道交通负荷、电动汽车充放电桩等新型负载的大量接入，由于非线性负载产生的谐波呈现出含量显著增大、频率范围显著拓宽、整数次谐波和间谐波共存的特征，因此显著提升了配电系统电压谐波谐振的风险。同时，电网运营商或电力用户为改善功率因数在配电系统中广泛配置大量电容器组，进一步增加了谐波谐振的发生概率。此类振荡问题的发生会导致对电网和用户造成严重危害，包括：

(1) 谐振使电网中的元件产生大量附加的谐波损耗，降低发电、输电及用电设备的效率，影响各种电气设备的正常工作。

(2) 可能产生局部的串联或并联谐振，进一步放大谐波水平，进而导致谐波支路中的供/用设备因过电压或过电流而损坏。

(3) 导致继电保护和自动装置误动作，并会使电气测量仪表计量不准确。

(4) 会对邻近的通信系统产生干扰，产生噪声，降低通信质量，甚至使通信系统无法正常工作，若谐波频率接近载波频率，则电力线载波通信会被一定程度干扰，此外通过电磁、静电和耦合途径，也会对平行敷设的通信线路产生干扰。

2）交直流混联配电系统振荡问题

大量分布式电源和直流负载接入配电系统，对配电网的供电可靠性、控制灵活性和传输容量等提出了更高的要求，交流配电形态正向交直流混联配电转变。然而直流配电系统中基于电力电子器件的交直流换流装置将直流系统与交流系统隔离，造成直流配电系统具有低惯性、弱阻尼的特点，同时直流负载大多属于恒功率负荷，具有显著的负阻尼特性，会降低系统的整体阻尼水平，使得系统的稳定裕度降低，诱发振荡失稳现象[44-46]。直流配电系统的振荡将显著恶化直流电源和负载的运行性能，尤其是对电压质量要求较高的直流设备则会因为振荡现象导致生产的产品出现大量次品甚至损伤设备本身。同时，直流振荡还会通过各交直流变换接口蔓延至交流系统，释放大量间谐波或高次谐波电流[44]，与交流系统中的电力电子装置形成动态交互，加剧交流侧失稳风险。

在控制层面，直流配电系统包含电流控制、下垂控制、多电源协同控制及群间协调控制等多各控制层级；在源荷特性方面，直流配电系统中存在光伏发电、电动汽车、LED 照明等多种随机性负荷；同时，直流配电系统小干扰信号可以通过电力电子接口作用于交流侧元件。上述原因综合导致交直流配电系统存在不同控制层级间、不同设备间、交直流网络间的动态交互[45]，这就使得高维随机条件下交直流配电系统小干扰动态特性难以准确刻画，交

直流配电系统振荡诱因难以剖析，振荡抑制措施缺乏有效手段。因此，如何兼顾建模精度和建模效率，分析关键参数与振荡特性之间的关系，揭示交直流混联系统振荡机理，进而设计优化控制方法， 是新型配电系统稳定运行的关键之一[47]。

2.2.2　振荡抑制策略

1）配电系统谐波谐振抑制

目前，主要有 3 种途径可用于解决配电系统谐波谐振问题[48-51]：

(1) 在谐波源头降低谐波发射水平。通过在谐波源附近装设谐波补偿装置来补偿谐波，或改进分布式电源控制策略，增大其谐波等值阻抗，从而降低其谐波电流发射水平，减小谐波谐振的发生概率。随着分布式电源的快速发展，配电网中接入的电力电子装置会不断增多，为提高用电侧电力设备的抗谐波能力，在分布式电源或电力电子化负荷中嵌入谐波电流抑制策略将愈发重要。

(2) 阻断谐波传播过程。通过在电网侧增加有源或无源谐波补偿装置，在谐波电流流入电网后将其吸收至谐波补偿装置中，可有效阻断谐波的传播过程，进而避免谐波放大。从谐振发生机理的角度，该措施可以认为是调整电网谐波阻抗特征，从而破坏谐波谐振的发生条件。这种方式无需考虑各类谐波源的差异化特征，从电网角度集中处理谐波问题，是目前电力系统治理谐波谐振较为高效的手段。

(3) 利用分布式电源冗余容量进行谐波主动补偿。该方案本质是利用分布式电源电力电子装置灵活控制能力，使其兼具有源滤波功能，吸收其他谐波源的谐波电流。但当前应用推广面临的主要问题在于其成本高、效率低、降低电源自身发电效率，且当谐波含量较高或谐波放大现象出现时，该方案可能会加剧参与谐波补偿的电力电子器件的过压过流风险，因此该方案只适合作为其他谐波治理措施的辅助手段，而不适合作为谐波谐振抑制主要方式。

2）交直流混联配电系统振荡抑制

目前针对交直流混联配电系统的振荡抑制研究已经在参数优化设计和改进控制策略 2 方面取得了一定进展。

通过对电力电子装置控制参数或系统级控制参数进行调整可以改变系统整体的阻尼特征，从而改善稳定性。例如：文献[52]针对连接恒功率负载的柔性直流变流器进行了直流电压控制参数的优化，降低了直流配电系统的低频振荡风险；文献[53]将直流配电系统中下垂系数设置为有关电压变化率的动态量，提高直流扰动下的母线电压低频稳定性。然而，无论是设备级控制参数还是系统级控制参数，其不仅影响小扰动稳定性，同时还与系统暂态稳定水平、动态调节能力[54]、故障电流特性[55]等诸多因素相关。因此单纯通过参数调整，难以形成全面有效的振荡抑制措施。

在改进控制策略方面，有源阻尼补偿、虚拟惯量控制、附加鲁棒控制器等方法在分布式电源、电动汽车、柔性软开关、储能变流器等设备中已经得广泛应用，例如：文献[56]提出了基于附加电压控制的配电系统低频振荡抑制策略，但其配电系统中只包含电力电子变压器这一类电力电子装置；文献[57]在直流储能中附加了有源阻尼控制来避免直流配电系统的中频振荡问题，但该场景中的电力电子装置仅包括 AC/DC 和储能电池。

当前配电系统振荡抑制研究存在的共性问题是对配电系统场景特征进行描时缺乏全面性，这种对系统高度电力电子化特征的简化分析方式在当前配电网发展水平下是适用的，但对于新型配电系统，多类型、差异化、高比例的电力电子装置交直流混联接入后，系统振荡不再是少量类型设备间的动态交互的结果，而是多重振荡诱因共同作用下的产物。当前已有研究已经发现，当多个差异化参数的同类型电力电子装置形成互联后，系统存在典型的多振荡模态特征[58]，这与此前输电网振荡分析中振荡模态较为单一的认知是有显著差异的。因此可以预见的是，在新型配电系统源荷的高维随机特性下，海量差异化类型的电力电子装置间的动态交互将会使得新型配电系统振荡多模态特征更加显著，届时，多振荡模态特征叠加下系统的动态特征、系统振荡抑制对不同时间尺度的阻尼需求将成为新型配电系统振荡抑制的关键。

2.3　稳定控制方法

2.3.1　分布式资源并网点自适应控制方法

针对并网点的无功/电压稳态控制，以变换器为接口的风光储荷等分布式资源已经形成较为成熟的技术体系。目前，分布式可控资源(光伏、风电、储能、柔性负荷等)广泛采用电网跟随型变流器并网方案，普遍采用了矢量控制技术，实现了有功、无功的解耦控制；然而，随着新能源渗透率、电力电子化设备比例不断上升，电网形态特征、运行特征发生重大改变，该方案在弱电网条件下易发生失稳现

象。近年来，学术界提出了电网构建型变流器并网方案[59]，如图 4 所示。常见的构网型控制有下垂控制、虚拟振荡器控制[60]、虚拟同步机控制[61]等。文献[62]针对分布式可控资源并网逆变器的虚拟同步发电机控制策略及其在微电网中的应用进行研究，建立了基于虚拟转矩和虚拟励磁的并网有功、无功调节方案，适用于微电网不同运行模式间无缝切换。文献[63]基于多时间尺度幅相动力方程，研究了电网跟随型/构建型变流器控制在转子转速、直流电压和交流电流 3 个时间尺度下的交互影响。前述研究已对分布式可控资源并网变流器多模式运行开展了相关工作，需要注意的是，电压源换流器(voltage source converter，VSC)通常使用绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor，IGBT)全控开关器件来实现换流，而 IGBT 的通流能力具有一定的极限，因此当系统发生严重故障时，即使 VSC 变流器使用构网型控制策略，VSC 变流器也可能因为达到限流而退化成定功率控制。

然而，这些技术重点关注单变流器的动态响应特性，未计及电网结构形态、控制形态与多变流器的交互耦合特性，对含构网型变流器的多机系统稳定性及故障大扰动下的响应特性也有待进一步研究。

2.3.2 分散资源动态响应聚合方法

分布式资源广域分散接入、数量庞大，且出力具有随机性和波动性，经变流器接口并网后，其有功/无功输出特性和电压响应特性主要由电力电子器件控制方式决定。为准确掌握广域分散资源整体电压响应特性，充分体现分散资源不同控制策略及不同电网拓扑结构下的动态无功支撑能力，亟需探索建立如图 5 所示的分散资源动态电压支撑聚合模型。

文献[64]基于一致性算法，提出了利用直流受端电网中配电网的分布式资源参与一次调频的控制方法。文献[65]提出了基于改进 K-means++算法的分布式光储聚合调峰方法，在保证调峰能力的前提下兼具经济性优势。文献[66]提出了基于在线深度学习的空调负荷集群参与调频控制策略。文献[67]提出了柔性负荷聚合灵活性的多时间颗粒度鲁棒评估方法，基于多时间颗粒度评估框架，构建了动态聚合灵活性的评估模型。

面向广域分散资源暂态无功支撑研究的聚合模型，一方面应能充分反映分散资源在暂态扰动下的自主分散响应特性，另一方面亦能表征对于配电系统电压支撑的整体效果和聚合体多时间尺度动态

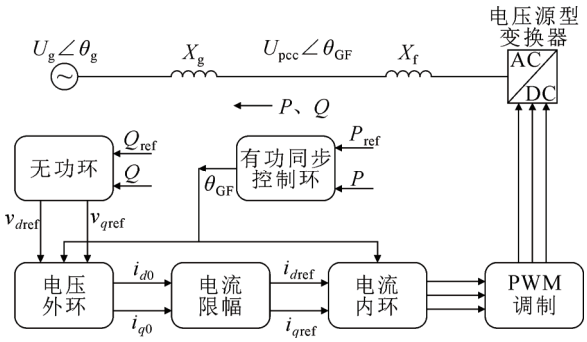


图 5 电网构建型变流器并网控制策略

Fig.5 Grid-connected control strategy for grid-forming converters

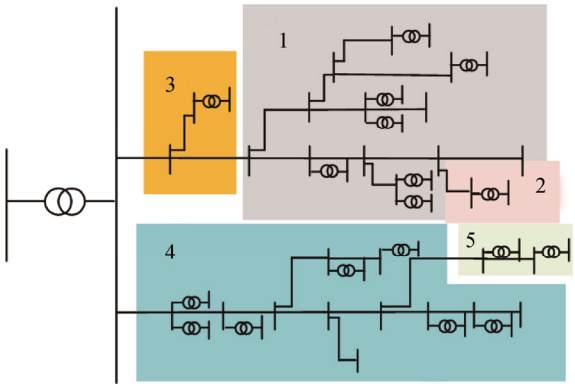


图 6 面向暂态电压控制的广域分散资源聚合方法

Fig.6 Wide-area decentralized resource aggregation method for transient voltage control

特性，且针对暂态稳定性分析需求，聚合时应平衡好准确性和复杂度之间的取舍，并通过误差和特性差异评估聚合模型的适用程度[68]。以上研究已分别对基于分布式可控资源的集中式、分布式和分散式控制策略开展了相关研究，但主要集中在单一交流子网或直流子网，未计及子网间的交互影响，对交直流混联的新型配电系统多运行模式下的协调控制策略及高度分散灵活资源的动态聚合方法有待进一步研究。

2.3.3 动态电压稳定控制与主动支撑

电网静态电压控制主要基于“电压控制分区”、“中枢母线电压”等电压分层分区调节控制的理念设计自动电压控制系统，目前已在国内外实现了广泛的工程应用。但新型配电系统的动态电压稳定控制仍需进一步研究动态电压调节技术，以克服整体的电压控制质量偏低和动态电压支撑能力不足的问题[69]，亟需探讨多聚合体无功源自律分散控制方式，来实现新型配电系统电压控制从稳态到暂态的

过程全覆盖，从单一分散资源被动响应到新型配电系统主动支撑的控制模式转变。文献[70]针对高比例分布式光伏接入下的直流受端近区配电网暂态电压控制问题，提出了一种基于灵敏度分析的分布式光伏和储能协同参与下的配电网暂态电压控制方法。文献[71]为解决配电网光伏并网带来的电压越限和高频波动等问题，提出了一种多模协调运行的光伏逆变器两级协调电压控制策略，平滑了配电网的电压波动。文献[72]针对不对称电压跌落情况下分布式资源协调控制复杂问题，提出了一种分布式资源多目标主动控制策略，实现了电网故障期间并网逆变器的最大有功功率输出和最优电压支撑。文献[73]针对新型配电系统大规模新能源消纳导致的暂态电压问题，分析暂态电压支撑需求和混合多机暂态电压主动支撑的关键因素，提出受控电压/电流源型变流器混合多机暂态电压主动支撑策略。以上研究主要集中在配电系统发生大扰动后对分布式可控资源的灵活控制，没有充分考虑高比例分布式电源、高比例电力电子化设备和电压敏感负荷接入后配电网的有功-无功传输耦合特性，导致配电系统在有功扰动下出现电压越限、局部电压崩溃等动态电压问题。因此，对资源高度分散、随机条件下的新型配电系统电压稳定控制与主动支撑有待进一步研究。

综上所述，广域分散源荷协同的新型配电系统安全运行控制方法研究在近年来被国内外众多学者所关注，并开展了一系列有价值的研究工作，主要聚焦在单一交流子网或直流子网的协调控制策略、传统配电网发生大扰动时对分布式可控资源的灵活控制等方面。然而，现有研究没有充分考虑高比例分布式电源、高比例电力电子化设备/负荷广泛接入后，新型配电系统对于高度随机复杂运行场景的适应能力显著不足、对于多分布式资源的交互过程以及故障-恢复的全过程考量不足等问题，因此，广域分散源荷协同的新型配电系统安全运行控制方法有待进一步深入探究。

2.4　协同调度技术

2.4.1　配电系统联合求解方法

电力系统优化调度的方法主要包括基于最优化理论的知识驱动方法和数据驱动方法。知识驱动方法通过工程实践构建出数学模型，利用多种数学手段对模型进行简化和处理，并研究相应的最优化算法来求解问题。上述调度策略研究提升了电力系统经济性和新能源消纳能力。然而，随着电力系统规模不断扩大和耦合关系日益复杂，在线求解最优化调度问题的计算成本增加，基于知识驱动的传统调度方法逐渐显示出其局限性。

数据驱动方法在电力系统中已有广泛的研究和应用，文献[74-75]基于条件变分编码器的场景生成方法，可无监督地学习风电、光伏训练数据的时间、空间及波动性特点，并按条件高效地生成符合观测特点的数据，利用生成对抗网络学习历史数据的特性，并生成新的可再生能源发电功率场景，有效降低电力系统调度维度与不确定性。文献[76]采用数据驱动分布鲁棒优化方法进行源荷不确定性电力系统经济调度，有效提升了调度的经济性。但目前基于数据驱动的电力调度研究仍存在可解释性差、可能导致违反系统约束条件的问题，进而影响电网安全。

联合驱动方法可以将数据驱动和知识驱动方法结合起来，利用数据驱动方法提供实时信息和优化算法，同时利用知识驱动方法提供先验知识和模型简化处理，从而加快求解速度并提高求解精度和可靠性，更好地利用数据驱动技术的优势，同时避免知识驱动方法的不足，实现更高效、可靠、安全的电力系统优化调度。

新型配电系统运行场景预测难度指数倍升高，形成调控复杂度“维度灾”，面对强不确定性和非线性维度高的新型配电系统调度任务时，知识的引入也可以有效弥补数据驱动方法因系统状态结构复杂易变所导致的求解精度问题，提高系统优化效果。

2.4.2　配电系统运行场景预测方法

海量分布式新能源接入配电网导致电力系统源-荷不确定性不断增强，为电力系统安全稳定运行带来了巨大挑战。目前配电网负荷周期特性降低，不可预测性增加，为电力电量平衡带来了挑战。

在负荷预测方面，精确的配电网负荷预测是有效降低源荷不确定的一种途径。文献[77]从用户角度出发，将用户群体进行划分，然后进行了负荷多步预测。文献[78]从数据信息本事出发，将负荷的时序性和日、周等周期性先验知识引入预测模型结构和处理单元的设计中以提高预测精度。文献[79]从预测模型框架出发，设计了一种新的多尺度分量特征学习框架，用于用户级超短期负荷预测。上述研究有效提高了负荷的预测精度，但是未来配电网灵活性资源占比逐步增加，配电网灵活性资源具有异质特性、时空分布特性及容量差异特性，现有的

负荷预测思路不能够准确预测配电网灵活性资源调节潜力与变化趋势，因此有必要针对配电网侧异质同构灵活性资源进行单独建模。

在分布式电源预测方面，集中式能源预测主要依靠于完备的气象数据和敏感关联信息挖掘[80-81]，但分布式电源预测数据不完备，集中式能源预测方法难以直接套用。针对分布式能源预测，文献[82]研究了分布式光伏在空间上的互补特性，有助于提高分布式光伏的预测精度。文献[83]以用户侧电表历史数据为可用信息，提出一种基于长短期记忆网络的个性化联邦学习光伏出力及负荷功率预测方法。文献[84]提出了基于建筑用能与可再生能源相匹配的预测技术。上述研究对灵活性可调节资源进行了预测，有效降低了电力系统备用容量，提高了电力系统的运行经济性。

配电网运行场景与气候环境、政策经济、地理区域等非用电因素存在密切关联，分析配电网系统不同电压等级、不同类型负荷容量、分布式源荷发/用电特性及柔性负荷容量等因素，建立考虑多时空运行特性的场景集划分模型；为增强场景预测能力，挖掘不同行业用电量在电价、居民收入、降雨量、温度等条件的特征是配电网运行场景预测的关键，提取关键特征作为预测模型的输入，表征不同场景集在不同置信区间下的响应特性、建立不同场景集的响应模型。结合各源、荷要素的演变过程增强预测性能，提升方法的可解释性，使用不完全理论方法确定场景生成与预测模型的权重，可提升新型配电系统源荷多时空尺度运行场景关联预测精度。

2.4.3 新型配电系统源网荷储协调优化控制策略

在新型配电系统“源网荷储”协同优化调度方面：文献[85]研究了源网荷储协同优化调度的重要性，结果表明储能系统在平抑波动、能量管理等方面起到重要作用，而源网荷储协同优化能够有效组织电源侧、电网侧、负荷侧及储能侧，实现“源-网-荷-储”互动；文献[86]针对高比例分布式光伏接入配电网引起的过电压问题，提出一种基于强化学习的分布式储能系统控制方案，但是单纯使用储能系统抑制过电压成本较高。针对源网荷储协调调度策略对新能源消纳的影响，文献[87]分析得出有效的源网荷储灵活互动调控策略可以减少可再生能源发电的弃光风率，提升利用效率，实现负荷的削峰填谷。针对源网荷储协调调度对电压控制的影响，文献[88]考虑了源网荷储之间的相互作用，建立了多电压等级含光伏的直流配电网多目标优化调度模型，可以显著降低系统运行成本、网络损耗率和电压偏差。而文献[89]研究了电力市场机制下含源网荷储互动的主动配电网多时间尺度有功/无功联合优化模型，在保证配电网收益最大化的同时消除了电压越限、抑制电压波动。以上研究主要集中于分布式电源消纳，通过源网荷储互动在保障电压稳定的前提下提升分布式电源消纳率，但并未考虑到新型配电系统资源接入的随机性对配电网优化调控策略的影响，且较少研究配电系统多时间尺度下区域间、层级间的功率能量平衡问题。

2.4.4 新型配电系统高效运行策略

在分层分区式控制研究方面：文献[88]侧重供电区域划分方面的研究，根据负荷峰谷耦合特性对网格化配电网供区划分进行优化改造，实现各供区内最优负荷匹配，以提升配电网的供电能力、可靠性以及经济性；文献[90]提出了考虑区域自治能力的配电网全局优化-区域自治调度策略，利用最优条件分解理论实现配电网全局优化与区域自治的分层协调求解；文献[91]提出了基于多代理系统的配电网分布式协调优化策略，各代理负责管理配电网某个区域的本地资源，代理间通过交替乘子算法实现多区域间分布式协同优化；文献[92]基于配电网多层级协调调度架构以及改进广义 Benders 分解法，将系统运行目标分解至各配电网区域，通过区域间的分布式迭代交互，实现区域自治和全局优化；文献[93]设计了基于目标级联法的交直流混合配电网分层优化运行架构，通过交互求解各层优化问题，实现全局优化目标；文献[94]针对含多微网的主动配电网，提出基于多代理的分层能量调度策略，在每一步中利用混合整数规划对最小成本问题进行优化。以上研究主要集中在配电系统“全局优化-区域自治”的分层分区优化调度方法，可一定程度上提高配电系统运行灵活性和可靠性，但运行效率已难以满足新型配电系统需求。

3 案例分析与应用实例

3.1 故障保护与自愈方法

在天津北辰大张庄智慧能源小镇，建有直流智能楼宇以及电梯、空调、显示大屏等 22 种直流用电设备，交直流混合配电网为小镇的交直流负荷提供稳定的电能。研究人员针对柔性交直流混合配电网快速保护，提出了交直流线路单端暂态量快速保护

新原理、快速电流差动保护新原理和方向纵联保护新原理，提升了保护动作速度和耐受过渡电阻能力；针对自愈控制，提出了基于改进滑膜变结构并考虑交流孤岛运行电流抑制的站级内外环控制方法，实现了交直流混合配电网在故障以后的快速平衡稳定，克服了传统自愈控制方法动态响应速度差、抗扰动冲击能力弱的问题，显著提升了自愈恢复期间的系统稳定性。该交直流混合配电网形成了集故障快速辨识、安全穿越、可靠自愈于一体的柔性交直流混合配电网保护与自愈控制关键技术体系，面对1500 余次故障的保护动作正确率达到 100%，显著提升了电力系统抵御故障能力，保障了新能源零脱网、设备零损坏、电压零闪动。

3.2　振荡分析与抑制策略

根据对洋山港降压站以及桥吊侧电机在待机、发电和用电状态下的振荡特征参数的分析，得出如下结论：

(1) 洋山港降压站在发生系统振荡事件时，桥吊负荷无论工作在发电状态、用电状态还是待机状态下，桥吊负荷馈线均存在 12.5 Hz 的低频振荡。当系统发生低频振荡时，桥吊在发电、用电及待机状态下产生的 1.25 次间谐波电流最大值分别为 38.8、28.6、30.2 A，对应的 10 kV 供电母线 1.25 次间谐波电压最大值分别为 608.7、625.2、630.4 V。

(2) 洋山港降压站在发生低频振荡时，最大电压振荡幅值可达 965.7 V，单相最大有功振荡幅值约 7.98 MW，单相最大无功振荡幅值约 8.35 MVar；在振荡过程中，降压站 10 kV 系统的 1.25 次间谐波电压可达 513.1 V，1.25 次间谐波电流约 762.7 A。

根据以上分析，洋山港降压站 10 kV 系统电压波动与闪变、间谐波电压、有功振荡幅值和无功振荡幅值均与间谐波电流存在一定的对应关系，因此只要将系统中的1.25次间谐波电流控制在一定范围内，即可有效抑制系统中的 12.5 Hz 低频振荡现象。对于洋山港降压站桥吊群配电系统，低频振荡控制的机理是通过电能质量控制装置来控制桥吊负荷注入系统的间谐波电流，从而有效减小系统中功率和电压振荡的幅值。

在洋山港配电系统低频振荡事件后，综合考虑采用基于超级电容器的电能质量控制装置，通过变压器接入洋山港降压站 10 kV 系统，可以对洋山港降压站桥吊负荷的间谐波电流进行控制。因此，可通过控制超级电容储能系统，使其输出的间谐波电流与桥吊负荷产生的间谐波电流相位相差 180°，即可有效减少桥吊负荷注入系统的间谐波电流，从而降低 10 kV 母线间谐波电压，达到降低电压波动、抑制低频振荡的目标。由于采用超级电容储能系统，因此该套系统还可实现对洋山港降压站随机功率潮流的控制。协调控制器检测中港降压站 10 kV 总进线的功率参数，与设定的放电阈值和充电阈值进行比较：当检测到的负荷功率大于放电阈值时，协调控制器给储能逆变器发送放电指令，使降压站 10 kV 总进线的负荷功率控制在放电网值之下；当检测到的负荷功率小于充电阈值时，协调控制器给储能逆变器发送充电指令，使降压站 10 kV 总进线的负荷功率控制在充电阈值之上。通过储能逆变器的充放电控制，使 10 kV 总进线的随机功率保持在一定的范围内，达到平衡负荷、提高系统稳定性的目的。

3.3　稳定控制方法

以安徽金寨县为例，目前该县具备风电、光伏、生物质等多种可再生能源形式，建设模式多样(农户屋顶、村镇集中、小型电站等)，其中户用光伏 26.2 MW，村集体光伏电站 29.53 MW、地面光伏电站 80 MW、生物质发电 36 MW。整体表现出分散接入、全额上网、低压“裸接”的突出特点，存在协调困难、供用失衡、缺乏保护等突出问题，其主要需求是实现有序接入、高效消纳、并网可控。

2016 年，首批“国家重点研发计划项目”已对“分布式可再生能源发电集群并网消纳关键技术及示范应用”进行了立项资助，旨在提出分布式发电集群规划设计方法，突破高效灵活并网与集群协调控制关键技术，建成含多种类(风/光/生物)、多容量(瓦级到兆瓦级)、大规模(>200 MW)、高渗透率(超100%)的分布式可再生能源发电集群灵活并网集成示范工程，从而形成典型建设模式。金寨示范工程划分为 7 个集群，部署群控群调系统 1 套，安装新型并网装置 195 台(套)，电能质量监测和治理装置 72 台(套)。通过分布式电源集群优化规划、灵活并网设备合理配置及群控群调系统的分层优化调控，优化了示范区内系统潮流分布，有效提升了供电质量，实现低压台区线路损耗降低 2.68%~3.87%。达到了平抑本地电压、就近消纳可再生电源、降低可再生电源成本的控制效果。

3.4　协同调度技术

现有海量分布式资源的分层优化机制并不完善，在多层级优化调度时，分布式资源调节能力较

弱，且一般仅考虑有功或无功，这将损失虚拟电厂(virtual power plant，VPP)的部分调节能力。以中国某 51 节点农村电网为例，目前该电网具有 3 条主支路、3 条联络线支路、19 处光伏电源、51 处负荷，并通过智能软开关接入储能装置。此外，该电网还包括投切多个电容器、静止无功补偿器(static Var compensator，SVC)等补偿装置，额定容量为 500 kVar，接入形态较为分散，负荷功率及电源功率在时空尺度上具有较高不确定性，存在功率预测难、储能利用率低、经济性不足等缺点。对此，相关人员考虑投切电容器、SVC、有载分接开关(on-load tap changer，OLTC)及储能部分多目标联合协调调度，构建日前-日内两阶段优化模型。随后基于 KL 散度构建源荷不确定性模糊集用于准确预测、精确调度，给出日前两阶段分布鲁棒优化模型转化过程和基于列与约束生成算法的求解方法。采用基于网侧资源协调的日前-日内优化调度模型后，该农网能够充分发挥网侧调控设备的快慢调节特性，提升配电网运行效益。日前阶段的智能软开关(soft open point，SOP)、OLTC 和网络重构协调优化运行总成本相比传统调度方式降低了约 8.0%。日内多目标滚动优化能够兼顾网损和电压优化，且可得到更为精确的日内各快速调控设备运行策略，预测准确度提升了 5.2%。

首先将分布式资源聚合形成 VPP 及其对应虚拟电厂可行域(virtual feasible region, VFR)，进一步基于 VFR 求解多 VPP 协同参与电网调度的优化问题。首先对基于分布式资源聚合体形成的 VFR 建模，进而通过顶点枚举法求解全功率因数范围下的 VFR，该部分为资源聚合与聚合体优化运行方法提供了基础支撑。

4 结论及展望

4.1 结论

1）合理、明确的演化路径与演化方向是新型配电系统研究领域的重要基石与发展先决条件，其根本途径是构建一次/二次系统融合的新型配电系统信息-物理融合模型并开展结构形态、控制形态的时域仿真和演化推演。现阶段，面向新型配电系统的形态演化、耦合关系及仿真建模技术研究均已开展，并取得了阶段性成果。相关研究成果表明，新型配电系统未来形态演化路径与方向应呈现高比例交直流混联、高比例交直流混联、高对称性、弱中心化控制、综合能源枢纽平台的显著特征。

2）多类型、差异化、高比例的电力电子装置交直流混联接入后，一方面配电系统谐波频率拓宽、

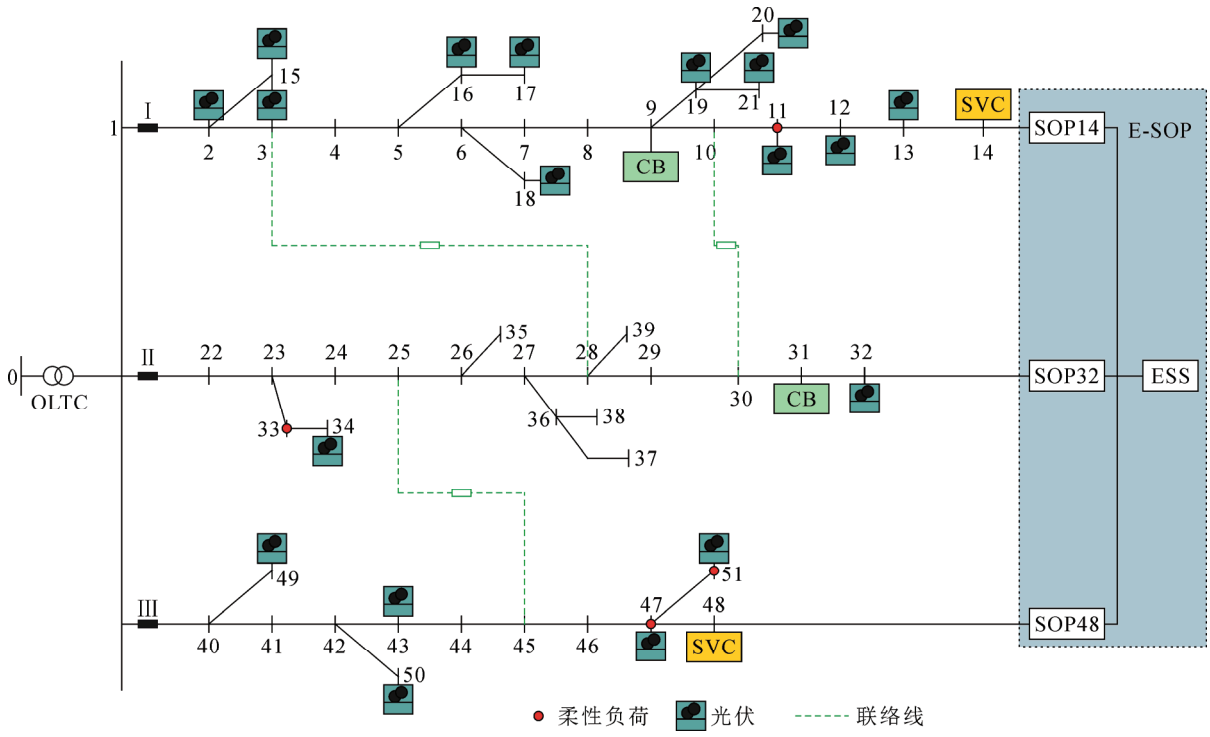


图 7 某 51 节点农村电网调度策略应用

Fig.7 Application of scheduling strategy for a 51 node rural power grid

谐波含量激增，显著提升了谐波谐振的发生风险；另一方面，配电系统振荡不再是少量类型设备间的动态交互的结果，而将是多重振荡诱因共同作用下的产物。当前研究已经在谐波谐振机理、设备级小信号动态模型、小信号稳定性分析基础理论等方面取得了阶段性的成果。但随着新型配电系统中电力电子化程度的不断加深，如何高效准确刻画海量差异化电力电子设备动态交互下的系统小信号特性、如何挖掘并有效利用多重失稳因素叠加作用下的系统多时间尺度阻尼调节潜力，将成为保障新型配电系统小干扰稳定需要攻克的关键问题。

3）现有故障机理、保护与自愈研究工作或聚焦于辐射状交流配电网，没有充分考虑交直流混联多分支交互耦合的影响，缺乏灵活性，提出的改进保护方法过于依赖电源特性，不具有普适性，而自愈重构方法则难以应对网络变化和源荷不确定出力等情况，鲁棒性不足；或关注于单一电力电子环节对保护性能影响，但对于不同电力电子器件之间的交互耦合对故障传播机理的影响、应对分布式电源即插即用以及多电力电子控制影响下的保护性能研究不够，对新形态演变情况下自愈重构优化提升方法研究不足，不能适用于分布式能源高比例分散接入和多分支、多互联复杂拓扑情况下的新型配电系统。

4）高比例分布式电源、高比例电力电子化设备/负荷广泛接入后，新型配电系统对于高度随机复杂运行场景的适应能力显著不足。现有研究未计及电网结构形态、控制形态与多变流器的交互耦合特性，没有充分考虑高比例分布式电源、高比例电力电子化设备和电压敏感负荷接入后配电网的有功-无功传输耦合特性，在多分布式资源的交互过程以及故障-恢复的全过程考量不足，对交直流混联的新型配电系统多运行模式下的协调控制策略及高度分散灵活资源的动态聚合方法有待进一步研究。

5）配电网场景预测需要使用复杂的模型来处理复杂的数据，每种模型的使用条件和适用情况都不同，由于海量异质资源的非线性和随机性特点，在建模过程中，预测误差可能会受到经验或训练差异的影响。另外，配电网场景需要综合考虑气象、社会、用户类型等多种情况，这些复杂场景之间存在耦合关系，在处理大量数据时，计算复杂度可能会非常高，进而导致建模过程变得缓慢或不可行，研究分层分区的输电网与配电网之间的高效协同框架可以有效降低电网调度经济性和提升电网运行安全性。

4.2　展望

1）在新型配电系统规划建设、运营管理维度，电力市场环境与因素是未来新型配电系统发展管理体系建设应主要关注的方向与领域。在关键技术维度，数字化字数赋能配电系统各个环节是未来新型配电系统发展的必由之路，软件定义概念、数字孪生技术、多要素可视化建模技术、人工智能技术等数字化技术是未来新型配电系统发展路径上的关键技术，对于解决目前多利益主体“四可”问题具有重大意义，同时，在新兴数字化技术的应用下，多来源数据的交互融合壁垒也有望被打破，进一步强化新型配电系统的数字化属性与智能属性。

2）新型配电系统中多类型、多样化电力电子设备与复杂网络强耦合，导致多时间尺度振荡难以抑制、故障发展及传播路径复杂，现有研究未能揭示新型配电系统多时间尺度振荡和故障发展及传播的内在机理。在未来的研究工作中，应考虑新型配电系统各环节电气物理耦合机制，揭示广域分散源荷资源与高度电力电子化配电系统耦合下的多模态振荡机理，探索适应源荷频繁互动、即插即用下的振荡抑制方法。

3）针对新型配电系统保护及自愈存在的问题，应采用合理降阶处理、分段线性化等方式建立电力电子环节等值模型，深入剖析交、直流故障传播机理，研究交、直流故障电流解析方法；应改变保护与控制的交互模式，提出与控制解耦的保护新原理，构建交、直流混联配电系统体系下的分层保护体系；利用智能方法或概率模型考虑“源网荷储”的多重不确定性因素，需进一步加强故障定位技术准确性和快速性，实现拓扑发展和渗透率变化等影响下的高鲁棒性自愈重构。

4）高比例广域分散资源接入背景下，新型配电系统动态电压支撑是一件工程应用属性极强的工作。从动态电压支撑的理论分析到实际现场工程应用仍需要同步结合新能源换流设备、无功补偿设备、配电系统信息系统的开发及产学研用各方的通力合作。

5）开发更加复杂的深度学习、强化学习等先进技术，自动调整预测模型参数有助于提高预测准确性和稳定性。考虑广域分布式源荷多时空尺度与不确定性条件下各要素的联合概率分布特性，构建配电系统负荷水平、可参与调节容量等划分运行场景集模型，根据源荷多种时空尺度下特征，运行特

征行为表征的差异，研究新型配电系统多时空尺度运行场景预测方法。同时，通过使用智能模型和算法，可以更好地管理电力系统和其他能源系统，提高系统的可靠性和效率。

参考文献 References

[1] 盛万兴，段 青，梁 英，等. 面向能源互联网的灵活配电系统关键装备与组网形态研究[J]. 中国电机工程学报，2015，35(15)：3760-3769.
SHENG Wanxing, DUAN Qing, LIANG Ying, et al. Research of power distribution and application grid structure and equipment for future energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3760-3769.

[2] CAI D F, WANG Z W, MIAO S H, et al. Wind-photovoltaic-energy storage system collaborative planning strategy considering the morphological evolution of the transmission and distribution network[J]. Energies, 2022, 15(4): 1481.

[3] 肖 勇，陆文升，李云涛，等. 城市配电网发展形态指标体系及其评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(1)：62-71.
XIAO Yong, LU Wensheng, LI Yuntao, et al. Research on index system and its evaluation methods of urban distribution network development form[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 62-71.

[4] 张笑弟，高 强，潘 弘.“双碳”目标下新型配电系统功能形态及规划体系[J]. 电力系统及其自动化学报，2022，34(5)：96-101.
ZHANG Xiaodi, GAO Qiang, PAN Hong. Function, form and planning system of novel power distribution system with “double-carbon” goal[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(5): 96-101.

[5] 郑庆春，武志刚. 基于异速生长仿真的配电网结构形态演化模型及其规模特性分析[J]. 电气自动化，2021，43(1)：95-97，111.
ZHENG Qingchun, WU Zhigang. Configuration evolution model for the distribution network and analysis of its scaling characteristics based on allometric growth simulation[J]. Power System & Automation, 2021, 43(1): 95-97, 111.

[6] 张智刚，康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报，2022，42(8)：2806-2818.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818.

[7] 李 凯，赵争鸣，袁立强，等. 面向交直流混合配电系统的多端口电力电子变压器研究综述[J]. 高电压技术，2021，47(4)：1233-1250.
LI Kai, ZHAO Zhengming, YUAN Liqiang, et al. Overview on research of multi-port power electronic transformer oriented for AC/DC hybrid distribution grid[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1233-1250.

[8] 刘雪涛. 基于能量枢纽的源网荷储多能协同优化研究[D]. 北京：华北电力大学，2022.
LIU Xuetao. Research on multi-energy cooperative optimization of source-network-load-storage resources based on energy hub[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2022.

[9] SUN F J, HAN A Y, ZHANG Y, et al. Distributed optimal scheduling of AC/DC Hybrid distribution network based on ADMM[C] // Proceedings of the 3rd International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEECT). Macau, China: IEEE, 2021: 235-239.

[10] 刘科研，盛万兴，赵鹏杰，等. 信息物理环境下基于电力电子变压器的跨台区光伏消纳策略[J]. 电力自动化设备，2020，40(12)：66-72，87.
LIU Keyan, SHENG Wanxing, ZHAO Pengjie, et al. Photovoltaic consumption strategy across multiple transformer districts based on PET under cyber physical system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 66-72, 87.

[11] 胡臻达，王海冰，吴桂联，等. 国内外典型配电网结构及其发展趋势综述[J]. 电器与能效管理技术，2017(5)：37-43.
HU Zhenda, WANG Haibing, WU Guilian, et al. Review of typical distribution network structures and its development at home and abroad[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(5): 37-43.

[12] PANE R, NISHIKAWARA K, STROMOTICH F. The 4×6 network: distribution system application[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(1): 284-289.

[13] 葛少云，刘 帅，李荣超，等. 中压蜂巢状配电网结构研究及应用[J]. 山东电力技术，2023，50(8)：1-10.
GE Shaoyun, LIU Shuai, LI Rongchao, et al. Research and application of medium voltage honeycomb distribution network structure[J]. Shandong Electric Power, 2023, 50(8): 1-10.

[14] 刘科研，盛万兴，赵鹏杰，等. 基于一致性算法的跨台区光伏分布式控制策略[J]. 高电压技术，2021，47(12)：4431-4439.
LIU Keyan, SHENG Wanxing, ZHAO Pengjie, et al. Distributed control strategy of photovoltaic cross-district based on consistency algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4431-4439.

[15] 刘科研，盛万兴，李 昭，等. 基于等价输入干扰的分布式光伏电源出力控制策略[J/OL]. 电网技术，2023：1-12[2023-12-19]. http://kns.cnki. net/kcms/detail/11.2410.TM.20231106.1031.003.html.
LIU Keyan, SHENG Wanxing, LI Zhao, et al. Equivalent input disturbance-based output autonomous control and disturbance rejection strategy for distributed power generator[J/OL]. Power System Technology, 2023: 1-12[2023-12-19]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410. TM. 20231106.1031.003. html.

[16] 康田园，刘科研，李 昭. 基于光伏逆变器调节的中低压配电网电压分层协调控制策略[J/OL]. 高电压技术，2023：1-11[2023-12-19]. https：//doi. org/10.13336/j. 1003-6520. hve. 20231008.
KANG Tianyuan, LIU Keyan, LI Zhao. Hierarchical voltage coordination control strategy of middle and low-voltage level power distribution network based on photovoltaic inverter adjustments[J/OL]. High Voltage Engineering, 2023: 1-11[2023-12-19]. https://doi.org/10.13336/j. 1003-6520. hve. 20231008.

[17] SAMADI A, SHAYESTEH E, ERIKSSON R. Multi-objective coordinated droop-based voltage regulation in distribution grids with PV systems[J]. Renewable Energy, 2014, 71: 315-323.

[18] WECKX S, DRIESEN J. Optimal local reactive power control by PV inverters[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4): 1624-1633.

[19] WATSON J D WATSON N R, LESTAS I. Optimized dispatch of energy storage systems in unbalanced distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(2): 639-650.

[20] SU X J, MASOUM M A S, WOLFS P J. Optimal PV inverter reactive power control and real power curtailment to improve performance of unbalanced four-wire LV distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(3): 967-977.

[21] 胡 臻，李欣然，刘光晔，等. 基于动态阻抗的源–网–荷耦合特性分析方法[J]. 中国电机工程学报，2017，37(4)：1106-1113.
HU Zhen, LI Xinran, LIU Guangye, et al. An analyzing method of coupling characteristic of source-network-load based on dynamic impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1106-1113.

[22] RUAN G C, ZHONG H W, ZHANG G L, et al. Review of learning-assisted power system optimization[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(2): 221-231.

[23] 刘　东，盛万兴，王　云，等. 电网信息物理系统的关键技术及其进展[J]. 中国电机工程学报，2015，35(14)：3522-3531.
LIU Dong, SHENG Wanxing, WANG Yun, et al. Key technologies and trends of cyber physical system for power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3522-3531.

[24] 王　云，刘　东，李庆生. 主动配电网中柔性负荷的混合系统建模与控制[J]. 中国电机工程学报，2016，36(8)：2142-2150.
WANG Yun, LIU Dong, LI Qingsheng, et al. Modeling and control of flexible load based on hybrid system in active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2142-2150.

[25] 曹一家，张宇栋，包哲静. 电力系统和通信网络交互影响下的连锁故障分析[J]. 电力自动化设备，2013，33(01)：7-10.
CAO Yijia, ZHANG Yudong, BAO Zhejing. Analysis of cascading failures under interactions between power grid and communication network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 7-10.

[26] 秦苏亚，薛永端，刘砾钲，等. 有源配电网小电流接地故障暂态特征及其影响分析[J]. 电工技术学报，2022，37(3)：655-666.
QIN Suya, XUE Yongduan, LIU Lizheng, et al. Transient characteristics and influence of small current grounding faults in active distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(3): 655-666.

[27] 郑　涛，邹芃鋆，王子鸣. 计及锁相环动态响应特性的光伏并网系统故障电流解析计算[J]. 电网技术，2022，46(12)：4656-4665.
ZHENG Tao, ZOU Pengying, WANG Ziming. Fault current analysis of photovoltaic grid-connected system considering dynamic response characteristics of PLL[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4656-4665.

[28] 朱永强，刘　康，张　泉，等. 混合微电网交流侧故障传播机理及抑制方法[J]. 电机与控制学报，2020，24(4)：1-11.
ZHU Yongqiang, LIU Kang, ZHANG Quan, et al. Fault propagation mechanism and suppression method on AC side of hybrid microgrid[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(4): 1-11.

[29] LUO Y P, HE J H, LI M, et al. Analytical calculation of transient short-circuit currents for MMC-based MTDC grids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(7): 7500-7511.

[30] 高生凯，曹　炜，张旭航，等. 一种改进型配网自适应过流保护方法[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(7)：110-119.
GAO Shengkai, CAO Wei, ZHANG Xuhang, et al. A novel adaptive overcurrent protection method for a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 110-119.

[31] 和敬涵，李文立，张大海，等. 基于节点分支电流幅值的含 DG 配网差动保护原理[J]. 电网技术，2018，42(11)：3601-3609.
HE Jinghan, LI Wenli, ZHANG Dahai, et al. Differential protection scheme based on current amplitude of branch node for distribution network with DG[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3601-3609.

[32] ZHENG X D, CHAO C X, WENG Y, et al. High-frequency fault analysis-based pilot protection scheme for a distribution network with high photovoltaic penetration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(1): 302-314.

[33] 和敬涵，周　琳，罗国敏，等. 基于单端电气量的多端柔性直流配电系统暂态保护[J]. 电力自动化设备，2017，37(8)：158-165.
HE Jinghan, ZHOU Lin, LUO Guomin, et al. Transient protection based on single-end electrical signals for multi-terminal flexible DC distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 158-165.

[34] BHARGAV R, GUPTA C P, BHALJA B R. Unified impedance-based relaying scheme for the protection of hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(2): 913-927.

[35] 雷绍兰，王士彬，胡晓倩，等. 配电网供电恢复的混沌免疫算法[J]. 高电压技术，2009，35(6)：1492-1496.
LEI Shaolan, WANG Shibin, HU Xiaoqian, et al. Chaotic optimization integrated with artificial immune algorithm for distribution service restoration after faults[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(6): 1492-1496.

[36] 王红君，陈智晴，赵　辉，等. 考虑风光荷不确定性的配电网故障恢复策略[J]. 电网技术，2022，46(11)：4356-4363.
WANG Hongjun, CHEN Zhiqing, ZHAO Hui, et al. Reconstruction strategies for fault recovery of active distribution network with distributed generation uncertainties[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4356-4363.

[37] 苏　粟，李泽宁，靳小龙，等. 基于机会约束规划的含智能楼宇主动配电网分布式能量管理策略[J]. 中国电机工程学报，2023，43(10)：3781-3793.
SU Su, LI Zening, JIN Xiaolong, et al. Distributed energy management strategy for active distribution network incorporating intelligent buildings based on chance-constrained programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3781-3793.

[38] 宋　毅，孙充勃，李　鹏，等. 基于智能软开关的有源配电网供电恢复方法[J]. 中国电机工程学报，2018，38(15)：4390-4398.
SONG Yi, SUN Chongbo, LI Peng, et al. SOP based supply restoration method of active distribution networks using soft open point[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4390-4398.

[39] 吴翔宇，张晓红，许　寅，等. 微电网(群)宽频振荡分析和抑制研究进展与展望[J]. 电网技术，2023，47(9)：3727-3742.
WU Xiangyu, ZHANG Xiaohong, XU Yin, et al. Research progress and prospect of wide-band oscillations analysis and suppression for microgrid (clusters)[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3727-3742.

[40] 黄　金，张桂南，高　翔. 大型枢纽地区车网电气耦合系统谐波过电压产生机理研究[J]. 铁道学报，2020，42(12)：65-71.
HUANG Jin, ZHANG Guinan, GAO Xiang. Study on harmonic overvoltage generation mechanism of vehicle-traction network coupling system in large hub area[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(12): 65-71.

[41] 李霞林，郭　力，黄　迪，等. 直流配电网运行控制关键技术研究综述[J]. 高电压技术，2019，45(10)：3039-3049.
LI Xialin, GUO Li, HUANG Di, et al. Research review on operation and control of DC distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3039-3049.

[42] 陶海东，胡海涛，朱晓娟，等. 车网耦合下的牵引供电系统谐振不稳定机理分析[J]. 中国电机工程学报，2019，39(8)：2315-2324.
TAO Haidong, HU Haitao, ZHU Xiaojuan, et al. Mechanism on resonance instability of traction power supply system considering interaction between trains and networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2315-2324.

[43] LIU H C, SUN J. Voltage stability and control of offshore wind farms with AC collection and HVDC transmission[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4): 1181-1189.

[44] 年　珩，杨　军，陈　亮，等. 交直流混合供电系统直流侧阻抗建模及稳定性分析[J]. 高电压技术，2020，46(10)：3477-3487.
NIAN Heng, YANG Jun, CHEN Liang, et al. DC impedance modeling and stability analysis of AC/DC hybrid power supply system[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3477-3487.

[45] 彭　克，李云利，赵学深，等. 考虑随机扰动的直流配电系统宽频振荡镇定控制[J]. 电力系统自动化，2023，47(22)：129-137.
PENG Ke, LI Yunli, ZHAO Xueshen, et al. Wide-band oscillation stabilization control of DC distribution system considering random disturbance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 129-137.

[46] 陈　庆，范栋琛，王晨清，等. 交直流配电网小信号模型和直流侧低频振荡分析[J]. 电力工程技术，2022，41(1)：117-125，200.
CHEN Qing, FAN Dongchen, WANG Chenqing, et al. Small signal model and DC side low frequency oscillation analysis of AC/DC distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 46(1): 117-125, 200.

[47] 马宁宁，谢小荣，贺静波，等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报，2020，40(15)：4720-4731.
MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720-4731.

[48] LI Z Y, HE Z Y, SONG Y T, et al. Stochastic assessment of harmonic propagation and amplification in power systems under uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 1149-1158.

[49] 石磊磊. 电力电子化主动配电网分散谐波电网侧全局协同治理研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2020.
SHI Leilei. Research on global cooperative harmonic mitigation on the grid side of power electronic active distribution network[D]. Qinhuangdao, China: Yanshan University, 2020.

[50] 王强钢，周亦尧，廖建权，等. 直流配电网电能质量研究综述[J]. 电力系统自动化，2023，47(7)：193-207.
WANG Qianggang, ZHOU Yiyao, LIAO Jianquan, et al. Review on power quality in DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(7): 193-207.

[51] 陶海东. 高铁车网耦合系统谐波不稳定机理及抑制方法[D]. 成都：西南交通大学，2020.
TAO Haidong. Study on harmonic instability mechanism and mitigation methods in high-speed railway traction power supply system[D]. Chengdu, China: Southwest Jiaotong University, 2020.

[52] 李海荣，彭　克，陈　羽，等. 直流配电系统直流电压控制时间尺度的低频振荡机理分析[J]. 高电压技术，2021，47(6)：2232-2239.
LI Hairong, PENG Ke, CHEN Yu, et al. Mechanism analysis of low frequency oscillation on DC voltage control time scale in DC distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 2232-2239.

[53] 付　媛，邵馨玉，赵欣艳，等. 基于附加电量的直流微电网动态稳定控制策略[J]. 电力自动化设备，2021，41(5)：136-144，159.
FU Yuan, SHAO Xinyu, ZHAO Xinyan, et al. Dynamic stability control strategy of DC microgrid based on additional electric quantity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 136-144, 159.

[54] 孙玉巍，朱吉林，付　超. 级联式电力电子变压器非线性综合控制策略[J]. 中国电机工程学报，2020，40(9)：2891-2902.
SUN Yuwei, ZHU Jilin, FU Chao. Nonlinear integrated control strategy of cascaded power electronic transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2891-2902.

[55] 袁义生，唐　喆. 智能配电网电压跌落下的电力电子变压器运行研究[J]. 电力自动化设备，2019，39(2)：44-49.
YUAN Yisheng, TANG Zhe. Research on PET in smart distribution network under voltage sag[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 44-49.

[56] LIU W K, ZHAN M. Self-sustained low-frequency oscillation and its suppression in a practical AC/DC distribution network[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(18): 3786-3798.

[57] 罗华伟，王立娜，吴昌龙，等. 含电池储能的直流配电网振荡抑制有源阻尼控制及参数计算方法[J]. 电网技术，2022，46(11)：4403-4413.
LUO Huawei, WANG Li'na, WU Changlong, et al. Active damping control and parameter calculation for resonance suppression in DC distribution network[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4403-4413.

[58] 叶剑桥，李生虎，齐　楠，等. 基于拓展等效开环过程的多 DFIG 风电场振荡模态交互路径分析[J/OL]. 中国电机工程学报，2023：1-13[2023-12-13]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20231026.1556.014. html.
YE Jianqiao, LI Shenghu, QI Nan, et al. Analysis to interaction paths of oscillation modes in Multi-DFIG wind farm based on extended effective open-loop process[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2023: 1-13 [2023-12-13]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20231026.1556.014. html.

[59] ZHANG H B, XIANG W, LIN W X, et al. Grid forming converters in renewable energy sources dominated power grid: control strategy, stability, application, and challenges[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(6): 1239-1256.

[60] 屠　勇，苏建徽，杨向真，等. 虚拟振荡器控制的新型逆变器无线并联方案[J]. 中国电机工程学报，2016，36(15)：4184-4191.
TU Yong, SU Jianhui, YANG Xiangzhen, et al. A novel virtual oscillator control in wireless parallel connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4184-4191.

[61] 邹培根，孟建辉，王　毅，等. 灵活虚拟同步机主要控制参数对系统频率稳定性的影响分析[J]. 高电压技术，2018，44(4)：1335-1342.
ZOU Peigen, MENG Jianhui, WANG Yi, et al. Influence analysis of the main control parameters in FVSG on the frequency stability of the system[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1335-1342.

[62] 吕志鹏，盛万兴，钟庆昌，等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报，2014，34(16)：2591-2603.
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its application in micro-grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603.

[63] 袁小明，程时杰，胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报，2016，36(19)：5145-5154.
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154.

[64] 王晶晶，廖思阳，姚良忠，等. 基于一致性算法的直流受端电网分布式调频资源协同频率控制[J]. 电网技术，2022，46(3)：888-896.
WANG Jingjing, LIAO Siyang, YAO Liangzhong, et al. Coordinated frequency control strategy for DC receiving-end power grid with distributed frequency regulation resources using consensus algorithm[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 888-896.

[65] 武　艺，姚良忠，廖思阳，等. 一种基于改进 K-means++算法的分布式光储聚合调峰方法[J]. 电网技术，2022，46(10)：3923-3931.
WU Yi, YAO Liangzhong, LIAO Siyang, et al. A peak shaving method of aggregating the distributed photovoltaics and energy storages based on the improved K-means++Algorithm[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3923-3931.

[66] XU Y Y, YAO L Z, LIAO S Y, et al. Optimal frequency regulation based on characterizing the air conditioning cluster by online deep learning[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(5): 1373-1387.

[67] 王光瑞，李正烁，刘聪聪. 柔性负荷聚合灵活性的多时间颗粒度鲁棒评估方法[J]. 电力自动化设备，2023，43(7)：167-174，203.
WANG Guangrui, LI Zhengshuo, LIU Congcong. Multi-time granu-

larity robust evaluation method for flexible load aggregation flexibility[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(7): 167-174, 203.

[68] WANG C F, LI Z, LIANG J, et al. A dynamic equivalent method of wind farm considering wind farm dispersity and wind turbine difference[C]//Proceedings of 2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Portland, USA: IEEE, 2016: 1-6.

[69] 郭庆来，孙宏斌，张伯明，等. 基于无功源控制空间聚类分析的无功电压分区[J]. 电力系统自动化，2005，29(10)：36-40，54.
GUO Qinglai, SUN Hongbin, ZHANG Boming, et al. Power network partitioning based on clustering analysis in MVar control space[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 36-40, 54.

[70] 刘运鑫，姚良忠，廖思阳，等. 分布式光储参与的直流受端近区配电网暂态电压控制方法[J]. 电网技术，2023，47(3)：1250-1261.
LIU Yunxin, YAO Liangzhong, LIAO Siyang, et al. Transient voltage control of distribution network in near-zone of DC receiving end with distributed photovoltaics and energy storage participated[J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 1250-1261.

[71] LI S W, WU H B, ZHOU Y Y, et al. Two-stage voltage control strategy in distribution networks with coordinated multimode operation of PV inverters[J]. IET Renewable Power Generation, 2023, 17(1): 66-82.

[72] 季　亮，郭佳龙，李博通，等. 不对称电压跌落下分布式新能源多目标主动控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制，2022，50(20)：41-49.
JI Liang, GUO Jialong, LI Botong, et al. A multi-objective active control strategy for distributed generation under asymmetric voltage sag[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 41-49.

[73] 杨　铭，曹　武，赵剑锋，等. 受控电压/电流源型变流器混合多机暂态电压支撑策略[J]. 电工技术学报，2023，38(19)：5207-5223，5240.
YANG Ming, CAO Wu, ZHAO Jianfeng, et al. Transient voltage support strategy for hybrid multi-converter of controlled voltage/current source converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(19): 5207-5223, 5240.

[74] 王守相，陈海文，李小平，等. 风电和光伏随机场景生成的条件变分自动编码器方法[J]. 电网技术，2018，42(6)：1860-1867.
WANG Shouxiang, CHEN Haiwen, LI Xiaoping, et al. Conditional variational automatic encoder method for stochastic scenario generation of wind power and photovoltaic system[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1860-1867.

[75] CHEN Y Z, WANG Y S, KIRSCHEN D, et al. Model-free renewable scenario generation using generative adversarial networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3265-3275.

[76] 税　月，刘俊勇，高红均，等. 考虑风电不确定性的电气能源系统两阶段分布鲁棒协同调度[J]. 电力系统自动化，2018，42(13)：43-50，75.
SHUI Yue, LIU Junyong, GAO Hongjun, et al. Two-stage distributed robust cooperative dispatch for integrated electricity and natural gas energy systems considering uncertainty of wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 43-50, 75.

[77] 陈　辰，马恒瑞，陈来军，等. 基于用户群体划分的多步短期负荷预测方法[J]. 高电压技术，2023，49(10)：4213-4222.
CHEN Chen, MA Hengrui, CHEN Laijun, et al. Multi-step short-term load forecasting method based on user group division[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4213-4222.

[78] 李　丹，孙光帆，缪书唯，等. 基于多维时序信息融合的短期电力负荷预测方法[J]. 中国电机工程学报，2023，43(增刊 1)：94-106.
LI Dan, SUN Guangfan, MIAO Shuwei, et al. A short-term power load forecasting method based on multidimensional temporal information fusion[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(Supplement 1): 94-106.

[79] 臧海祥，陈玉伟，程礼临，等. 基于多尺度分量特征学习的用户级超短期负荷预测[J/OL]. 电网技术，2023：1-16[2023-11-26]. https：//doi. org/10.13335/j. 1000-3673. pst. 2023.1416.
ZANG Haixiang, CHEN Yuwei, CHENG Lilin, et al. User level ultra-short-term load forecasting based on multi-scale component feature learning[J/OL]. Power System Technology, 2023: 1-16[2023-11-26]. https: //doi. org/10.13335/j. 1000-3673. pst. 2023.1416.

[80] 马　伟，乔　颖，鲁宗相，等. 基于敏感气象特征因子筛选与优化组合的短期风电功率预测[J]. 电网技术，2023，47(7)：2897-2904.
MA Wei, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. Short-term wind power prediction based on combination of screening and optimizing sensitive meteorological characteristics[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 2897-2904.

[81] 乔　颖，鲁宗相，闵　勇. 提高风电功率预测精度的方法[J]. 电网技术，2017，41(10)：3261-3268.
QIAO Ying, LU Zongxiang, MIN Yong. Research & application of raising wind power prediction accuracy[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3261-3268.

[82] 阮呈隆，李康平，李正辉，等. 分布式光伏集群功率短期预测的空间互补特性初探[J/OL]. 电力系统自动化，2023：1-11[2023-11-26]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20231016.1447.004.html.
RUAN Chenglong, LI Kangping, LI Zhenghui, et al. Preliminary study on spatial complementarity characteristics of short-term power prediction for distributed photovoltaic clusters[J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 2023: 1-11[2023-11-26]. http: //kns. cnki. net/kcms/detail/32.1180. TP. 20231016.1447.004. html.

[83] 高　漪，周　瑜，张安龙，等. 整县光伏下基于个性化联邦学习的光伏出力及负荷功率预测[J]. 电网技术，2023，47(11)：4629-4637.
GAO Yi, ZHOU Yu, ZHANG Anlong, et al. Personalized federated learning framework for countywide PV generation and load forecasting[J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4629-4637.

[84] 苏鹏伟，赵　军，邓　帅，等. 基于预测技术的建筑可再生能源系统匹配特性分析[J]. 太阳能学报，2019，40(8)：2360-2367.
SU Pengwei, ZHAO Jun, DENG Shuai, et al. Analysis of matching performance of building renewable energy system based on forecasting technology[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, 40(8): 2360-2367.

[85] 姜　琦，黄　堃，赵　俊，等. 基于遗传算法的主动配电网“源网荷储”协调优化模型研究[J]. 电力与能源，2020，41(1)：1-5，19.
JIANG Qi, HUANG Kun, ZHAO Jun, et al. Study of “power-network-load-storage” coordinated optimization model for active distribution network based on genetic algorithm[J]. Power & Energy, 2020, 41(1): 1-5, 19.

[86] 陈美福，夏明超，陈奇芳，等. 主动配电网源-网-荷-储协调调度研究综述[J]. 电力建设，2018，39(11)：109-118.
CHEN Meifu, XIA Mingchao, CHEN Qifang, et al. Review on coordination control of generation-grid-load-storage[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(11): 109-118.

[87] 权　然，金国彬，陈　庆，等. 源网荷储互动的直流配电网优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报，2021，33(2)：41-50.
QUAN Ran, JIN Guobin, CHEN Qing, et al. Optimal dispatching of DC distribution network based on source-grid-load-storage interac-

tions[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(2): 41-50.

[88] 徐 韵，颜湘武，李若瑾，等. 电力市场环境下含“源–网–荷–储”互动的主动配电网有功/无功联合优化[J]. 电网技术，2019，43(10)：3778-3789.
XU Yun, YAN Xiangwu, LI Ruojin, et al. Joint optimization of active and reactive powers in active distribution network with “generation-grid-load-energy storage” interaction in power market environment[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3778-3789.

[89] 韩 伟，彭玉丰，严海娟. 能源互联网背景下的电力储能技术展望[J]. 电气技术与经济，2020(5)：11-12，18.
HAN Wei, PENG Yufeng, YAN Haijuan. Prospect of electric power storage technology under the background of energy internet[J]. Electrical Equipment and Economy, 2020(5): 11-12, 18.

[90] 汤 波，杨 鹏，余光正，等. 基于负荷峰谷耦合特性的中压配电网供区优化方法[J]. 中国电机工程学报，2022，42(19)：7051-7062.
TANG Bo, YANG Peng, YU Guangzheng, et al. Power supply area optimization method of medium voltage distribution network based on load peak valley coupling characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 7051-7062.

[91] 孟繁星，孙英云，蒲天骄，等. 考虑区域自治能力的主动配电网分层优化调度[J]. 电力系统自动化，2018，42(15)：70-76.
MENG Fanxing, SUN Yingyun, PU Tianjiao, et al. Hierarchical optimal scheduling model for active distribution network considering regional autonomy ability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 70-76.

[92] RAJAEI A, FATTAHEIAN-DEHKORDI S, FOTUHI-FIRUZABAD M, et al. Developing a distributed robust energy management framework for active distribution systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(4): 1891-1902.

[93] LI Z G, WU W C, ZHANG B M, et al. Decentralized multi-area dynamic economic dispatch using modified generalized benders decomposition[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 526-538.

[94] QI C, WANG K Y, FU Y, et al. A decentralized optimal operation of AC/DC hybrid distribution grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6095-6105.



盛万兴
1965—，男，博士，研究员，博导
主要从事配电网运行与控制、分布式发电和微电网、能源信息物理系统等领域关键技术研究
E-mail: wxsheng@epri.sgcc.com.cn

SHENG Wanxing
Ph.D., Professor



刘科研(通信作者)
1978—，男，博士，教授级高工，博导
主要从事配电网运行控制、复杂配电网仿真分析、配电大数据与数字孪生等领域关键技术研究
E-mail: liukeyan@epri.sgcc.com.cn

LIU Keyan
Ph.D., Professor
Corresponding author



李 昭
1993—，男，博士，工程师
主要从事分布式电源配电网运行与控制、配电网仿真分析等领域关键技术研究
E-mail: 1izhao1@epri.sgcc.com.cn

LI Zhao
Ph.D.



白牧可
1985—，女，博士，高工
主要从事综合能源系统、配电网信息物理系统等领域关键技术研究
E-mail: baimuke@epri.sgcc.com.cn

BAI Muke
Ph.D.
Senior engineer

收稿日期 2023-12-04 修回日期 2023-12-28 编辑 程子丰