

# 常态化安全高效双向潮流的新型配电系统形态

肖峻, 贺国伟, 王丹, 李承晋, 王成山

(智能配用电装备与系统全国重点实验室(天津大学), 天津市 南开区 300072)

## A New Distribution System Configuration Featured With Normalized Secure and Efficient Bidirectional Power Flow

XIAO Jun, HE Guowei, WANG Dan, LI Chengjin, WANG Chengshan

(State Key Laboratory of Smart Power Distribution Equipment and System (Tianjin University), Nankai District, Tianjin 300072, China)

**ABSTRACT:** The future configuration of the distribution system presents various possibilities. Considering the actual conditions of China's distribution networks is characterized by 'red zone' restrictions, high cost of energy storage, and well-developed but underutilized infrastructure, this paper proposes a normalized secure and efficient bidirectional power flow configuration of hierarchical distribution networks. First, existing configurations and major new configurations of distribution networks are introduced. Secondly, a new distribution system configuration with normalized bidirectional power flow is proposed. Normalized bidirectional power flow encourages both forward and reverse power flow at different voltage levels under safe operating conditions. This paper argues that the inherent spatiotemporal mismatch between renewable generation and load is not merely a normal operational characteristic but, more fundamentally, justifies the existence of hierarchical distribution networks. Distribution networks should facilitate more flexible and extensive integration of distributed renewable energy with limited energy storage and flexible interconnections, maximizing the utilization potential at all voltage levels. Finally, a planning scheme based on the proposed distribution system configuration is developed using the extended T24D10 test case. The test case includes complete voltage-level sequences for the power distribution system, covering 0.4kV, 10kV, 110kV, and 220kV. A technical and economic comparison with a local-balancing configuration demonstrates the superiority of the proposed configuration. At the same renewable energy penetration rate, the proposed configuration significantly reduces the required energy storage capacity and improves bidirectional utilization efficiency across all voltage levels. This configuration also has the potential to increase the upper limit of the red zone under non-mandatory energy storage integration

and limited energy storage allocation on the grid side. The proposed configuration and operational mode require minimal modifications to existing distribution systems, making it a promising direction for developing new distribution systems suited to China's national conditions.

**KEY WORDS:** distribution system; configuration; normalized bidirectional power flow; local balancing

**摘要:** 新型配电系统未来形态存在多种可能性。针对我国当前前红区限制多、配储造价高、配电网利用率不高等实际情况, 该文提出了一种常态化安全高效双向潮流多级配电系统的新形态。首先, 介绍了我国配电系统现有形态和主要的新型配电系统形态。其次, 提出了常态化双向潮流的新型配电系统形态, 即在保证系统安全前提下, 各级配电系统鼓励常态化反向潮流。该文认为, 新能源与负荷在时空上不完全平衡是正常的, 这是配电系统存在的价值。配电系统可以在有限配储和有限柔性互联下实现分布式新能源更自由更充分的接入, 各级配电系统潜力同时得到充分利用。最后, 基于T24D10扩展算例构造了所提新形态的规划方案。算例包括0.4、10、110及220kV完整的用于配电的电压等级序列。通过与就地平衡规划方案的技术经济比较, 展示了该文所提形态的优越性。常态化双向潮流形态在同等渗透率下显著降低了配储比例, 大幅提高了各级配电网的双向综合利用率。该文形态还具有分布式新能源不强制配储和电网侧有限配储下提高红区上限的潜力, 并对现有配电系统形态及运行方式改变较小, 是一个符合我国国情的很好的新型配电系统发展方向。

**关键词:** 配电系统; 形态; 常态化双向潮流; 本地平衡

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2025.1328

## 0 引言

随着新能源渗透率的不断提高, 配电系统高效接纳分布式新能源面临严峻困难。2023年6月, 国家能源局发布了《关于印发开展分布式光伏接入电网承载力及提升措施评估试点工作的通知》<sup>[1]</sup>, 选

基金项目: 国家自然科学基金项目(52177105)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (52177105).

择山东、黑龙江、河南、浙江、广东、福建 6 个试点省份开展了分布式光伏接入电网承载力评估工作。结果显示 5 个省份大部分光伏接入区域，承载力评估结果等级为红色，这表明当前配电系统新能源接纳能力已接近上限。

2024 年 9 月，《中国能源报》报道，现有配电系统的资产利用效率尚未充分发挥<sup>[2]</sup>，其原因一是根据当前  $N-1$  设计原则，互联的 2 回馈线正常情况下只能各带其容量 50% 的负荷，以便一回馈线故障时，能将其所带负荷转移到另一回馈线上，而承接负荷的馈线不会过载；二是导线截面和变压器的容量都是基于全年最大负荷来考虑的，但最大负荷占全年的时间可能不到 5%，大部分时间的负荷远低于最大负荷值，这就造成平时配电资产的闲置。

综上，目前存在分布式新能源接纳能力不足与配电系统资产得不到充分利用两大问题。问题的根源是现有配电系统的形态，在设计之初是一个接受上级电网注入功率<sup>[3]</sup>、满足负荷需求的供电系统；其建设过程中侧重于一次网架的建设<sup>[4]</sup>，调节手段不足，调节能力较为缺乏<sup>[5]</sup>；信息共享、数据采集和监测设备相对缺乏，各供电区域还存在信息孤岛。因此，配电系统难以适应高渗透率分布式新能源的接入是目前我国迫切需要解决的问题。

在发展新型配电系统背景下，众多学者开展了对我国新型配电系统形态的研究。文献[6]提出了蜂巢配电网构想，微电网通过“源网荷储”规范化配置构成自治的六边形小型供用电系统。相邻微电网间利用电力电子的智能功率/信息交换基站<sup>[7]</sup>，实现微电网内供需基本平衡、微电网间功率互备。文献[8]提出网孔型配电系统，通过柔性互联装置链接多条线路形成网孔，本质与蜂巢配电网一致。柔性互联配电网通过电力电子装置将多回中压<sup>[9]</sup>或低压馈线<sup>[10]</sup>进行互联，实现功率互济。元胞配电网是将现有配电系统自上而下的管理体系改为多个对等的 Cell，每个 Cell 内部配置足够的有功备用容量和无功补偿容量进行电压和功率平衡控制，Cell 之间基于平衡功率市场机制进行功率交换<sup>[11]</sup>。文献[12]提出交直流混联配电系统，通过电力电子柔性互联，实现交直流配电系统间的功率互济。以上新形态虽可能大幅提高配电系统消纳能力，但也存在一个突出问题，即需大规模增加储能装置和电力电子柔性互联装置，带来巨量投资和更高维护费用。

本文认为，分布式新能源接纳难并非是因为当前设备容量不足，而是因为现有配电调度部门不明确系统运行边界。配电系统安全域<sup>[13-15]</sup>能完整刻画

配电系统的运行边界，但目前处于理论研究阶段，在实际调度运行中尚未得到应用。我国配电系统尚未充分发挥其潜力，实际运行中过早采取了限制分布式新能源接入的措施。DL/T2041—2019《分布式电源接入电网承载力评估导则》规定配电设备反向负载率允许限值为 0.8<sup>[16]</sup>，而实际运行中只要控制不超过 1.0(变压器由于过载能力还可更高)，系统仍是安全的。本文认为，刻画新型配电系统运行的安全边界是实现配电系统安全高效接纳高比例分布式资源的前提。

智能电网是通过引入分布式计算和现代通信技术，实现电网智能化，形成电力与信息的双向流动，建立高度自动化和广泛分布的能量交换网络<sup>[17-18]</sup>。在智能电网概念引导下，本文提出一种新的适合我国实际的新型配电系统形态，即常态化安全高效双向潮流多级配电系统，简称“常态化双向潮流”。该形态降低了对柔性互联装置和储能的需求，实现该形态有两个关键技术，一是通过基于安全域的在线安全监控<sup>[14]</sup>；二是分布式资源互动参与系统安全辅助服务<sup>[19]</sup>。

本文研究对象为全电压等级配电系统，包含 35/66/110kV 高压配电系统、10kV 中压配电系统、0.4kV 低压配电系统以及大型城市中起配电作用的 220kV 配电系统。章节安排如下：首先，介绍我国配电系统现有形态和研究者提出的主要新型配电系统形态。其次，提出常态化双向潮流的新形态。最后，采用多电压等级配电系统算例展示本文所提形态，并与其他形态对比。

## 1 我国现有配电系统形态

我国现有配电系统“源网荷”的角色定位明确且固定<sup>[5]</sup>。传统上，配电系统与大电网之间为单向从属关系，配电系统依托大电网，实现电能的单向分配<sup>[3]</sup>。配电系统具有分层分区的形态特征，按电压等级具有自上而下的层级划分，分为高压、中压和低压配电系统。城市地区配电系统普遍采用“网格”形态，分区运行管理。同一电压层级采用辐射状、链式或环网等几个标准解析模式。城市配电系统普遍环网建设，开环运行。

在源荷方面，负荷与可再生能源出力在空间上存在不匹配。城市地区负荷密度大，但新能源资源少；农村地区负荷密度低，但新能源资源量大。很多地区分布式光伏渗透率已经很高。对于分布式新能源接入容量，国家标准规定了“红区”原则：反向负载率低于 80%，同时不得向 220kV 侧反送功

率<sup>[16]</sup>。目前我国配电系统中,电动汽车充电设备普及;分布式电源很少配储且未要求强制配储,公共网侧储能很少。柔性电力电子开关的应用尚未推广。

## 2 典型新型配电系统形态

在现有的未来新型配电系统形态中,蜂巢配电网和柔性互联配电网最具典型性,前者是源荷就地平衡方案的代表,后者是跨一定范围实现源荷平衡方案的代表。以下简要介绍这两种形态。

### 2.1 蜂巢形态

蜂巢配电网是微电网通过“源网荷储”规范化配置构成自治的六边形小型供用电系统<sup>[6]</sup>,见附录A图A1。相邻微电网间利用智能功率/信息交换基站<sup>[7]</sup>,实现微电网内供需基本就地平衡、微电网间功率互备。功率交换基站基于多端柔性开关(soft open point, SOP),有效实现馈线间的功率流动。信息交换基站实现各个蜂巢单元之间的站间通信。

蜂巢配电网因其特有拓扑结构,具有分层分区协调控制、单元自治、网络架构坚强、新能源消纳能力强、运行方式灵活和支持电力市场等优点。

### 2.2 柔性互联形态

柔性互联配电网通过柔性互联装置(flexible interconnection device, FID)连接两回或多回馈线,通过对馈线层面进行有功/无功功率控制<sup>[20]</sup>进而统筹配电系统中各类可调度源荷资源,最终实现系统整体运行水平的提升<sup>[21]</sup>。目前研究较为广泛是中压柔性互联和低压柔性互联,其结构分别见附录A图A2和图A3。

图A2中,柔性互联装置1连接同一变电站引出的多回馈线,用于调节同一变电站不同馈线之间的潮流;柔性互联装置2连接不同变电站引出的馈线,用于调节不同变电站之间潮流。图A3中,柔性互联装置用于连接3个台区的低压侧,用于调节台区间的潮流,实现负载均衡。

柔性互联装置由多个电压源型变流器(voltage source converter, VSC)在直流侧相连构成,通过PQ控制策略控制合环电流,实现无冲击合环,通过V/f控制策略控制输出电压和频率,实现无冲击解环<sup>[10]</sup>,有效调节潮流在所联馈线间的流动。

柔性互联配电网扩大了源荷平衡范围,能在低压台区、中压馈线范围内实现源荷互济、潮流灵活调节,提高供电可靠性和新能源承载力。

## 3 常态化双向潮流新型配电系统形态

### 3.1 形态描述

为解决我国发展新型配电系统面临的新能源

接入受限以及未来形态储能和柔性互联装置投资大的问题,结合我国配电系统设备新、网架强、潜力巨大的实际,本文提出一种包含多级配电系统的常态化安全高效双向潮流的新型配电系统形态,简称常态化双向潮流配电系统,如图1所示。该形态适用于我国典型城市(35/66/110kV、10kV、0.4kV)配电系统,包括了低压台区、中压馈线组、中压配电系统和高压配电系统,也适合部分大型城市起配电作用的220kV电网。

由图1看出,双向潮流在高、中、低压配电系统内充分流动,配电系统在安全前提下达到较高的正向和反向负载率。常态化的含义不仅是反向潮流经常出现;而是安全的反向潮流不再是治理对象,是受到鼓励或欢迎的。这是因为源荷时空不匹配性是自然属性,多级配电系统常态化双向潮流符合配电系统发展的自然分布。如果鼓励合理安全的反送,将形成跨多电压等级且大地理范围的双向能量通道,这将充分发挥各级配电系统的双向传输价值。源荷若不能就地平衡,引起新能源反向越界问题,从规划角度的首选措施不是配储,而是利用配电系统来形成双向能量通道,实现更大范围的源荷平衡。所利用配电线路电压等级越高,配电系统实现源荷平衡的地理范围越大。

### 3.2 形态命名

蜂巢和柔性互联是现有文献提出的两种代表性的新型配电系统形态。“常态化双向潮流”是本文提出的形态。这些形态的提出是不同学者从不同角度提出的:蜂巢形态打破了现有配电系统拓扑,从放射联络的中心化结构转变为去中心化的对等结构;柔性互联形态是在现有配电系统拓扑基础上,在馈线联络等关键位置通过电力电子装置进行柔性互联,与之对比的是传统开关的刚性互联;本文所提常态化双向潮流形态建立在现有配电系统拓扑基础上,在安全前提下鼓励反向潮流。

可见,上述形态提出的历史背景不同,并未统一命名,造成它们的名称间逻辑关系没有严格界限,甚至有一定交叉。例如,蜂巢形态中也包括了大量柔性互联;蜂巢和柔性互联也存在反向潮流;本文形态中也不排斥局部的柔性互联。

本文的形态命名,提取了该形态中最重要的特征,即常态化安全、高效(高利用率)、大地理范围、跨多电压等级的反向潮流,与之对比是尽量就地平衡,抑制大地理范围的、跨电压等级的反向潮流。

常态化双向潮流形态符合我国配电系统现状

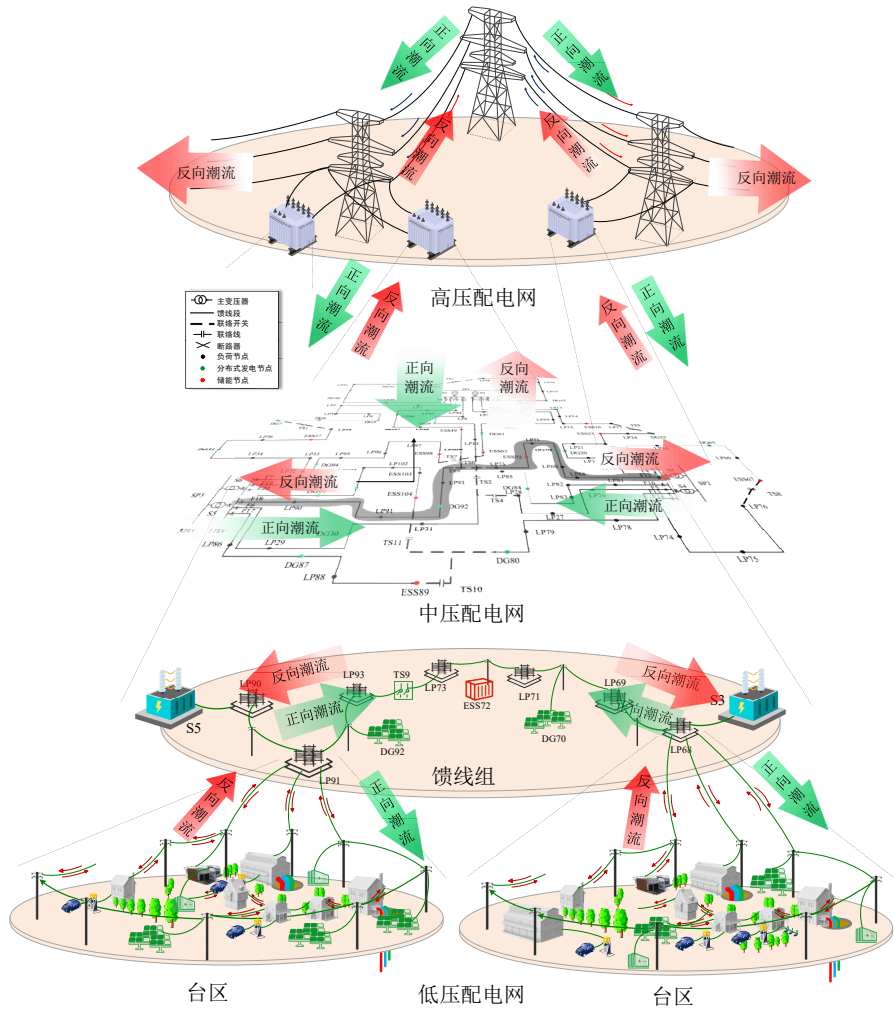


图 1 常态化双向潮流配电系统形态

Fig. 1 Normalized bidirectional power flow distribution network configuration

和趋势。我国配电系统经过二十多年的大规模建设改造，已形成坚强网架，具有很大接纳新能源的潜力。应在有限储能和有限柔性互联下实现分布式新能源更自由的接入；同时实现配电系统设备的更充分利用。最终建成安全高效的新型配电系统。

### 3.3 形成路径

从我国现有配电系统，随新能源渗透率提高，逐步发展到常态化双向潮流形态。发展过程中，若出现新能源反向安全越界，首选各级配电系统的大范围源荷平衡来消除越界；若不能解决越界问题，其次的措施是鼓励新能源互动参与安全调节，再鼓励 V2G 电动汽车、负荷的互动参与安全调节，最后考虑配储或柔性互联等更昂贵的措施。

上述措施优先级是从规划建设角度，对已投运的储能和电力电子设备，在运行时应优先利用。

常态化双向潮流方案的落地实现，再无需配置新的量测装置和开发新的系统，应利用现有的融合终端以及调度配电自动化系统。将安全域和分布式资源安全服务作为高级应用嵌入融合终端和现有

系统，借助终端和配电自动化系统的自然换代或扩展升级，实现安全域和分布式资源安全服务功能。

### 3.4 形态对比

本文从网架结构、主要设备、关键技术、配电网负载率等角度与几种典型未来形态对比，见表 1。

从表 1 看出，相比其他 2 种形态，本文形态的先进性在于能在有限配储和有限柔性互联下实现投资和运维费用明显更低。原因是基于安全域理论精确刻画系统安全边界，在安全前提下充分挖掘现有网络和分布式资源的潜力，实现安全高效。

本文形态对现有网架改变小，易于过渡。但调度部门需改变现有运行模式，鼓励安全反向潮流。

本文形态的实现主要依靠二次系统的功能扩展，即新建全电压等级配电系统安全域监控体系，做到安全性可观可控以及源网荷全面参与安全调节。安全域监控体系和分布式资源安全辅助服务，是本文形态落地的两项关键技术，其介绍见附录 B。

总之，本文提出的新形态在安全性、经济性以及过渡难易方面均具有明显优势。面临的挑战是对

表 1 不同未来配电系统形态对比  
Table 1 Comparison of different future distribution network configurations

形态	网架	设备	技术	反向 负载率/%	优势	问题
蜂巢	六边形自治单元， 多单元形成蜂巢	智能功率交换基站； 信息交换基站	站间通信与 系统通信技术； 电源、储能、负荷等 优化调控技术	≤80	运行方式灵活；新能源 消纳能力强； 自治单元韧性强	配储和柔性互联， 费用高； 对现有网架改变大， 不易过渡
柔性互联	中压馈线多端互联， 台区间低压互联	SOP 为代表的 柔性互联装置	柔性电力 电子技术	≤80	柔性闭环运行，消纳能力强； 有功无功调节灵活； 供电可靠性高	柔性互联装置， 建设和维护费用高
常态化双向 潮流(本文)	现有结构，形成 跨电压等级、 大地理范围双向 能量通道	配电主站和融合终端 集成具有分布式资源 互动功能的安全域监控 高级应用(无需新设备)	安全域在线 安全监控； 分布式资源 安全辅助服务	>80	安全性高，配电网利用率高； 降低配储和柔性 互联要求，费用低；对现有 网架改变小，易过渡	需解决好中低压配电 数据利用难题； 需协调分布式资源与 主网互动

配电系统信息化水平(特别是数据利用水平)和调度运行水平提出了更高的要求。

## 4 算例分析

### 4.1 算例设计

本文采用算例 T24D10 见附录 C 图 C1，设置 10 组 IEEE 33 节点系统接至一个 IEEE RTS 24<sup>[22]</sup> 系统。算例包含承担配电作用的 220kV 电网，8 个 110kV 高压配电系统(HD1—HD8)以及 10 组 10kV 中压配电系统(D1—D10)。发电机参数见附录 C 表 C1，线路参数见附录 C 表 C2。

高压配电系统 HD1—HD8 配置集中式风电场和光伏电站；负荷、风电场和光伏电站接入电网所在母线、数量和容量见附录 C 表 C3。

中压配电系统 D1—D10 分布于城市中心、城市近郊以及工业园区。负荷、分布式光伏以及风电场的参数见附录 C 表 C4。D1—D10 中配置分布式风电和光伏，采用 0.4kV 接入系统。在 DG 渗透率上，充分考虑了未来高渗透率新能源接入配电系统场景。在城市郊区，其负荷密度远小于城市中心，但其有足够空间建设可再生能源发电，因此设置远高于城市中心渗透率。负荷大小、光伏以及风电出力来自北方某城区年度数据，风电典型日出力曲线见附录 C 图 C2，光伏典型日出力曲线见附录 C 图 C3，不同配电系统典型日负荷曲线见附录 C 图 C4。

### 4.2 场景生成

对负荷及新能源出力全年数据逐一分析将带来很大的计算负担，因此采用文献[23]方法对 8760h 数据处理，生成典型场景。步骤如下：

步骤 1：数据离散化。

设定从 0 到 100%的 7 个负荷离散区间：[0, 5%], [5%, 10%]...[80%, 100%]，每个区间设定一个分组值，同理设定 7 个可再生能源离散区间，见附

录 D 表 D1。将原始 8760h 对应的数据中每个功率值除以装机容量，得到以百分比表示的数据组。根据所在表 D1 离散区间的范围，用对应分组值表示，得到以分组值表示的 8760 个离散数据组。

为分析反向潮流时保守起见，做如下假定：例如，负荷小于 5%统一划分至区间[0, 5%]，并用 0%表示该区间负荷，新能源出力在[90%, 100%]区间，用 100%来表示。

步骤 2：数据聚合。

寻找在负荷功率、风电功率、光伏功率 3 个维度上分组值都完全相同的数据组。完全相同的数据组聚合为一个场景，共得到 101 个场景，并统计相同场景的数量，得到每个场景的持续时间，见附录 D 表 D2。

从上述 2 个步骤看出，生成的 101 个场景未丢失极端运行状态。

以下选取 3 个典型场景进行介绍。

场景 2 为反送最严重情况，发生在春节期间，工厂放假，白天光照强烈，光伏出力大，为 65%，风电出力为 50%；但负荷较小，仅为 5%，工业园区负荷为 0，新能源功率渗透率为 175%。

场景 39 为反送较严重情况，风电出力达到最大值 95%，光伏出力较大为 75%，但负荷也较大 50%，主要为工业负荷。该场景为正常工作日，光照强烈且大风天气，新能源功率渗透率为 130.5%。

场景 77 为最大负荷情况，负荷大小为 100%，新能源出力最小，光伏出力为 0，风电出力为 30%。该场景为正常工作日，且为阴雨天气，新能源功率渗透率为 11.7%。

高压配电系统 HD1—HD8 在典型场景下负荷见附录 D 表 D3，HD1 中风电场和光伏装机容量及 3 个典型场景出力见附录 D 表 D4，HD2—HD8 中风电场和光伏电站在 3 个典型场景出力不再单独列

出，中压配电系统 D1—D10 在 3 个典型场景负荷及 DG 出力见附录 D 表 D5。

### 4.3 形态方案

首先，按常态化双向潮流形态设计该算例全电压等级配电系统规划方案。在高渗透率再生能源接入且安全校核的背景下，中压配电系统向高压配电系统常态化反送功率、高压配电系统向 220kV 电网常态化反送功率。本文方案中，高压中压配电系统均无公共储能配置，分布式新能源侧未强制配储。

考虑到前文所述蜂巢配电网、网孔型配电系统、元胞配电系统等已有配系统形态的一致特征是源荷就地平衡，因此对比方案设为源荷就地平衡方案。此外，柔性互联形态与本文新形态相同点是扩大源荷平衡的范围，但目前研究仅局限于中低压，互联范围较小；同时本文新形态也允许柔性互联在一些关键位置合理使用，故未与柔性互联对比。

就地平衡方案通过在不同电压等级配储来实现。具体根据文献[16]热稳定评估导则绿色等级要求： $(P_{DG}-P_L)/S_c \times 100 \leq 0$  来计算配储容量， $P_{DG}$  为分布式电源出力， $P_L$  为同时刻负荷，即负荷减去分

布式电源外的其他电源(本文算例中即储能) 出力。

场景 2 是所有时刻中潮流反送最严重的场景，该场景下储能充电功率需求也最大；根据场景 2 来配置储能，可满足其他时刻对于储能的需求。

高压配电系统 HD1-HD8 中可再生能源功率、负荷功率以及储能电站配置见附录 E 表 E1。储能总容量为 370MW，按 2h 配置。

中压配电系统 D1-D10 中可再生能源功率、负荷功率以及储能电站配置见附录 E 表 E2，储能总容量为 38.5MW，按 2h 配置。

### 4.4 潮流对比

对两个规划方案的 101 个场景进行潮流计算。110kV 及以上高压配电系统采用 Matpower 进行潮流计算，10kV 中压配电系统采用 OpenDSS 计算。不同电压等级配电系统在边界处进行信息交换，交叉迭代后实现潮流计算收敛，计算方法<sup>[24]</sup>见附录 F。在场景 2 下，常态化双向潮流方案的潮流分布见图 2；源荷就地平衡方案潮流图见附录 G 图 G1。以下从下到上逐层分析对比各级配电系统潮流。

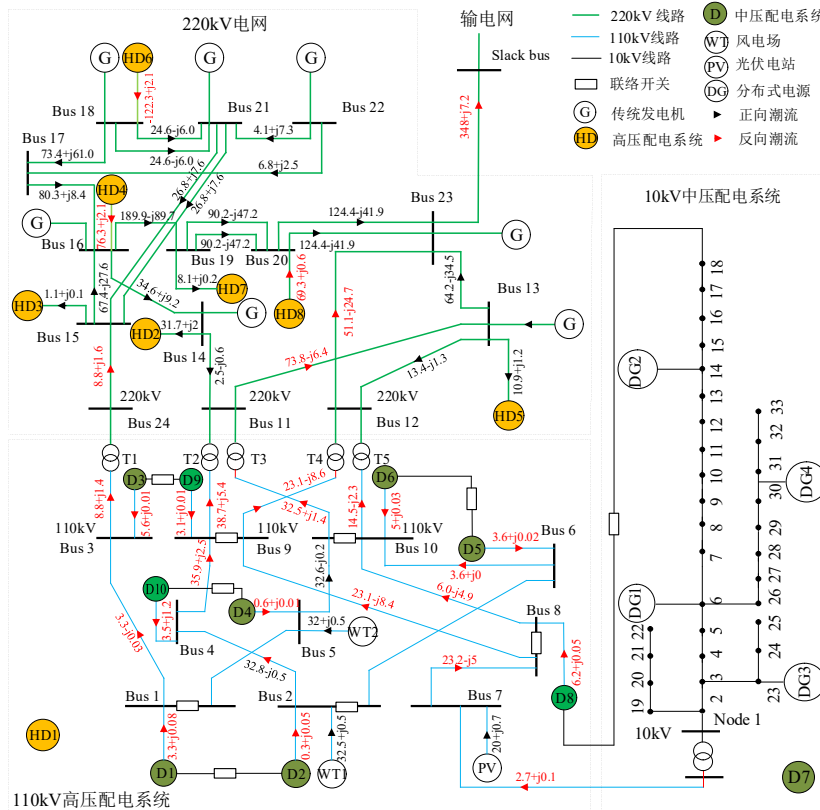


图 2 场景 2 常态化双向潮流方案的潮流分布

Fig. 2 Power flow of normalized reverse power flow scheme in scenario 2

#### 4.4.1 中压配电系统潮流

通过观察各配电系统与高压配电系统的联络线潮流，来分析配电系统的整体潮流情况。3 个典型场景下，D1—D10 与高压配电系统的联络线潮流

对比见表 2。

由表 2 可知，常态化双向潮流方案，无需配置储能，在相同可再生能源渗透率条件下，无论正向潮流(场景 77)还是反向潮流(场景 2、场景 39)，联

表 2 两种方案 D1—D10 联络线潮流对比  
Table 2 Comparison of tie-line power flow of D1—D10

起点 母线	终 点	源荷就地平衡/MW			常态化双向潮流/MW		
		场景 2	场景 39	场景 77	场景 2	场景 39	场景 77
1	D1	0.2	0.7	16.0	-3.3	-1.3	19.5
2	D2	0.2	0.3	1.3	-0.3	-0.2	1.8
3	D3	0.4	0.5	3.7	-5.6	-4.5	9.7
5	D4	0.4	0.7	16.5	-0.6	0.7	17.5
6	D5	0.4	0.6	3.4	-3.6	-3.4	7.4
10	D6	0.5	0.4	11.6	-5	-0.6	17.1
7	D7	0.3	0.4	3.6	-3.2	-3.1	7.1
8	D8	1	0.5	3.8	-6	-0.5	10.8
9	D9	0.4	0.2	10.1	-3.1	0.2	13.6
4	D10	0.5	0.6	8.5	-3.5	0.6	12.5
合计		4.3	4.9	78.5	-34.2	-12.1	117.0

注：功率值为负时，表示潮流反向。

络线功率都大于对应场景下就地平衡方案。分场景的详细潮流特征分析见附录 H1。

#### 4.4.2 高压配电系统潮流

HD1 与 220kV 电网之间通过 5 条联络线进行联络。3 个典型场景下，高压配电系统 HD1 与 220kV 电网之间联络线潮流，对比见表 3。

表 3 HD1 与 220kV 电网间联络线潮流对比  
Table 3 Comparison of tie-line power flow between HD1 and 220kV network

起点 母线	终 点	源荷就地平衡方案/MW			常态化双向潮流方案/MW		
		场景 2	场景 39	场景 77	场景 2	场景 39	场景 77
24	3	0.6	3.3	11.5	-8.8	-13.6	31.3
11	9	1.1	8.8	13.2	-38.7	-21.3	35.9
12	9	0.3	4.5	7.0	-23.1	-4.0	19.1
11	10	1.4	5.6	16.6	-32.5	-20.8	45.1
12	10	1.9	1.1	10.4	-14.6	-8.3	28.4
合计		5.3	23.3	58.7	-117.7	-68	159.8

由表 3 可知，常态化双向潮流方案无需配置储能，在相同可再生能源渗透率条件下，无论正向潮流(场景 77)还是反向潮流(场景 2、39)，联络线功率都大于对应场景下就地平衡方案。分场景的详细潮流特征分析见附录 H2。

#### 4.4.3 220kV 电网潮流

3 个典型场景下，两种规划方案 220kV 及以上电网潮流对比见表 4。

分析表 4 可知：

1) 新能源出力大的场景(场景 39)中，常态化双向潮流方案的净负荷明显更小，净负荷小的原因是潮流反送至 220kV 电网，实现了不同高压配电系统之间源荷更充分匹配。

2) 净负荷小表明来自输电网功率更小，并且传统发电机出力更小，有利于减少碳排放。

3) 重负荷场景(场景 77)中，结论相反，即就地平衡方案的净负荷更小。其原因是通过储能放电

表 4 两种方案 220kV 电网与输电网联络线潮流对比  
Table 4 Comparison of tie-line power flow between 220kV network and transmission network

类型	净功率/MW					
	源荷就地平衡方案			常态化双向潮流方案		
	场景 2	场景 39	场景 77	场景 2	场景 39	场景 77
传统发电机	35.3	45.3	143.0	21.8	23.5	209.0
HD1	5.3	23.3	58.7	-117.7	-68.0	121.0
HD2	31.7	103.7	104.0	31.7	133.2	210.0
HD3	1.0	82.6	70.4	1.0	93.2	228.3
HD4	3.6	105.4	110.5	-76.3	0.0	-31.7
HD5	10.9	29.6	157.5	10.9	201.1	200.7
HD6	7.6	132.3	50.0	-122	0.0	-40.7
HD7	8.1	46.4	109.6	8.1	107.2	258.4
HD8	0.6	15.5	38.0	-69.3	0.0	-69.7
损耗	2.8	21.3	35.4	7.4	14.6	37.4
小计	36.3	514.8	591.1	-348	457.8	704.9
来自输电网	36.3	514.8	591.1	-348	457.8	704.9

减少了净负荷。

#### 4.5 技术经济比较

首先，针对两个方案的 101 个场景潮流计算结果，统计最大电压偏移以及全年电量损耗，分别见附录 I1 和 I2；接着，再对高压和中压配电系统进行主变  $N-1$  和馈线  $N-1$  安全分析，结果详见附录 I3 表 I3-I6；然后，计算配电网的资产利用率<sup>[25]</sup>，过程见附录 I4，结果见表 I7 和表 I8；最后，计算初始投资和年运维费用，过程见附录 I5，结果见表 I9。两个方案技术经济比较结果见表 5。

表 5 方案技术经济比较  
Table 5 Technical and economic comparison

参数	源荷就地平衡方案	常态化双向潮流方案
$N-1$ 通过率/%	100	100
最大电压偏移/%	+5.9	+6.5
配电网资产利用率/%	43.3	72.5
正向利用率/%	42.1	49.4
反向利用率/%	1.2	23.2
网络损耗率/%	4.3	4.5
储能损耗率/%	0.4	0
总损耗率/%	4.7	4.5
年损耗费用/万元	8535	3901.7
投资/亿元	1.5	0.68
年运维费用/万元	300	134

由表 5 可以看出：

1) 两个方案主变和馈线  $N-1$  通过率都是 100%， $N-1$  安全是配电系统规划的基本准则，两方案通过闭环设计的方式都满足  $N-1$  要求。

2) 两方案电压最大偏移均在允许范围内<sup>[26]</sup>，均为正向偏移。两方案的新能源都是分布式接入，相对集中式接入，对静态电压稳定<sup>[27]</sup>和暂态电压稳定都是有利的<sup>[28]</sup>。

3) 在配电网资产利用率尤其是反向利用率上，

常态化双向潮流方案优势显著。原因是在安全前提下，鼓励潮流在不同电压等级电网之间充分流动，实现了低电压等级源荷在更高电压等级上的匹配，从而提高各级配电网的反向利用率。

4) 常态化双向潮流方案虽网络损耗更高，但没有储能充放电损耗，因此总损耗更低。

5) 源荷就地平衡方案投资和运维费用，都明显更高，原因是大量配储；常态化双向潮流方案投资主要用于安全域监控主站和终端。

#### 4.6 演化过程

以算例为例模拟从现状演化发展到常态化安全高效双向潮流新形态的典型过程，如表 6 所示。

表 6 常态化双向潮流新形态的典型演化形成过程  
Table 6 Typical roadmap of new normalized bidirectional power flow configuration

阶段	总负荷/MW	新能源装机容量/MW	容量渗透率/%	技术手段
初始阶段：现状配电系统	1086.6	515.0	47.4	—
阶段一：建立安全域监控体系	1103.9	830.1	75.2	中、低压配电系统安全域控制
		967.0	87.6	高压配电系统安全域控制
阶段二：分布式电源安全辅助服务	1421.5	1569.3	110.4	1057MW 分布式新能源参与，SRC 650MW
阶段三：V2G 电动汽车、负荷、储能安全辅助服务	1593.3	1916.7	120.3	934MW 可调负荷参与，SRC 410MW
		2031.5	127.5	430MW 的 V2G 电动汽车参与，SRC 130MW
阶段四：关键位置配储、柔性互联	1611.3	2052.2	128.8	新增 0.4kV 储能 90 套，共 36MW/72MW·h，SRC 22MW
		2106.0	130.7	新增 10kV 储能 30 套，共 90MW/180MW·h，SRC 60MW
	1637.7	2153.6	131.5	新增 0.4kV SOP: 20 台，SRC 20MW
		2190.1	133.7	新增 10kV SOP 10 台，SRC 50MW

算例电网现状总负荷 1086MW，新能源渗透率 47%。在规划各阶段中，负荷逐步增长，新能源渗透率逐步增长到 133%。

阶段一，实施安全域监控技术，先后在中低压配电系统、高压配电系统实施安全域监控，允许安全双向潮流，利用配电网实现大范围源荷平衡。渗透率分别提升到 75%和 87%。

阶段二，开始实施分布式资源安全辅助服务。1057MW 分布式光伏和风电率先参与安全服务，提供安全调节能力 SRC(详见附录 B2)为 650MW，支撑新能源增长 602.3MW，渗透率提升到 110%。

阶段三，继续扩大分布式资源安全辅助服务，负荷和 V2G 电动汽车提供安全辅助服务。

934MW 负荷参与安全服务，提供 SRC 为 410MW，支撑新能源增长 347.4MW，渗透率提升到 120%。

430MW 的 V2G 电动汽车参与安全服务，提供 SRC 为 130MW，支撑新能源增长 114.7MW，渗透率提升到 127%。

阶段四，采用关键位置配储和柔性互联，实现大范围源荷平衡。

新增 0.4kV 储能 36MW，提供 SRC 为 22MW，支撑新能源增长 20.7MW，渗透率提升到 128.8%；新增 10kV 储能 90MW，提供 SRC 为 60MW，支撑新能源增长 53.8MW，渗透率提升到 130%。

新增 0.4kV SOP 20 台，提供 SRC 为 20MW，支撑新能源增长 20.6MW，渗透率提升到 131.5%；新增 10kV SOP 10 台，提供 SRC 为 50MW，支撑

新能源增长 39.3MW，渗透率提升到 134%。

## 5 讨论

反向潮流的挑战除现有配电安全域涉及容量越限<sup>[29]</sup>、电压越限<sup>[30-31]</sup>外，还包括频率波动<sup>[30]</sup>、保护误动<sup>[32-33]</sup>及谐波越限<sup>[34]</sup>等问题。具体分析如下：

维持频率稳定由主网调度在地区电网范围进行总量平衡。本文倡导的反送不是由配电网向输电网，而是保持从输电网接受电量计划基本不变前提下，在各级配电网间让双向潮流充分流动进行源荷平衡。因此这种反送从原理上并不影响主网层面维持频率稳定。

关于双向潮流下的保护升级，主要采用增设故障方向判别元件技术<sup>[35]</sup>，已经过我国大量反向潮流常态化出现地区长期运行得到验证。本文倡导的反送从原理上不会带来新的问题。

目前尚无文献表明双向潮流本身会加剧谐波，谐波产生的根源始终是可再生电源的电力电子装置，而非电能的流向。故有源滤波器<sup>[36]</sup>、静止无功发生器<sup>[37]</sup>等现有谐波治理技术，在本文倡导的安全反送下仍是有效的。

## 6 结论

本文面向未来高渗透率新能源接入配电系统的场景，结合我国配电系统实际情况，提出了一种常态化双向潮流的新型配电系统形态。通过与源荷就地平衡规划方案对比，得出结论如下：

1) 相同新能源渗透率下，常态化双向潮流形态中不同电压等级配电系统之间的正、反向潮流均

大于就地平衡方案,新形态大幅提高了各级配电网以及220kV电网的双向综合资产利用率。

2) 相同新能源渗透率下,常态化双向潮流形态显著降低了配储比例,在保证系统安全的前提下,实现了可再生能源的灵活接入。

3) 常态化双向潮流形态可减少传统发电机出力,更有利于减少碳排放。实质是各中压配电系统源荷匹配有差异,通过高压电压等级,可进一步实现不同中压系统之间源荷匹配,即更大地理范围的源荷平衡。

本文提出的常态化双向潮流新形态支持新能源侧不强制配储、网侧有限配储,并有助于提高红区上限的潜力;相比其他配电系统新形态,对现状配电系统改变较小,是符合我国国情的一个很好的新型配电系统发展方向。

后续需要结合常态化双向潮流形态开展更深入研究,包括新型配电系统形态命名规范、反送对电压稳定影响、柔性互联规划原则、构网跟网型设备配置等内容,并在实际配电系统开展相关规划与示范验证工作。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

## 参考文献

- [1] 国家能源局. 国家能源局综合司关于印发开展分布式光伏接入电网承载力及提升措施评估试点工作的通知[EB/OL]. (2023-06-13). [http://zfxgk.nea.gov.cn/2023-06/01/c\\_1310726992.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/2023-06/01/c_1310726992.htm).
- [2] 苏南. 配电系统的重大变革需全社会共同努力[N]. 中国能源报, 2024-09-02(013).
- [3] 陈维江, 靳晓凌, 吴鸣, 等. 双碳目标下我国配电网形态快速演进思考[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6811-6817. CHEN Weijiang, JIN Xiaoling, WU Ming, et al. Thinking on the rapid evolution of distribution network form under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6811-6817(in Chinese).
- [4] 王成山, 李鹏, 于浩. 智能配电网的新形态及其灵活性特征分析与应用[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10): 13-21. WANG Chengshan, LI Peng, YU Hao. Development and characteristic analysis of flexibility in smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 13-21(in Chinese).
- [5] 冀肖彤, 杨东俊, 方仍存, 等. “双碳”目标下未来配电网构建思考与展望[J]. 电力建设, 2024, 45(2): 37-48. JI Xiaotong, YANG Dongjun, FANG Rengcun, et al. Research and prospect of future distribution network construction under dual carbon target[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(2): 37-48(in Chinese).
- [6] 江道灼, 徐宁, 江崇熙, 等. 蜂巢状有源配电网构想、关键技术与展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 1-11. JIANG Daozhuo, XU Ning, JIANG Chongxi, et al. Conception, key technology and prospect of honeycomb-shape active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 1-11(in Chinese).
- [7] 谢光龙, 王旭斌, 朱琳, 等. 蜂巢配电网的构建过程及优势分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(2): 11-18. XIE Guanglong, WANG Xubin, ZHU Lin, et al. Construction process and advantages of honeycomb distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2024, 36(2): 11-18(in Chinese).
- [8] 刘洪, 李其哲, 徐晶, 等. 网孔型中压配电网组网形态、核心特征与研究展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(16): 181-191. LIU Hong, LI Qizhe, XU Jing, et al. Networking morphology, key feature and research prospect of mesh-type medium-voltage distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(16): 181-191(in Chinese).
- [9] 王皓靖, 郭佩乾, 时珊珊, 等. 中压配电网多台区柔性互联技术应用现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(5): 13-23. WANG Haojing, GUO Peiqian, SHI Shanshan, et al. Application status and prospects of flexible interconnection technology for multi-station areas in medium-voltage distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(5): 13-23(in Chinese).
- [10] 张璐, 陈雪寒, 唐巍, 等. 低压配电网台区移动柔性互联: 可行性分析、应用场景及展望[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(5): 1-12. ZHANG Lu, CHEN Xuehan, TANG Wei, et al. Mobile flexible interconnection in low-voltage distribution station areas: feasibility analysis, application scenarios and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(5): 1-12(in Chinese).
- [11] 宋慧慧, 于国星, 曲延滨, 等. Web of Cell 体系——适应未来智能电网发展的新理念[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15): 1-9. SONG Huihui, YU Guoxing, QU Yanbin, et al. Web of cell architecture — a new perspective for future smart grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 1-9(in Chinese).
- [12] 常康, 郁琛, 谢云云, 等. 考虑多配电网功率互济的交直流混联配电网灾后抢修策略[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(3): 194-200. CHANG Kang, YU Chen, XIE Yunyun, et al. Post-disaster repair strategy of AC/DC hybrid distribution network considering interconnection power supply among multiple distribution networks[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(3): 194-200(in Chinese).
- [13] XIAO J, GU W, WANG C, et al. Distribution system security region: definition, model and security assessment[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(10): 1029-1035.
- [14] XIAO Jun, ZU Guoqiang, ZHOU Huan, et al. Total quadrant security region for active distribution network with high penetration of distributed generation[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(1): 128-137.
- [15] XIAO Jun, HE Qibo, ZU Guoqiang. Distribution management system framework based on security region for future low carbon distribution systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(4): 544-555.
- [16] 国家能源局. 分布式电源接入电力系统承载力评估导则: DL/T 2041—2025[S]. 北京: 中国电力出版社, 2025.
- [17] 余贻鑫. 新形势下的智能配电网[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(7): 1-3. YU Yixin. Intelligent distribution network in the new situation[J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(7): 1-3(in Chinese).
- [18] 王成山, 王丹, 周越. 智能配电系统架构分析及技术挑战[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 2-9. WANG Chengshan, WANG Dan, ZHOU Yue. Framework analysis and technical challenges to smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 2-9(in Chinese).
- [19] XIAO Jun, LI Chengjin, HE Guowei, et al. Flexible resource security regulating capability for distribution systems: concept, method, and

- applications[J]. *Applied Energy*, 2025, 382: 125253.
- [20] LI Peng, JI Haoran, WANG Chengshan, et al. Optimal operation of soft open points in active distribution networks under three-phase unbalanced conditions[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(1): 380-391.
- [21] 张国驹, 裴玮, 杨鹏, 等. 中压配电网柔性互联设备的电路拓扑与控制技术综述[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(6): 18-29.  
ZHANG Guoju, PEI Wei, YANG Peng, et al. Review on circuit topology and control technology of flexible interconnection devices for medium-voltage distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(6): 18-29(in Chinese).
- [22] SUBCOMMITTEE PM. IEEE reliability test system[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1979, PAS-98(6): 2047-2054.
- [23] MOKRYANI G, HU Y F, PAPADOPOULOS P, et al. Deterministic approach for active distribution networks planning with high penetration of wind and solar power[J]. *Renewable Energy*, 2017, 113: 942-951.
- [24] 吴鸣, 徐斌, 季宇, 等. 输配协同分布式电源最大接入容量计算方法[J]. *电网技术*, 2019, 43(11): 3883-3889.  
WU Ming, XU Bin, JI Yu, et al. Transmission-distribution-network-coordinated calculation method of maximum integration capacity of distributed generations[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(11): 3883-3889(in Chinese).
- [25] HU Zhuangli, ZHANG Yongjun, LI Canbing, et al. Utilization efficiency of electrical equipment within life cycle assessment: Indexes, analysis and a case[J]. *Energy*, 2015, 88: 885-896.
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电能质量 供电电压偏差: GB/T 12325—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [27] 张谦, 廖清芬, 唐飞, 等. 计及分布式电源接入的配电网静态电压稳定性评估方法[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(15): 42-48.  
ZHANG Qian, LIAO Qingfen, TANG Fei, et al. Steady state voltage stability assessment method of distribution network considering inter-connection of distributed generators[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(15): 42-48(in Chinese).
- [28] 贾科, 李英, 孔嘉靖, 等. 风光电源故障暂态解析及实用化短路电流峰值计算[J]. *电网技术*, 2024, 48(2): 830-838.  
JIA Ke, LI Ying, KONG Jiaping, et al. Fault dynamic behaviors analysis and practical peak short-circuit current calculation of wind and solar power sources[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(2): 830-838(in Chinese).
- [29] 董逸超, 王守相, 闫秉科. 配电网分布式电源接纳能力评估方法与提升技术研究综述[J]. *电网技术*, 2019, 43(7): 2258-2266.  
DONG Yichao, WANG Shouxiang, YAN Bingke. Review on evaluation methods and improvement techniques of DG hosting capacity in distribution network[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(7): 2258-2266(in Chinese).
- [30] 谢岩, 唐晓骏, 董昱, 等. 高比例新能源特高压直流送端电网的源-网频率协同控制及参数优化方法[J]. *电网技术*, 2025, 49(1): 263-271.  
XIE Yan, TANG Xiaojun, DONG Yu, et al. Source-network frequency cooperative control and parameter optimization method for high proportion renewable energy UHVDC feeder grid[J]. *Power System Technology*, 2025, 49(1): 263-271(in Chinese).
- [31] 黄冬梅, 杨凯, 余京朋, 等. 考虑净负荷均衡的分布式光伏集群电压调控策略研究[J]. *电网技术*, 2024, 48(10): 4275-4285.  
HUANG Dongmei, YANG Kai, YU Jingpeng, et al. Research on voltage regulation strategy of distributed photovoltaic cluster considering the payload balancing[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(10): 4275-4285(in Chinese).
- [32] 和敬涵, 王语然, 李猛, 等. 基于电流波形畸变特征的高比例光伏配电网故障方向判别原理[J]. *电网技术*, 2023, 47(12): 4856-4865.  
HE Jinghan, WANG Yuran, LI Meng, et al. New fault direction identification based on current distortion characteristics in high proportion PV distribution system[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(12): 4856-4865(in Chinese).
- [33] SAHU S K, KUMARI S, GHOSH D, et al. Estimation of photovoltaic hosting capacity due to the presence of diverse harmonics in an active distribution network[J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 47868-47879.
- [34] 葛津铭, 尹贻波, 李赫, 等. 基于直流侧电压等效补偿的光伏并网系统间谐波电流抑制策略[J]. *电网技术*, 2024, 48(12): 4886-4895.  
GE Jinming, YIN Yibo, LI He, et al. An interharmonic suppression control strategy in PV system based on DC-link voltage equivalent compensation[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(12): 4886-4895(in Chinese).
- [35] 朱逸凡, 赵宏程, 陈争光, 等. 适用于逆变型电源接入的配电网故障方向判别元件[J]. *中国电力*, 2019, 52(5): 76-82.  
ZHU Yifan, ZHAO Hongcheng, CHEN Zhengguang, et al. Fault direction discriminating element used for the distribution network with IIG integration[J]. *Electric Power*, 2019, 52(5): 76-82(in Chinese).
- [36] 石磊磊, 贾清泉, 林丽娟, 等. 电力电子化配电网谐波分布式全局优化治理策略[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(9): 2914-2923.  
SHI Leilei, JIA Qingquan, LIN Lijuan, et al. Distributed global optimal harmonic mitigation strategy for power electronics high penetrated distribution networks[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(9): 2914-2923(in Chinese).
- [37] 贾冠龙, 刘政权, 张哲, 等. 多源自适应换相换流器运行控制策略研究[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(12): 4843-4857.  
JIA Guanlong, LIU Zhengquan, ZHANG Zhe, et al. Research on operation control strategy of self-adaption statcom and line commutation converter[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(12): 4843-4857(in Chinese).



肖峻

在线出版日期: 2025-12-04.

收稿日期: 2025-09-04.

作者简介:

肖峻(1971), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能配电系统规划与运行, E-mail: xiaojun@tju.edu.cn;

贺国伟(1987), 男, 博士研究生, 研究方向为配电系统安全分析与规划, E-mail: hegw@tju.edu.cn;

王丹(1981), 男, 通信作者, 副教授, 博士, 研究方向为综合能源系统、智能配用电系统、分布式能源与微网, E-mail: wangdantjuee@tju.edu.cn;

李承晋(1999), 男, 博士研究生, 研究方向为智能配电系统规划与运行, E-mail: lichengjin@tju.edu.cn;

王成山(1962), 男, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 研究方向为城市电网规划、分布式发电系统与微网, E-mail: cswang@tju.edu.cn.

(责任编辑 徐梅 赵梓含)

附录 A 现有主要未来配电系统形态的网络结构

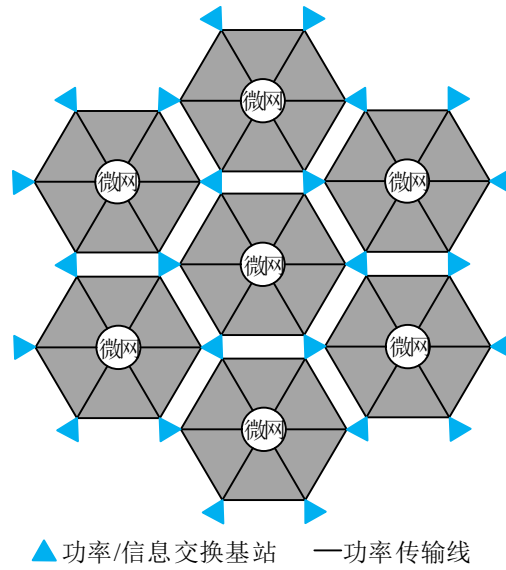


图 A1 蜂巢配电网结构

Fig. A1 Structure of honeycomb distribution network

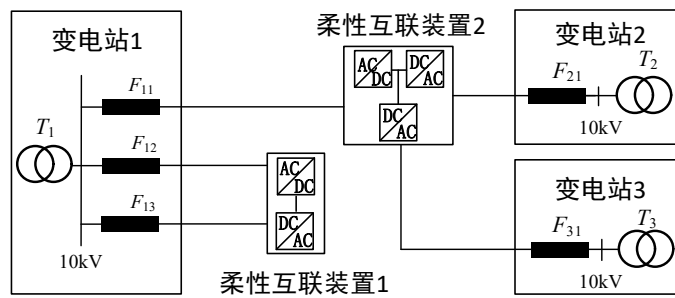


图 A2 中压柔性互联配电系统结构

Fig. A2 Structure of flexible interconnected medium voltage distribution network

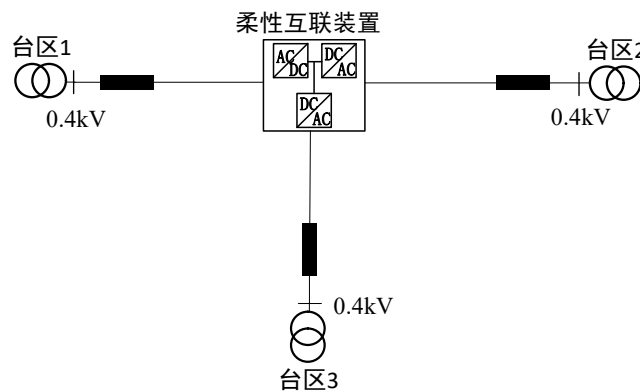


图 A3 低压柔性互联配电系统结构

Fig. A3 Structure of flexible interconnected low voltage distribution network

附录 B 支撑新形态的关键技术

实现常态化双向潮流形态，关键技术是通过基于安全域的在线安全监控，保证在安全前提下达到较高的正向和反向负载率，实现新能源接纳能力和配电网资产利用率的双提升。此外，鉴于未来存在海量分布式资源，分布式资源互动参与配电系统安全辅助服务，将进一步提高系统的安全与效率。

B1 基于安全域的在线安全监控

配电系统安全域( $\Omega_{DSSR}$ )定义为状态空间中满足  $N-0$  和  $N-1$  安全约束的所有工作点的集合<sup>[14]</sup>，运行点  $W$  是某时刻配电系统所有节点负荷<sup>[13]</sup>以及可再生能源的一组功率向量。基于馈线视角安全域模型<sup>[13]</sup>如式(B1)所示。

$$\begin{aligned}
\Omega_{\text{DSSR}} &= \{W = [S_{F_1}, \dots, S_{F_j}, \dots, S_{F_m}]\} \\
\text{s.t.A:} &\begin{cases} |S_{F_j}| = |\sum_{i \in \Lambda_{F_j}} S_i| \leq c_{F_j}, \forall j \in F \\ |S_{T_j}| = |\sum_{i \in \Lambda_{T_j}} S_i| \leq c_{T_j}, \forall j \in T \end{cases} \\
\text{s.t.B:} &\begin{cases} \forall \psi_z \in \Psi \\ |S_{F_j}(z)| = |\sum_{i \in \Lambda_{F_j}(z)} S_i| \leq c_{F_j}, \forall j \in F \setminus \{z\} \\ |S_{T_j}(z)| = |\sum_{i \in \Lambda_{T_j}(z)} S_i| \leq c_{T_j}, \forall j \in T \setminus \{z\} \end{cases} \\
\text{s.t.C:} &U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad i=1,2,\dots,n
\end{aligned} \tag{B1}$$

式中： $S_{F_j}$ 为馈线段 $F_j$ 的负荷； $m$ 为馈线的数量； $S_i$ 为节点 $i$ 的净功率； $\Lambda_{F_j}$ 为馈线 $j$ 下游所有节点的集合； $c_{F_j}$ 为馈线段 $j$ 的容量； $F$ 为所有馈线构成的集合。 $S_{T_j}$ 为主变 $j$ 的功率； $\Lambda_{T_j}$ 为主变 $j$ 下游所有节点的集合； $c_{T_j}$ 为主变 $j$ 的容量， $T$ 为所有主变构成的集合。 $U_i$ 为节点 $i$ 的电压幅值， $U_i^{\max}$ 和 $U_i^{\min}$ 分别为节点 $i$ 电压幅值的上下限。

约束A和B分别是 $N-0$ 和 $N-1$ 安全约束，C为电压约束。通过求解以上模型可以得到 $N-0$ 和 $N-1$ 安全边界<sup>[14]</sup>。第 $p$ 个安全边界 $B_p$ 见式(B2)<sup>[14]</sup>：

$$B_p: c_p - \sum_{j=1}^m a_{p,j} S_{F_j} = 0, \quad p=1,2,\dots,l \tag{B2}$$

多数配电系统的安全域的安全边界是近似线性的，可由一系列超平面组成<sup>[13]</sup>。超平面安全边界计算更简单，但其精度取决于实际系统的非线性程度，当近似线性时精度有保障，当系统非线性程度较高时，应采用仿真法或解析法与仿真修正结合的混合法求解安全域模型。

得到安全边界后，可以快速判断安全性。当运行点在安全边界内时，该运行点是安全的，反之不安全。配电系统安全边界可以离线预先计算得出，为保障在线安全分析的快速性提供了重要条件。基于安全域的在线安全监控是指利用安全域对实时运行点的安全性及安全裕度进行监视，及时发现安全问题和隐患，并采取预防控制消除隐患<sup>[15]</sup>。安全裕度由安全距离表示，即从运行点到系统安全边界的距离。安全距离 $SD_j$ 的计算见式(B3)<sup>[14]</sup>：

$$SD_j = \min\left(\frac{c_1 - \sum_{x=1}^m a_{1,x} S_{F_x}}{a_{1,j}}, \dots, \frac{c_p - \sum_{x=1}^m a_{p,x} S_{F_x}}{a_{p,j}}, \dots, \frac{c_l - \sum_{x=1}^m a_{l,x} S_{F_x}}{a_{l,j}}\right) \quad j=1,2,\dots,m \tag{B3}$$

式中， $c_p$ 是与 $c_{F_j}$ 和 $c_{T_j}$ 相关的常量； $a_{p,j}$ 是耦合系数； $l$ 是安全边界的数量。

当运行点不安全时，安全距离为负值，且绝对值越大，此运行点不安全程度越高；当运行点安全时，安全距离为正值，且绝对值越大，此运行点安全程度越高<sup>[13]</sup>。

安全域的降维可视化观测示例见图B1，多面体O-ABCD为DSSR，OCD和OCB为安全边界，运行点W1在任一方向增长负荷后，均会到达DSSR外，导致系统不安全；运行点W2在S1方向可增长负荷，而在S2和S3方向无法增长负荷，D为W2在S1方向可增长的负荷量。

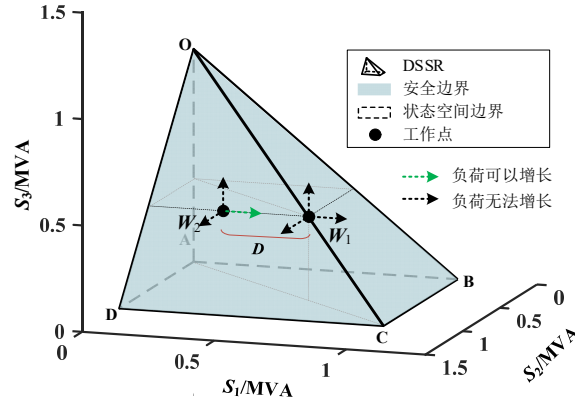


图 B1 三维可视化 DSSR 示意图

Fig. B1 Schematic diagram of 3D observation view of DSSR

通过在线安全监控技术，可以保证在安全前提下，系统达到更高的负载率。举例说明，图 B1 中，运行点  $W_2$  存在裕度为  $D$  的负荷增长空间，此范围内朝着  $S_1$  方向增加负荷，可提高系统负载率。

### B2 分布式资源参与系统安全辅助服务

新型配电系统将接入海量分布式资源，如新能源、电动汽车、储能、可调负荷等，它们具有巨大的参与配电系统调节的潜力。将其纳入配电安全监视与防控体系，是保障常态化双向潮流配电系统形态安全高效运行的重要手段。从规划角度看，分布式资源宜以分布式电源、可调负荷、电动汽车充电负荷为主，储能为辅。

文献[19]定义了分布式资源参与配电系统安全服务的安全调节能力(security regulating capability, SRC)。SRC 定义为：在特定区域内和特点时刻，满足配电系统安全需求方向和安全需求时间条件下的分布式资源最大功率调节量<sup>[19]</sup>。节点  $N_i$  在时刻  $t$  的安全调节能力记为  $SRC_i(t)$ ，见式(B4)：

$$\begin{cases} SRC_i(t) = \sum_{k \in N_i} \Delta S_k^D(t) & D_k \in \{OUT-, IN+\} \\ SRC_i(t) = \sum_{k \in N_i} \Delta S_k^D(t) & D_k \in \{OUT+, IN-\} \end{cases} \quad (B4)$$

式中， $k \in N_i$  表示参与系统安全调控的分布式资源  $k$  连接到节点  $N_i$ ； $\Delta S_k^D(t)$  是分布式资源在时刻  $t$  的最大可调节功率； $D_k$  是分布式资源  $k$  的可调节方向，其中，OUT-为减少输出，IN-为减少输入，OUT+为增加输出，IN+为增加输入。

图 B2 通过一个中压配电系统简单算例，说明分布式资源参与系统安全辅助服务以提高系统安全性。馈线  $F_1$  和  $F_2$  单联络接线运行。在 13:00 支路  $F_{2,2}$  发生  $N-1$  故障，发生故障后，馈线  $F_2$  的负荷通过联络开关转移至  $F_1$ ；该时刻负荷、分布式光伏和风电、V2G 以及储能的功率、参与辅助服务能力以及相应安全调节能力见图 B2(a)<sup>[19]</sup>；其中，参与辅助服务能力表示为参与需求响应功率占当前功率的比例，安全调节能力仅计算满足系统安全调控需求的部分。

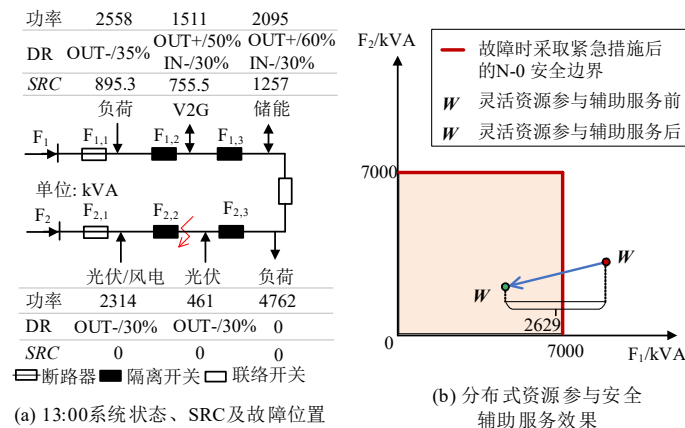


图 B2 分布式资源提高系统安全性示例

Fig. B2 Example of distributed resources enhancing system security

由图 B2 看出：

1)  $N-1$  负荷转移至馈线  $F_1$  后，运行点位于  $W'$ ，位于安全边界外，超出了  $F_1$  容量；共 2629kVA 分布式资源参与安全辅助服务，使运行点返回至安全位置  $W''$ 。

2)  $F_1$  和  $F_2$  负荷之和为 10924kVA，比传统配电系统  $N-1$  要求的最大负荷 7000kVA 多 3924kVA，即常态化双向潮流形态在正常运行时可提高配电系统设备的利用率。

反送场景下，可能出现电压越上限。通过安全域技术进行监控，能够实现提前预警和预防性控制。当需要采取控制时，当电网侧措施不足以解决时，再通过分布式资源安全辅助服务来消除越限或隐患。

### 附录 C 算例原始参数

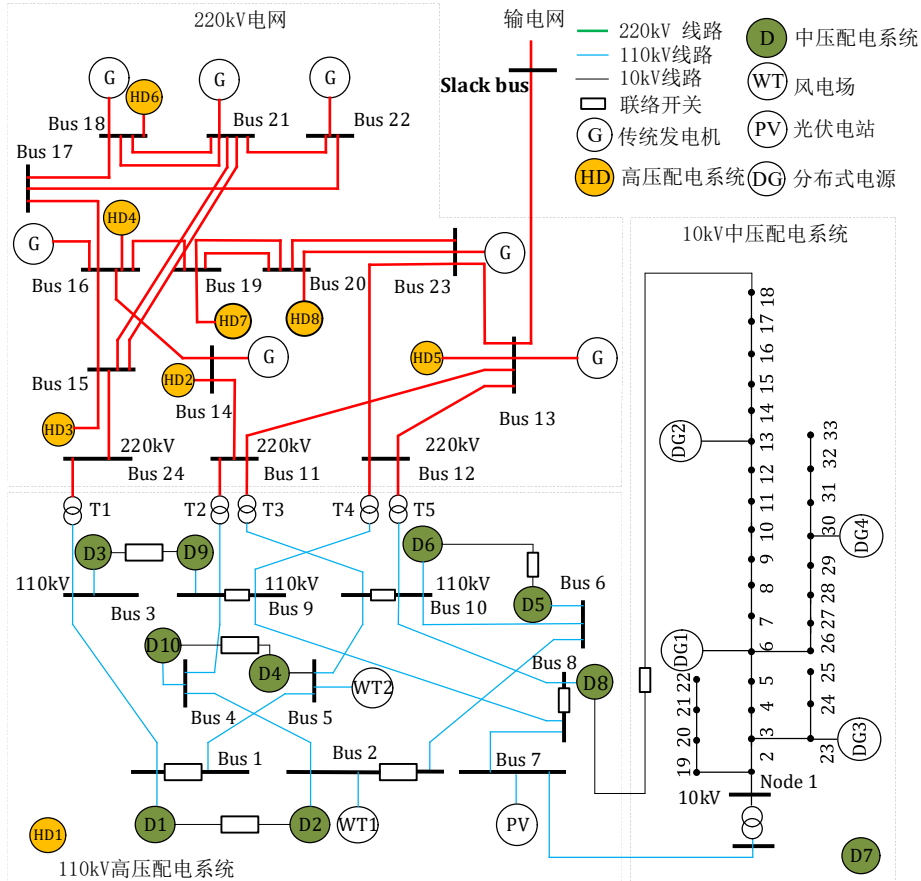


图 C1 T24D10 算例

Fig. C1 T24D10 case

表 C1 发电机参数

Table C1 Generators Parameters

母线	$P_{min}/MW$	$P_{max}/MW$	$Q_{min}/MW$	$Q_{max}/MW$
13	200	591	0	240
14	50	215	-50	110
16	40	155	-50	80
18	80	400	-50	200
21	80	400	-50	200
22	60	300	-60	96
23	200	660	-125	310
Total	820	3045		1636

表 C2 支路参数

Table C2 Branches Parameters

起点母线	终点母线	R/ $\Omega$	X/ $\Omega$	b/ $\Omega$	起点母线	终点母线	R/ $\Omega$	X/ $\Omega$	b/ $\Omega$
1	2	0.0026	0.0139	0.4611	12	13	0.0061	0.0476	0.0999
1	3	0.0546	0.2112	0.0572	12	23	0.0124	0.0966	0.203
1	5	0.0218	0.0845	0.0229	13	23	0.0111	0.0865	0.1818
2	4	0.0328	0.1267	0.0343	14	16	0.005	0.0389	0.0818

2	6	0.0497	0.192	0.052	15	16	0.0022	0.0173	0.0364
3	9	0.0308	0.119	0.0322	15	21	0.0063	0.049	0.103
3	24	0.0023	0.0839	0	15	21	0.0063	0.049	0.103
4	9	0.0268	0.1037	0.0281	15	24	0.0067	0.0519	0.1091
5	10	0.0228	0.0883	0.0239	16	17	0.0033	0.0259	0.0545
6	10	0.0139	0.0605	2.459	16	19	0.003	0.0231	0.0485
7	8	0.0159	0.0614	0.0166	17	18	0.0018	0.0144	0.0303
8	9	0.0427	0.1651	0.0447	17	22	0.0135	0.1053	0.2212
8	10	0.0427	0.1651	0.0447	18	21	0.0033	0.0259	0.0545
9	11	0.0023	0.0839	0	18	21	0.0033	0.0259	0.0545
9	12	0.0023	0.0839	0	19	20	0.0051	0.0396	0.0833
10	11	0.0023	0.0839	0	19	20	0.0051	0.0396	0.0833
10	12	0.0023	0.0839	0	20	23	0.0028	0.0216	0.0455
11	13	0.0061	0.0476	0.0999	20	23	0.0028	0.0216	0.0455
11	14	0.0054	0.0418	0.0879	21	22	0.0087	0.0678	0.1424

表 C3 高压配电系统 HD1-HD8 中负荷及新能源电站参数

Table C3 Parameters of load and renewable energy power plants in high voltage distribution networks HD1-H8

高压配电系统	母线	总负荷/MW	风电场数量	风电场装机容量/MW	光伏电站数量	光伏电站装机容量/MW	新能源电站装机容量/MW
HD1	11,12,24	133.2	2	50	1	40	140
HD2	13	261	4	50	3	50	350
HD3	14	357	4	40	7	40	440
HD4	15	108	3	40	1	40	160
HD5	16	330	3	100	3	40	420
HD6	18	64.5	3	60	0	0	180
HD7	19	315	5	50	5	30	400
HD8	20	69	2	30	2	20	100
Total		1637.7	26	420	22	260	2190

表 C4 中压配电系统 D1-D10 中负荷及分布式可再生能源参数

Table C4 Parameters of load and DG in medium voltage distribution networks D1-D10

中压配电系统	位置	母线	总负荷/MW	DG 数量	总装机容量/MW	DG 功率渗透率/%	DG 容量渗透率/%
D1	城市中心	1	19.5	4	14.0	72	60
D2	城市中心	2	18	4	14.4	80	68
D3	郊区	3	9.7	6	27.4	282	262
D4	城市中心	5	17.5	4	8.8	50	39
D5	郊区	6	7.4	5	11.2	152	131
D6	工业园区	10	17.1	4	16.8	98	121
D7	郊区	7	7.1	5	16.5	233	215
D8	工业园区	8	10.8	4	10.8	100	95
D9	工业园区	9	13.6	4	12.2	90	80
D10	工业园区	4	12.5	4	10.6	85	68
合计			133.2	44	142.7		

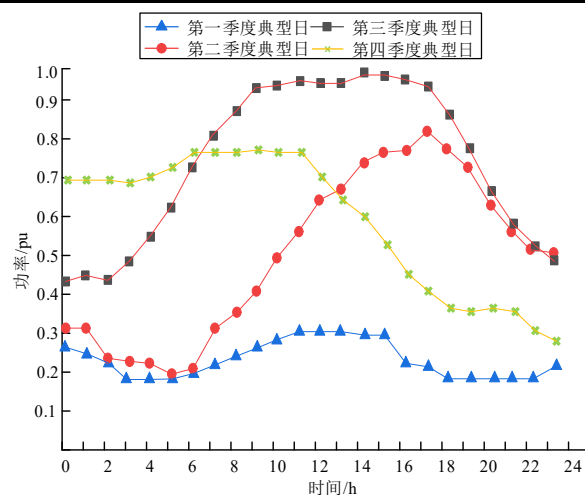


图 C2 不同季节风电场典型日出力

Fig. C2 Typical daily output of wind farm in different seasons

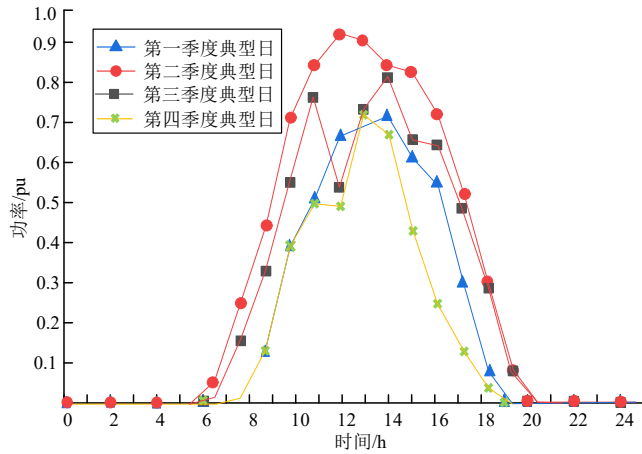


图 C3 不同季节光伏电站典型日出力

Fig. C3 Typical daily output of PV station in different seasons

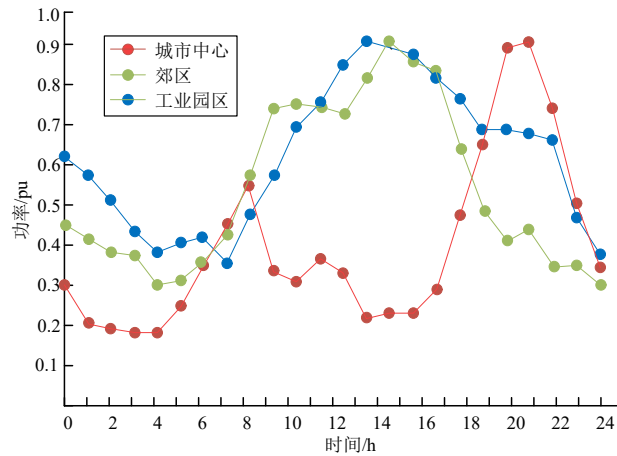


图 C4 不同配电系统典型日负荷

Fig. C4 Typical daily load of different distribution networks

附录 D 离散区间划分

表 D1 离散区间划分

Table D1 Data discretization

负荷			可再生能源		
序号	分组/%	范围/%	序号	分组/%	范围/%
1	0	[0, 5]	1	0	[0, 20]
2	5	[5, 10]	2	30	[20, 40]
3	15	[10, 20]	3	50	[40, 60]
4	30	[20, 40]	4	65	[60, 70]
5	50	[40, 60]	5	75	[70, 80]
6	70	[60, 80]	6	90	[80, 90]
7	100	[80, 100]	7	100	[90, 100]

表 D2 101 个场景下负荷、可再生能源出力及持续时间

Table D2 Load, renewable generations output and duration in 101 scenarios

场景	负荷/%	光伏/%	风电/%	时间/h	场景	负荷/%	光伏/%	风电/%	时间/h	场景	负荷/%	光伏/%	风电/%	时间/h
1	5	50	30	1	35	50	65	100	21	69	70	75	90	5
2	5	65	50	1	36	50	75	30	10	70	70	75	100	23
3	15	0	30	1	37	50	75	50	1	71	70	90	30	25
4	15	30	30	6	38	50	75	75	2	72	70	90	50	1
5	15	50	30	4	39	50	75	100	2	73	70	90	65	3
6	15	50	50	1	40	50	90	30	3	74	70	90	90	2
7	3	0	30	9	41	70	0	30	1124	75	70	90	100	1
8	30	0	50	3	42	70	0	50	584	76	70	1	30	2
9	30	0	65	1	43	70	0	65	300	77	100	0	30	45
10	30	50	30	3	44	70	0	75	96	78	100	0	50	18

11	30	65	50	1	45	70	0	90	77	79	100	0	65	2
12	50	0	30	922	46	70	0	100	313	80	100	0	75	1
13	50	0	50	431	47	70	30	30	539	81	100	0	100	4
14	50	0	65	209	48	70	30	50	207	82	100	30	30	160
15	50	0	75	81	49	70	30	65	88	83	100	30	50	33
16	50	0	90	99	50	70	30	75	42	84	100	30	65	27
17	50	0	100	373	51	70	30	90	33	85	100	30	75	5
18	50	30	30	282	52	70	30	100	91	86	100	30	90	6
19	50	30	50	93	53	70	50	30	519	87	100	30	100	3
20	50	30	65	39	54	70	50	50	125	88	100	50	30	159
21	50	30	75	12	55	70	50	65	59	89	100	50	50	29
22	50	30	90	14	56	70	50	75	27	90	100	50	65	15
23	50	30	100	59	57	70	50	90	29	91	100	50	75	8
24	50	50	30	177	58	70	50	100	53	92	100	50	90	6
25	50	50	50	39	59	70	65	30	308	93	100	50	100	7
26	50	50	65	10	60	70	65	50	83	94	100	65	30	94
27	50	50	75	8	61	70	65	65	49	95	100	65	50	16
28	50	50	90	6	62	70	65	75	19	96	100	65	65	5
29	50	50	100	22	63	70	65	90	19	97	100	65	90	1
30	50	65	30	57	64	70	65	100	37	98	100	65	100	9
31	50	65	50	14	65	70	75	30	105	99	100	75	30	28
32	50	65	65	9	66	70	75	50	28	100	100	75	100	2
33	50	65	0.75	3	67	70	75	65	20	101	100	90	30	1
34	50	65	0.90	2	68	70	75	75	9					

表 D3 典型场景下高压配电系统 HD1-HD8 的负荷

Table D3 Load of high voltage distribution networks HD1-HD8 in typical scenarios

高压配电系统	场景 2 负荷/MW	场景 39 负荷/MW	场景 77 负荷/MW
HD1	22.8	45.6	133.2
HD2	87	174	261
HD3	119	150	357
HD4	36	72	108
HD5	110	220	330
HD6	21.5	50	64.5
HD7	105	210	315
HD8	23	46	69
合计	524.3	967.6	1637.7

表 D4 HD1 中可再生能源电站装机容量以及典型场景出力

Table D4 Installed capacity and power of renewable energy stations in typical scenarios in HD1

新能源电站	母线	容量/MW	场景 2 功率/MW	场景 39 功率/MW	场景 77 功率/MW
风电场 1	2	50	32.5	35.3	17.1
风电场 2	5	50	32	35.3	17.1
光伏电站	7	40	20	27.4	0
合计		140	85.5	98	34.2

表 D5 典型场景下中压配电系统 D1-D10 中负荷及 DG 出力

Table D5 Load and power of DG in medium voltage distribution networks D1-D10 in typical scenarios

中压配电系统	场景 2		场景 39		场景 77	
	负荷/MW	DG/MW	负荷/MW	DG/MW	负荷/MW	DG/MW
D1	2.6	5.9	7.8	9.1	19.5	0
D2	0.3	0.6	0.7	0.9	1.8	0
D3	2.9	8.5	9.6	14.1	9.7	0
D4	3.1	3.7	6.4	5.7	17.5	0
D5	1.1	4.7	3.9	7.3	7	0
D6	0	5	10.3	10.9	17.1	0
D7	1.3	4.5	4.5	7.6	7.1	0
D8	0	6	6.5	7	10.8	0
D9	0	3.1	8.2	8	13.6	0
D10	0	3.5	7.5	6.9	12.5	0
合计	11.3	45.5	45.5	77.5	117	0

## 附录 E 储能配置

场景 2 高压配电系统 HD1-HD8 中可再生能源功率、负荷功率以及储能的功率和容量见表 E1。表中， $P_{RE}$  为配电系统中可再生能源在场景 2 的出力之和； $S_E$  为储能系统容量； $P_E^{ra}$  为储能系统额定功率。

表 E1 高压配电系统 HD1-HD8 储能电站配置  
Table E1 Energy storage station in high voltage stribution networks HD1-HD8

高压配电系统	$P_{RE}/MW$	$P_L/MW$	$(P_{RE}-P_L)/MW$	$S_E/MWh$	$P_E^{ra}/MW$
HD1	85.5	4.3	81.2	170	85
HD2	55.3	87	-31.7	0	0
HD3	117.9	119	-1	0	0
HD4	112	36	86	180	90
HD5	99	110	-11	0	0
HD6	143	21.5	-121.5	250	125
HD7	97	105	-8	0	0
HD8	92	23	69	140	70
合计	801.7	505.8	63	740	370

以表 E1 第 1 行举例说明如何配置储能：HD1 新能源出力减去负荷为 81.2 MW，反向潮流大于 0；为满足“红区”要求的“完全就地消纳，电网无反送潮流”，储能电站功率为 85 MW。

场景 2 中压配电系统 D1-D10 中可再生能源功率、负荷功率以及储能的功率和容量见表 E2。

表 E2 中压配电系统 D1-D10 储能配置  
Table E2 Energy storage system in medium voltage distribution networks D1-D10

中压配电系统	$S_E/MWh$	$P_E/MW$	$P_{RE}/MW$	$P_L/MW$	$(P_{RE}-P_L)/MW$
D1	7	3.5	5.9	2.6	3.3
D2	1	0.5	0.6	0.3	0.3
D3	12	6	8.5	2.9	5.6
D4	2	1	3.7	3.1	0.6
D5	8	4	4.7	1.1	3.6
D6	11	5.5	5	0	5
D7	7	3.5	4.5	1.3	3.2
D8	14	7	6	0	6
D9	7	3.5	3.1	0	3.1
D10	8	4	3.5	0	3.5
合计	77	38.5	45.5	11.3	34.2

## 附录 F 跨电压等级配电系统潮流计算方法

本文 110kV 及以上高压配电系统采用 Matpower 进行潮流计算，10kV 中压配电系统采用 OpenDSS 计算，不同电压等级配电系统在边界处进行信息交换，交叉迭代后实现潮流计算收敛<sup>[24]</sup>，方法如下：

1) 参数准备。相互联络的配电系统根据电压等级大小，高电压等级定义为上级配电系统(如高压配电系统 HD1)，低电压等级定义为下级配电系统(如中压配电系统 D1-D10)。配电系统参数准备包括：网络拓扑结构、线路参数、负荷功率以及可再生能源功率储能功率等。

2) 初值准备。定义上、下级配电系统连接节点为边界节点。上级配电系统与多个下级配电系统连接，设定第  $i$  个边界节点的电压  $U_{B,i}=1$ ，相角  $\theta_{B,i}=0$ ，对各个下级配电系统进行潮流计算，得到第  $i$  个边界点功率  $P_{B,i}$ 。

3) 上级配电系统潮流计算。根据各边界点功率  $P_{B,i}$ ，进行上级配电系统潮流计算，更新  $U_{B,i}$  和  $\theta_{B,i}$ 。

4) 下级配电系统潮流计算。各个下级配电系统根据当前  $U_{B,i}$  和  $\theta_{B,i}$  进行潮流计算，更新  $P_{B,i}$ 。

5) 更新前后的  $U_{B,i}$ 、 $\theta_{B,i}$  和  $P_{B,i}$  满足收敛精度  $\epsilon$ ，则计算结束，否则不收敛。

不同电压等级配电系统之间潮流计算流程见图 F1。

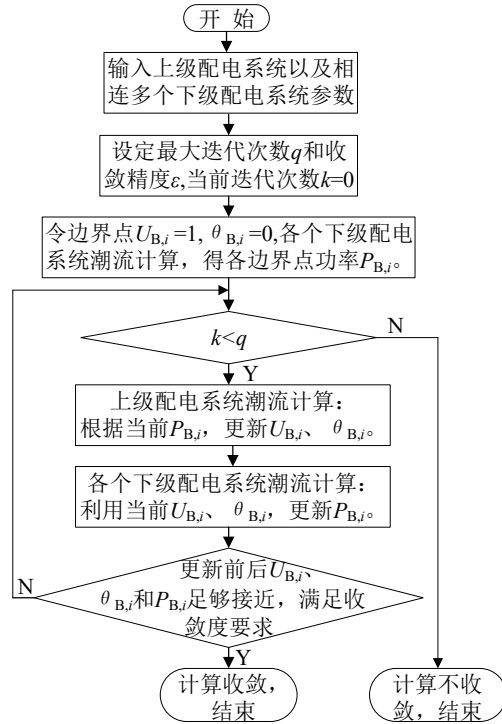


图 F1 不同电压等级配电系统之间潮流计算流程

Fig. F1 Power flow calculation process between distribution networks of different voltage levels

潮流计算收敛精度  $\varepsilon$  设定: 电压幅值和电压相角收敛精度为  $10^{-5}$ , 有功功率收敛精度为  $10^{-4}$ , 经历 9 次迭代收敛。

对全年 8760 小时数据进行了筛选, 选定了 101 个典型场景, 附录 D 表 D2 给出了 101 个场景下负荷及可再生能源出力数据。

### 附录 G 场景 2 源荷就地平衡方案潮流图

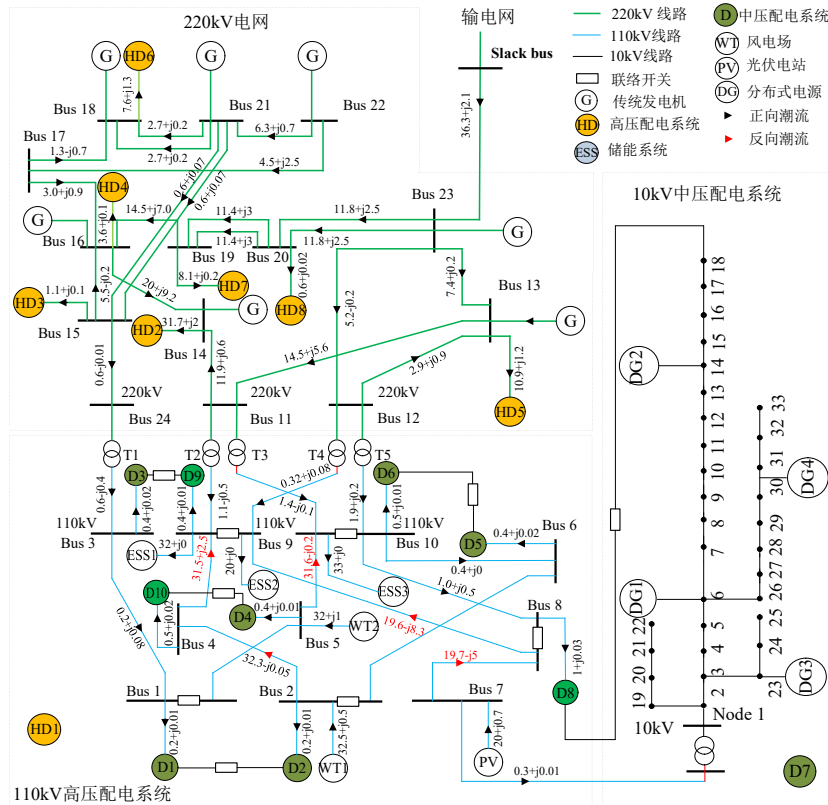


图 G1 场景 2 源荷就地平衡方案潮流

Fig. G1 Power flow of source-load local balance scheme in scenario 2

## 附录 H 典型场景潮流特征分析

### H1 中压配电系统详细潮流特征分析

#### 1) 场景 2: 春节放假, 负荷较小且 DG 大发场景

常态化双向潮流方案总反向潮流大, 达 34.2MW, 具体是: 所有 4 个工业园区配电系统 D6、D8、D9 和 D10 负荷都为 0, 均出现潮流反向; 城市边缘的乡镇配电系统 D3、D5、D7 由于负荷较小, DG 渗透率高, 也出现潮流反向; 城市中心配电系统 D1、D2 和 D4 负荷较大, 且 DG 渗透率较低, 未出现潮流反向。反向潮流均未出现主变或馈线容量越界, 也未出现电压越上限, 是安全的反向潮流。

就地平衡方案无反向潮流, 具体是: D4 正向负荷较大, 储能 D4-ESS 放电, 放电功率为 2.5MW; D1 和 D2 正向负荷较小, 储能不放电。为治理反向潮流, 其余配电系统储能均在充电状态。

#### 2) 场景 39: 正常负荷且 DG 大发场景

常态化双向潮流方案总反向潮流较大, 达到 12.1MW, 具体是: 城市中心 D4 以及工业园区 D9 和 D10, 由于 DG 渗透率较低, 未出现潮流反送, 其余中压配电系统均出现潮流反送。反向潮流均未出现主变或馈线容量越界, 也未出现电压越上限, 是安全的反向潮流。

就地平衡方案无反向潮流, 具体是: D9 和 D10 正向负荷较小, 其对应储能不放电, 除其余配电系统中储能均工作于充电状态。

#### 3) 场景 77: 重负荷场景

常态化双向潮流方案中, 无储能放电, 由 220kV 电网供电总负荷为 117.0MW; 就地平衡方案中, 中压储能都放电, 净负荷为 78.5MW。潮流满足 N-1 校验, 是安全的正向潮流。

### H2 高压配电系统详细潮流特征分析

#### 1) 场景 2: 春节放假, 负荷较小且 DG 大发场景

常态化双向潮流方案中, 5 条联络线均出现功率反送, 总的反送功率为 117.7MW。反向潮流均未出容量越界和电压越上限, 是安全的反向潮流。

就地平衡方案中, 通过位于高压配电系统的储能 HD1-ESS1、HD1-ESS2 和 HD1-ESS3 充电, 5 条联络线功率均为正向, 大小为 5.3MW。

两种方案, 潮流组成见表 H1。

表 H1 场景 2 两种方案高压配电系统 HD1 潮流组成

Table H1 Power flow composition of high voltage distribution network HD1 in two schemes in scenario 2

功率/MW	源荷就地平衡方案	常态化双向潮流方案
风电场 1	-32.5	-32.5
风电场 2	-32	-32
光伏电站	-20	-20
净负荷(D1—D10)	4.3	-34.2
HD1 储能	85	0
损耗	0.5	1.0
小计	5.3	-117.7
来自 220kV 电网	5.3	-117.7

两个规划方案中, 高压配电系统接入新能源出力相同, 区别在于: 就地平衡方案中的中压总净负荷为 4.3MW, 常态化双向潮流方案中的中压总净负荷为-34.2MW; 为使高压配电系统向 220kV 电网无反送, 就地平衡方案需高压配电系统中储能充电 85MW, 常态化双向潮流方案无储能电站。

#### 2) 场景 39: 正常负荷且 DG 大发场景

常态化双向潮流方案中, 5 条联络线均出现功率反送, 总的反送功率为 68MW。反向潮流均未出容量越界和电压越上限, 是安全的反向潮流。

就地平衡方案中, 通过位于高压配电系统的储能电站充电, 所有 5 条联络线功率均为正向, 大小合计 23.3MW。

#### 3) 场景 77: 重负荷场景

常态化双向潮流方案中, 5 条联络线均为正向潮流, 总的功率为 159.8MW, 并满足 N-1 安全。

就地平衡方案中, 通过位于高压配电系统的储能放电, 净负荷降低为 26.2MW。

附录 I 技术经济指标计算过程

I1 电压偏移

表 I1 101 个场景下电压偏移

Table I1 Statistics of voltage deviation in 101 scenarios

场景	源荷就地平衡方案		常态化双向潮流方案	
	最大电压负向偏移/%	最大电压正向偏移/%	最大电压负向偏移/%	最大电压正向偏移/%
1	0.00	3.67	2.42	4.52
2	0.00	6.14	3.53	6.50
3	0.00	3.75	2.43	4.33
4	0.00	7.07	5.71	8.67
5	0.00	3.83	2.39	4.33
6	0.00	4.25	2.52	4.81
7	0.00	2.06	1.22	2.17
8	0.00	3.32	2.38	3.61
9	0.00	4.00	2.83	4.69
10	0.00	4.22	3.50	5.78
11	0.00	5.90	4.38	8.31
12	0.00	0.93	0.76	1.30
13	0.00	1.93	1.25	2.17
14	0.00	2.30	1.77	2.82
15	0.00	2.85	2.06	3.25
16	0.00	3.56	2.14	3.90
17	0.00	3.37	2.44	4.33
18	0.00	2.04	1.64	2.60
19	0.00	3.24	1.92	3.47
20	0.00	3.67	2.54	4.12
21	0.00	3.75	3.03	4.55
22	0.00	4.24	2.98	5.20
23	0.00	4.27	2.83	5.63
24	0.00	2.99	2.10	3.47
25	0.00	3.90	2.51	4.33
26	0.00	4.16	2.70	4.98
27	0.00	3.83	3.18	5.42
28	0.00	5.31	3.98	6.07
29	0.00	5.05	3.38	6.50
30	0.00	3.21	2.38	4.12
31	0.00	4.64	2.99	4.98
32	0.00	4.05	3.31	5.63
33	0.00	4.42	3.47	6.07
34	0.00	4.43	2.79	5.04
35	0.00	4.95	2.68	5.36
36	0.00	3.68	2.45	4.55
37	0.00	4.69	3.19	5.42
38	0.00	5.09	4.22	6.50
39	0.00	4.11	2.37	4.55
40	0.00	4.29	2.80	5.20
41	0.00	0.73	-1.70	0.93
42	0.00	1.21	-1.02	1.55
43	1.58	1.58	-1.07	2.01
44	0.58	2.07	-1.49	2.32
45	-0.22	2.11	-1.83	2.79
46	-1.15	2.69	-2.00	3.10
47	-0.43	1.70	-1.00	1.86
48	-0.21	1.82	-1.55	2.48
49	-0.25	2.37	-1.69	2.94
50	-1.11	2.38	-1.86	3.25
51	-0.38	3.01	-1.99	3.71
52	-0.86	3.72	-2.62	4.02

53	-0.83	2.00	-1.63	2.48
54	-0.21	2.58	-1.79	3.10
55	-0.88	2.67	-2.33	3.56
56	-0.65	2.77	-1.96	3.87
57	-1.18	3.09	-2.63	4.33
58	-0.98	4.02	-2.73	4.64
59	-0.22	2.58	-1.81	2.94
60	-1.07	2.76	-1.98	3.56
61	-1.19	3.48	-2.41	4.02
62	-0.51	3.46	-2.24	4.33
63	-1.60	4.47	-2.69	4.80
64	-0.69	4.70	-2.72	5.11
65	-0.61	3.02	-1.95	3.25
66	-0.40	3.39	-2.01	3.87
67	-0.68	3.50	-2.34	4.33
68	-1.23	3.36	-2.95	4.64
69	-0.71	4.67	-2.92	5.11
70	-1.97	4.54	-3.55	5.42
71	-0.28	3.45	-1.95	3.71
72	-1.06	3.75	-2.30	4.33
73	-0.49	3.90	-2.87	4.80
74	-0.68	4.72	-2.81	5.57
75	-1.69	5.08	-3.82	5.88
76	-1.30	2.98	-2.20	4.02
77	-1.80	0.60	-4.80	0.65
78	-1.54	0.81	-3.97	1.08
79	-0.50	1.07	-1.93	1.41
80	-0.75	1.23	-4.31	1.63
81	-1.42	1.59	-3.16	2.17
82	-0.67	1.03	-1.55	1.30
83	-0.55	1.33	-4.05	1.73
84	-0.93	1.72	-2.96	2.06
85	-0.73	1.79	-3.36	2.28
86	-0.61	2.25	-4.66	2.60
87	-1.46	2.32	-3.87	2.82
88	-2.57	1.57	-4.77	1.73
89	-1.51	1.96	-4.10	2.17
90	-1.66	1.93	-4.87	2.49
91	-1.88	2.04	-3.68	2.71
92	-1.21	2.52	-2.09	3.03
93	-1.52	2.52	-2.69	3.25
94	-2.32	1.86	-4.76	2.06
95	-1.37	2.03	-3.04	2.49
96	-1.87	2.28	-4.02	2.82
97	-1.49	3.01	-3.03	3.36
98	-2.45	2.76	-4.97	3.58
99	-0.46	2.09	-4.21	2.28
100	-1.98	3.48	-5.09	3.79
101	-1.29	2.27	-2.47	2.60

由表 I1 可知，源荷就地平衡方案，最大电压偏移发生在场景 11，最大偏移值为正向 5.9%，常态化双向潮流方案，最大电压偏移发生在场景 2，最大偏移值为正向 6.5%。

## I2 损耗

表 I2 101 个场景下损耗  
Table I2 Statistics of loss in 101 scenarios

场景	持续 时间/h	电源功率/ MW	电源电量/ MWh	源荷就地平衡方案				常态化双向潮流方案			
				储能损耗 功率/MW	网络损耗 功率/MW	总损耗 功率/MW	储能 损耗/MWh	网络 损耗/MWh	总损耗/ MWh	网络损耗功率/ 总损耗功率/MW	网络损耗/ 总损耗/MWh
1	1	89.18	87.78	0.35	4.01	4.36	0.31	4.01	4.36	4.19	4.19

2	1	85.68	86.48	0.38	4.95	5.33	0.44	5.01	5.33	5.12	5.12
3	1	251.24	260.42	0.91	9.59	10.50	0.78	9.53	10.50	9.90	9.90
4	6	254.92	1600.30	0.91	10.30	11.21	5.92	60.25	67.25	10.66	63.94
5	4	258.23	1068.90	0.85	11.99	12.84	4.27	47.64	51.35	12.16	48.65
6	1	249.47	249.60	1.18	13.57	14.75	1.03	13.60	14.75	13.94	13.94
7	9	526.09	4579.06	1.58	19.40	20.98	16.15	168.54	188.81	19.81	178.30
8	3	528.21	1533.36	1.76	22.13	23.89	4.77	65.85	71.66	22.55	67.65
9	1	519.79	535.63	2.32	22.45	24.77	2.27	22.50	24.77	23.92	23.92
10	3	505.60	1498.96	2.40	23.05	25.45	6.20	69.51	76.35	24.33	72.98
11	1	533.51	531.52	2.13	28.97	31.10	2.23	28.63	31.10	29.66	29.66
12	922	877.65	772640.94	2.63	30.35	32.98	2449.24	28954.52	30405.86	32.01	29517.06
13	431	887.81	362041.84	3.46	34.71	38.18	1250.40	15311.96	16453.97	36.39	15685.48
14	209	887.92	176894.42	3.78	37.25	41.03	679.65	7811.58	8576.11	38.58	8063.80
15	81	900.39	69025.53	3.74	38.88	42.62	267.18	3186.95	3452.44	40.77	3302.56
16	99	838.44	82689.27	3.33	41.46	44.78	417.88	4121.14	4433.60	42.96	4253.22
17	373	865.19	312039.46	4.15	45.88	50.03	1486.98	17376.81	18660.70	47.34	17658.16
18	282	841.01	245266.72	3.00	33.35	36.35	810.99	9551.65	10251.11	34.42	9707.19
19	93	840.64	82201.13	3.14	38.68	41.81	307.49	3565.00	3888.65	39.24	3649.29
20	39	879.69	34256.04	3.62	39.37	42.99	122.37	1611.71	1676.70	41.65	1624.28
21	12	882.84	10224.15	3.80	42.43	46.24	43.51	517.78	554.87	44.06	528.68
22	14	850.45	12517.55	4.05	45.22	49.27	46.10	639.96	689.76	46.47	650.51
23	59	880.89	51367.89	4.77	49.15	53.92	298.42	2826.54	3181.34	51.28	3025.64
24	177	833.42	156365.04	3.26	38.48	41.73	491.81	6769.41	7386.75	39.24	6945.42
25	39	882.85	34131.16	3.71	43.75	47.46	144.83	1696.06	1850.89	44.93	1752.36
26	10	844.84	8676.49	4.48	45.73	50.21	47.73	460.93	502.11	47.78	477.79
27	8	894.99	6797.10	3.72	48.65	52.37	37.54	388.95	418.93	50.63	405.00
28	6	882.15	5111.87	5.15	51.53	56.68	23.38	316.61	340.06	53.47	320.83
29	22	839.34	19173.64	5.54	56.75	62.29	121.36	1267.18	1370.33	59.16	1301.62
30	57	838.92	49685.70	3.00	41.26	44.26	229.77	2310.01	2522.74	41.65	2373.94
31	14	859.18	12427.73	4.01	46.07	50.07	58.25	642.47	701.01	47.78	668.90
32	9	851.99	7934.82	4.20	48.24	52.44	39.57	436.35	471.96	50.84	457.60
33	3	831.75	2581.82	4.45	52.91	57.36	14.93	151.90	172.08	53.91	161.73
34	2	865.59	1772.37	4.18	55.82	60.00	9.87	108.89	119.99	56.97	113.95
35	21	892.07	18270.75	4.97	60.54	65.51	112.47	1257.49	1375.62	63.11	1325.22
36	10	861.87	8748.34	3.93	41.49	45.41	38.09	425.51	454.15	44.06	440.57
37	1	836.29	888.64	4.58	47.76	52.34	4.22	49.59	52.34	50.63	50.63
38	2	891.06	1665.81	4.24	56.29	60.53	10.26	111.87	121.07	57.19	114.39
39	2	846.26	1684.38	5.05	64.25	69.30	9.86	128.82	138.60	67.05	134.09
40	3	869.67	2689.44	3.37	45.48	48.85	9.77	134.10	146.55	46.47	139.40
41	1124	1250.02	1309817.23	4.19	40.52	44.71	3361.47	45626.96	50256.22	42.00	47205.97
42	584	1195.25	733876.83	3.61	47.32	50.93	2444.69	26341.88	29744.05	47.62	27808.00
43	300	1199.56	366495.32	4.97	47.64	52.62	1380.17	14627.77	15784.68	50.43	15127.67
44	96	1159.52	115523.09	3.80	52.03	55.82	485.02	4978.00	5359.18	53.23	5110.53
45	77	1214.38	95417.97	4.26	53.74	58.00	334.34	4157.63	4466.32	56.04	4315.37
46	313	1164.05	387089.25	4.59	60.19	64.78	1430.86	18728.39	20277.63	61.66	19300.22
47	539	1216.48	641667.90	4.24	43.55	47.78	2055.64	23228.39	25755.21	45.09	24302.56
48	207	1163.61	258591.40	4.72	48.35	53.07	844.80	10121.67	10985.26	51.27	10612.54
49	88	1236.86	109094.16	4.95	52.81	57.75	414.58	4641.34	5082.07	54.36	4783.53
50	42	1175.71	50407.70	4.03	56.51	60.54	200.27	2351.86	2542.73	57.45	2412.83
51	33	1198.49	38241.19	6.02	56.51	62.53	156.38	1911.82	2063.56	60.54	1997.77
52	91	1208.41	113512.65	5.24	65.53	70.76	490.05	5906.56	6439.60	66.72	6071.38
53	519	1174.63	616438.16	4.67	48.22	52.90	2183.79	25939.43	27454.32	51.27	26608.25
54	125	1253.03	154320.58	4.61	57.60	62.21	646.40	7046.61	7775.82	58.57	7321.50
55	59	1201.10	74216.85	6.22	59.97	66.18	303.81	3610.23	3904.78	62.22	3671.21
56	27	1206.44	33445.57	4.79	65.49	70.28	143.71	1700.18	1897.69	65.88	1778.64
57	29	1168.67	34692.81	5.74	67.10	72.84	163.35	1980.14	2112.37	69.53	2016.30
58	53	1160.42	62914.83	6.16	74.00	80.16	376.89	3832.10	4248.41	76.83	4072.06
59	308	1243.91	363935.14	4.63	51.65	56.28	1273.41	16422.82	17334.35	54.36	16742.37
60	83	1243.30	103224.21	5.89	59.26	65.15	475.09	4897.32	5407.42	62.22	5164.58
61	49	1231.83	60188.21	5.42	64.30	69.72	304.03	3122.86	3416.43	66.16	3241.68

62	19	1233.07	22174.20	5.49	67.53	73.02	96.61	1283.57	1387.42	70.09	1331.70
63	19	1167.35	22252.10	5.70	71.59	77.28	115.10	1363.29	1468.41	74.02	1406.42
64	37	1197.27	43668.48	5.91	80.46	86.37	227.87	2907.80	3195.84	81.89	3029.85
65	105	1248.74	122204.93	5.08	56.07	61.15	509.15	5826.24	6420.90	57.45	6032.08
66	28	1223.92	35062.28	5.07	64.80	69.87	151.26	1795.37	1956.33	65.88	1844.52
67	20	1177.04	24636.44	5.58	67.65	73.24	99.58	1371.82	1464.70	70.09	1401.79
68	9	1250.24	10589.63	5.62	72.94	78.57	57.46	632.61	707.09	74.30	668.73
69	5	1170.06	5894.80	7.00	74.48	81.48	30.33	387.60	407.39	78.52	392.58
70	23	1220.04	27048.47	7.87	83.14	91.01	162.54	1968.97	2093.17	86.94	1999.72
71	25	1233.58	29145.02	5.57	57.72	63.29	127.08	1463.84	1582.24	60.54	1513.46
72	1	1178.17	1164.41	6.43	67.58	74.02	6.36	65.59	74.02	69.53	69.53
73	3	1165.65	3537.27	6.81	69.47	76.28	19.17	211.68	228.85	74.02	222.07
74	2	1211.27	2485.58	7.91	78.52	86.43	15.89	160.50	172.86	83.01	166.02
75	1	1227.53	1165.16	9.00	88.13	97.13	8.06	87.83	97.13	92.00	92.00
76	2	1217.81	2377.00	5.81	63.82	69.64	10.45	130.17	139.27	66.72	133.44
77	45	1758.51	79818.99	4.42	54.24	58.67	229.33	2448.37	2639.99	56.00	2520.15
78	18	1791.58	31604.23	5.27	61.92	67.19	113.26	1066.28	1209.42	63.30	1139.44
79	2	1696.83	3464.03	4.80	66.67	71.47	11.70	131.02	142.94	66.95	133.90
80	1	1678.99	1706.42	5.10	69.31	74.40	6.19	66.70	74.40	70.60	70.60
81	4	1793.94	7193.27	6.83	77.34	84.17	23.01	321.86	336.69	81.55	326.20
82	160	1761.56	269613.16	4.67	58.62	63.28	851.55	9305.00	10125.47	60.02	9602.85
83	33	1704.37	57541.67	6.59	64.08	70.67	202.11	2148.95	2332.09	68.05	2245.54
84	27	1690.04	48207.41	6.12	70.96	77.08	178.13	1855.01	2081.17	72.06	1945.65
85	5	1791.23	8618.83	5.33	73.26	78.59	29.51	367.52	392.95	76.08	380.38
86	6	1787.15	10748.52	6.12	79.18	85.30	37.59	475.33	511.78	80.09	480.54
87	3	1781.76	5019.33	7.49	86.75	94.24	24.93	256.14	282.72	88.12	264.36
88	159	1674.73	278237.08	6.17	65.40	71.57	1011.60	10402.94	11379.47	68.05	10819.41
89	29	1720.26	50642.40	7.55	74.84	82.39	160.71	2168.65	2389.28	77.54	2248.52
90	15	1688.94	26463.45	6.84	78.02	84.87	95.98	1204.15	1272.99	82.28	1234.19
91	8	1719.77	13403.04	8.19	82.25	90.44	58.93	659.28	723.51	87.02	696.19
92	6	1668.64	10561.59	7.54	89.18	96.72	39.84	529.68	580.31	91.77	550.61
93	7	1703.23	11885.56	9.72	98.17	107.90	59.17	685.18	755.27	101.26	708.80
94	94	1726.59	164290.74	7.19	69.26	76.45	570.39	6544.96	7186.43	72.06	6773.74
95	16	1658.62	27536.60	6.90	80.20	87.10	113.64	1243.08	1393.60	82.28	1316.47
96	5	1761.88	8310.85	7.73	84.99	92.72	41.51	412.21	463.60	87.39	436.94
97	1	1782.11	1772.60	7.16	96.94	104.10	7.79	96.14	104.10	97.61	97.61
98	9	1734.32	15037.98	8.27	104.46	112.73	87.16	914.69	1014.53	107.83	970.43
99	28	1716.46	49385.66	5.42	74.69	80.12	194.14	2070.93	2243.24	76.08	2130.11
100	2	1699.34	3493.71	11.01	108.64	119.65	19.41	216.59	239.31	114.39	228.79
101	1	1787.13	1687.80	6.40	77.47	83.86	7.14	76.54	83.86	80.09	80.09
合计	8760	109546.60	9369620.10	496.52	5675.15	6171.67	34908.67	409124.90	444579.35	5873.16	422737.89

对于源荷就地平衡方案，总损耗包含网络损耗和储能装置充放电运行的损耗，对于常态化双向潮流方案，无储能装置，总损耗即为网络损耗。

由表 I2 可知，源荷就地平衡方案，储能损耗率为： $34908.67/9369620.10=0.4\%$ ，网络损耗率为： $409124.90/9369620.10=4.3\%$ ，总损耗率为 4.7%。

常态化双向潮流方案，总损耗率为： $422737.89/9369620.10=4.5\%$ 。

### 13 N-1 校验

常态化双向潮流方案高压配电系统主变 N-1 校验结果见表 I3，高压配电系统馈线 N-1 校验结果见表 I4，中压配电系统主变 N-1 校验结果见表 I5，中压配电系统馈线 N-1 校验结果见表 I6。

表 I3 高压配电系统主变 N-1 校验

Table I3 Results of high voltage distribution network transformer N-1 verification

主变	N-1 最大负载率/%	N-1 校验结果
T1	98	1
T2	100	1
T3	95	1
T4	97	1

注：“1”表示通过，“0”表示不通过。

表 I4 高压配电系统馈线 N-1 校验

Table I4 Results of high voltage distribution network feeder N-1 verification

起点母线	终点母线	N-1 最大负载率/%	N-1 校验结果	起点母线	终点母线	N-1 最大负载率/%	N-1 校验结果
Bus 1	Bus3	100	1	Bus 5	D4	100	1
Bus 1	Bus 5	90	1	Bus 6	Bus 10	100	1
Bus 1	D1	95	1	Bus 6	D5	95	1
Bus 2	Bus 4	100	1	Bus 7	Bus 8	98	1
Bus 2	Bus 6	95	1	Bus 7	D7	100	1
Bus 2	D2	98	1	Bus 8	Bus 9	98	1
Bus 3	D3	100	1	Bus 8	Bus 10	100	1
Bus 4	Bus 5	100	1	Bus 8	D8	98	1
Bus 4	Bus 9	98	1	Bus 9	D9	100	1
Bus 4	D10	100	1	Bus 10	D6	100	1
Bus 5	Bus 10	100	1	—	—	—	—

注：“1”表示通过，“0”表示不通过。

表 I5 中压配电系统主变 N-1 校验

Table I5 Results of medium voltage distribution network transformer N-1 verification

主变	N-1 最大负载率/%	N-1 校验结果	主变	N-1 最大负载率/%	N-1 校验结果
中压配电系统 D1 主变	100	1	中压配电系统 D6 主变	95	1
中压配电系统 D2 主变	98	1	中压配电系统 D7 主变	94	1
中压配电系统 D3 主变	100	1	中压配电系统 D8 主变	100	1
中压配电系统 D4 主变	100	1	中压配电系统 D9 主变	100	1
中压配电系统 D5 主变	99	1	中压配电系统 D10 主变	100	1

注：“1”表示通过，“0”表示不通过。

表 I6 中压配电系统馈线 N-1 校验

Table I6 Results of medium voltage distribution network feeder N-1 verification

起点	终点	N-1 最大负载率/%	N-1 校验结果
中压配电系统 D1	中压配电系统 D2	100	1
中压配电系统 D3	中压配电系统 D9	96	1
中压配电系统 D4	中压配电系统 D10	100	1
中压配电系统 D5	中压配电系统 D6	100	1
中压配电系统 D7	中压配电系统 D8	93	1

注：“1”表示通过，“0”表示不通过。

就地平衡方案均满足 N-1 要求，其 N-1 校验结果不再列出。

#### 14 利用率

现有配电网利用率指标<sup>[25]</sup>仅考虑了单向潮流，本文定义配电系统的利用率考虑双向潮流。

正向利用率：

$$\eta_F = \frac{\int_0^T P_{F,t} dt}{CT} \quad (11)$$

反向利用率：

$$\eta_R = \frac{\sum_{t=0}^T -P_{R,t} dt}{CT} \quad (12)$$

双向综合利用率：

$$\eta = \eta_F + \eta_R \quad (13)$$

式中： $T$ 为评估持续时间； $P_{F,t}$ 为 $t$ 时刻配电设备传输的正向功率； $P_{R,t}$ 为 $t$ 时刻配电设备传输的反向功率；同一时刻， $P_{F,t}$ 与 $P_{R,t}$ 中，至多有一个不为0； $C$ 为配电设备容量。

对于实际大规模配电系统，考虑到其规模庞大，可通过计算联络线的双向综合利用率来反映配电系统整体的综合利用程度。联络线的双向综合利用率除了反映自身的综合利用程度外，还反映所联络配电系统的利用程度。

对于本文算，选取高压配电系统至中压配电系统联络线进行正向、反向和双向综合利用率计算。高压配电系统 HD1 至中压配电系统 D1-D10 的 110kV 联络线采用 LGJ-185 导线，额定容量为 32MW，评估时间为全年 8760 小时。

两种方案下，以 D1 至母线 1 的联络线为例，分别计算正向、反向和双向综合利用率。

1) 源荷就地平衡方案

分别累计潮流为正向时刻的功率之和，得到联络线正向利用率：

$$\eta_F = \frac{\sum_{t=0}^{8760} P_{F,t}}{32 \times 8760} = \frac{96623}{280320} = 34.3\% \quad (14)$$

式中， $\sum_{t=0}^{8760} P_{F,t}$  为全寿命周期内，各时刻正向潮流之和，例如 3 个典型场景下分别为 0.2MW、0.7MW 和 16.0MW，见表 2；其余时刻值通过潮流计算可以得到，不再单独列出。

分别累计潮流为反向时刻的功率之和，得到联络线反向利用率：

$$\eta_R = \frac{\sum_{t=0}^{8760} -P_{R,t}}{32 \times 8760} = \frac{3924.5}{280320} = 1.4\% \quad (15)$$

联络线双向综合利用率：

$$\eta = \eta_F + \eta_R = 35.7\% \quad (16)$$

2) 常态化双向潮流方案

分别累计潮流为正向时刻的功率之和，得到联络线正向利用率：

$$\eta_F = \frac{\sum_{t=0}^{8760} P_{F,t}}{32 \times 8760} = \frac{99513.6}{280320} = 35.5\% \quad (17)$$

分别累计潮流为反向时刻的功率之和，得到联络线反向利用率：

$$\eta_R = \frac{\sum_{t=0}^{8760} -P_{R,t}}{32 \times 8760} = \frac{58306.5}{280320} = 20.8\% \quad (18)$$

联络线双向综合利用率：

$$\eta = \eta_F + \eta_R = 56.3\% \quad (19)$$

采用以上计算方案，计算周期为全年 8760 小时，计算两方案配电系统正向利用率  $\eta_F$ 、反向利用率  $\eta_R$  以及双向综合利用率  $\eta$ ，结果见表 I7 和表 I8。

表 I7 中压配电系统至高压配电系统联络线利用率对比

Table I7 Comparison of utilization efficiency of tie-lines between medium voltage distribution networks and high voltage distribution networks

起点母线	终点	源荷就地平衡方案			常态化双向潮流方案		
		$\eta_F/\%$	$\eta_R/\%$	$\eta/\%$	$\eta_F/\%$	$\eta_R/\%$	$\eta/\%$
1	D1	34.3	1.4	35.7	35.5	20.8	56.3
2	D2	38.9	0.9	39.8	43.4	20.4	63.8
3	D3	65.1	1.4	66.5	68.6	28	96.6
5	D4	22.3	1.1	23.4	23.8	12.8	36.6
6	D5	60.1	1.7	61.8	67.7	25.1	92.8
10	D6	55.3	1.5	56.8	56	34.4	90.4
7	D7	63.2	0.8	64	64.6	29	93.6
8	D8	54.4	1.3	55.7	65.9	23.2	89.1
9	D9	45.8	1.8	47.6	54	21	75
4	D10	38.9	1.5	40.4	42.1	21.7	63.8
平均值		47.8	1.3	49.1	52.1	23.6	75.7

表 18 高压配电系统至 220kV 电网联络线利用率对比

Table 18 Comparison of utilization efficiency of tie-lines between high voltage distribution networks and 220kV network

高压配电系统	220kV 电网母线	源荷就地平衡方案			反向潮流常态化方案		
		$\eta_E/\%$	$\eta_R/\%$	$\eta/\%$	$\eta_E/\%$	$\eta_R/\%$	$\eta/\%$
HD1	24	27.4	1.1	27.4	54.3	29.2	83.5
HD1	11	40.3	1.5	40.3	50.6	23.8	74.4
HD1	12	18.6	0.8	18.6	59.9	24.4	84.3
HD1	11	46.8	0.6	46.8	50.3	12.6	62.9
HD1	12	34.2	1.3	34.2	59	21.8	80.8
HD2	13	20.1	1.5	20.1	32.4	19.9	52.3
HD3	14	19.6	1.4	19.6	62.9	28.3	91.2
HD4	15	52.8	1.1	52.8	42.4	42.4	84.9
HD5	16	18.5	0.5	18.5	16.4	5.8	22.2
HD6	18	72.6	1.7	72.6	52	30.5	82.5
HD7	19	17.8	1.2	17.8	18.4	7.5	26
HD8	20	68.3	0.3	68.3	59.8	25.6	85.4
平均值		36.4	1.1	37.5	46.5	22.7	69.2

由表 17 和表 18 可知，常态化双向潮流方案显著提高了中压配电系统至高压配电系统联络线、高压配电系统至 220kV 电网联络线的正向利用率、反向利用率以及双向综合利用率。

### 15 经济指标

初始投资仅考虑两种方案在现有配电系统基础上新增设备费用。

源荷就地平衡方案中配置储能装置，配电系统共计配置储能装置 214.2MWh，储能装置工程造价按 0.7 元/Wh 进行计算，初始投资合计 1.5 亿元，年运行维护费用占初始投资比例按 2%计，为 300 万元。

常态化双向潮流方案的初始投资费用包括：监控主站费用、对现有监控系统功能扩展费用以及具有安全域监控功能的新型融合终端的新增费用，各项费用见表 19，初始投资合计 0.685 亿元，年运行维护费用占初始投资比例按 2%，为 134 万元。常态化双向潮流方案初始投资见表 19。

表 19 常态化双向潮流方案初始投资

Table 19 Initial investment for normalized bidirectional power flow scheme

项目	数量	单价/万元	总价/万元
安全域监控主站	1	850	850
现有监控系统功能扩展	8	110	880
具有安全域监控功能的融合终端	2560	2	5120
合计	2569	962	6850