

# Discussion on the Planning and Strengthening Methods of Transmission Grid for New Energy Consumption

Ran Huo

China Water Resources and Electric Power International Co., Ltd., Beijing, 101100, China

## Abstract

With the acceleration of China's energy structure adjustment, the proportion of new energy such as wind power and photovoltaics in the power system continues to increase, posing new challenges to the planning and operation of transmission grids. This article focuses on the goal of new energy consumption and systematically analyzes the key issues faced by transmission network planning under the high proportion of new energy access. It explores transmission network planning methods and strengthening paths that adapt to the characteristics of new energy. Research has shown that by establishing a multi-objective collaborative planning system, integrating multi-element resources of source, grid, load, and storage, and applying advanced technological means to enhance system resilience, the power grid's ability to absorb new energy can be effectively enhanced, providing important support for building a new type of power system.

## Keywords

New energy consumption; Transmission grid planning; Multi objective optimization; System resilience; grid reconstruction

## 面向新能源消纳的输电网架规划与强化方法探讨

霍然

中国水利电力对外有限公司, 中国·北京 101100

## 摘要

随着中国能源结构调整步伐加快, 风电、光伏等新能源在电力系统中的占比持续提升, 对输电网架规划与运行提出了全新挑战。本文围绕新能源消纳目标, 系统分析了高比例新能源接入下输电网架规划面临的关键问题, 探讨了适应新能源特性的输电网架规划方法及强化路径。研究表明, 通过建立多目标协同规划体系, 整合源网荷储多元素资源, 并应用先进技术手段提升系统韧性, 可有效增强电网对新能源的消纳能力, 为构建新型电力系统提供重要支撑。

## 关键词

新能源消纳; 输电网架规划; 多目标优化; 系统韧性; 网架重构

## 1 引言

随着碳达峰、碳中和目标的深入推进, 中国新能源发展呈现规模化、高速化态势。传统电网规划方法基于负荷增长与确定性电源布局, 难以适应高比例新能源接入下源荷双侧俱增的不确定性需求<sup>[1]</sup>。同时, 电网结构性强直弱交矛盾、系统惯量下降、跨区输送能力不足等问题, 进一步制约了新能源的高效消纳。

## 2 面向新能源消纳的输电网架规划方法

### 2.1 规划思路的转变

面向新能源消纳的输电网架规划, 首先要做到规划思路的根本性转变。传统规划方法通常按年度最大负荷, 未考虑新能源大规模利用, 易造成投资过大, 实际利用率不高。

而新型规划方法则需要把新能源消纳当作核心约束条件, 推动规划理念从传统的“满足负荷需求”到“优化资源调配”的观念转变<sup>[2]</sup>。

新型输电网架规划要以创建新型电力系统, 符合经济社会发展总体规划, 符合用户不断增长的用电需求为基本目标。在规划中要统筹考量可调综合资源的特性以及其带来的影响, 合理安排各级电网的建设时序, 推动网架结构的优化, 实现电网的高效运转, 实现可靠的供电, 减少电力的损耗, 实现电网的可持续发展。具体而言, 规划思路可以从三个方面来展开:

一是考虑多目标协同。输电网架规划要综合考虑新能源消纳、负荷中心供电、水电外送、通道互联等多目标。基于上述思路, 可以建立如下多目标规划模型:

$$F = \min(C_1 + C_2 + \omega_3 C_3 + \omega_4 C_4 - \omega_5 C_5 - \omega_6 C_6)$$

$C_1$  (投资成本): 指规划期内新建输电线路等电网设施的总投资成本。

【作者简介】霍然(1994-), 女, 中国北京人, 硕士, 工程师, 从事电力新能源相关研究。

$C_2$  (运行成本): 主要指系统中火电机组等常规电源的发电燃料成本, 也包括网损费用。

$C_3$  (弃风、弃光惩罚): 为表征新能源消纳水平而设置的虚拟成本, 代表因电网约束而无法接纳的风电、光伏等清洁能源电量所造成的价值损失和环境代价。

$C_4$  (负荷中心切负荷费用): 代表因电力供应不足而对负荷中心实施强制限电所造成的经济损失和社会影响。

$C_5$  (水电外送盈利): 指充分利用水电富集地区的能源, 通过外送通道售电所带来的经济效益。在最小化模型中, 此项为负成本, 即视为收益。

$C_6$  (网架联络强度): 通常定义为网架在正常(N)与故障(N-1)状态下, 关键联络线传输功率的总和。

$\omega_{3,6}$  为各变量的权重系数, 用于平衡不同目标之间的量纲与优先级。

这种多目标模型可以很好地平衡不同的功能需求, 在控制投资和运行成本的同时, 努力减少弃风和停电, 并积极提高外送收益和电网结构强度, 达到系统整体最优。

二是考虑时序特性整合。新能源出力存在较强的时序相关性, 在规划时要加以考量。建议采用“分月模式”分析系统数据, 对各月电力系统时序出力能力进行全面分析, 模拟新能源出力曲线和电网负荷曲线, 得到年度范围内的新能源消纳能力集合评判<sup>[9]</sup>。在此基础上, 选取夏季高峰负荷新能源满出力、冬季低谷负荷新能源零出力等极端时间断面开展安全校核, 保证规划网架全时段场景适用。

三是考虑不确定性管理。新能源发电存在不确定性, 规划方法要采用概率思维, 而非确定性思维。通过生成多个典型场景, 通过计算各个场景发生的概率, 进行概率性规划决策。而且规划方案要有一定的前瞻性以及弹性, 给未来的新能源发展留出一一定的余地。

## 2.2 关键技术方法

面向新能源消纳的输电网架规划需要一系列关键技术方法支撑, 主要包括以下几个方面:

多目标优化技术是主要方法。前文所提到的多目标规划模型中, 它的约束条件有功率平衡约束、传输容量约束、发电机节点出力约束、新建线路架设回路数约束等。求解这类复杂的模型可以使用智能优化算法, 比如遗传算法、分解多目标优化算法等, 使用 PSD-BPA、MATLAB 等工具联合仿真, 得出最优规划方案。

新能源消纳能力评估是基础工作。要评价就要从三个方面来分析, 先看不同能源组合的出力, 再看电网输送约束下的消纳, 最后算出不同新能源的消纳比例。具体的评估可采用基于方案评估比选和优化方法, 从每个网架结构对应的最大输电容量方案开始, 评估方案的新能源消纳能力, 如果消纳能力满足要求, 减少输电容量, 再次评估, 直到不满足要求为止。通过对各个方案的投资、运行成本进行比较, 选出最优方案。

网架结构优化是关键环节。规划中要先强化新能源汇集地区输电能力, 例如, 贵州省通过建设 500 千伏乌撒变电站, 在其西北部构建了新能源消纳的“高速路”, 从而有效吸纳了毕节、兴义等地的光伏与风电资源。同时加强调节能力强的地区向其他地区输送新能源的输电通道, 以及新能源并网中心与负荷中心之间的输电通道。网架结构优化目标是合理分区、柔性互联、安全可控、开放互济, 打造坚强主干网架。

可调综合资源整合是新手段, 规划时要充分考虑可再生能源, 储能, 需求响应资源等可调综合资源的调节能力。像储能应用可以将一部分随机的可再生能源变成相对稳定的可调电源, 可以减少电网的安全可靠性投资; 需求响应资源可以提高资源的优化配置能力, 降低系统成本。对这些资源进行有效整合, 能够显著增强系统运行的灵活性, 并提升其新能源接纳能力。

## 2.3 先进技术应用

面向新能源消纳的输电网架规划需要积极应用先进技术, 提升规划科学性与精准度。

构网型技术是重要方向。构网型设备对电网送端的沙戈荒高比例新能源地区、受端的空心化地区都有广泛的应用需求。在规划中, 根据各地电网运行的主要矛盾, 因地制宜地配置构网型设备, 在沙戈荒等高比例新能源外送地区, 配置构网型技术设备抑制暂态过电压, 在负荷中心配置构网型技术设备提升系统短路容量, 在弱交流电网试点配置构网型设备提升保供能力和有功快速调节能力。

大数据与人工智能技术给规划带来新工具。通过收集大量的新能源出力数据、负荷数据以及气象数据, 可以建立更加准确的出力和负荷模型, 生成典型场景。其中, 基于 PMRM 的系统韧性定量表征技术和数字孪生技术尤为关键, 前者将负荷损失划分为低、中、高风险区间, 侧重于优化中、高损失次生故障, 提升系统稳健性, 后者对规划方案进行全面模拟验证, 提前发现问题。

主动提升韧性技术是应对极端事件的关键。通过窗口滚动的方式, 把复杂的网架重构全局优化问题分解成一系列的短期优化问题, 一方面可以减小求解空间, 另一方面也考虑到了未来可能出现的高风险次生故障。基于滚动机制的优化策略, 能够在系统恢复过程中动态协调快速性与稳健性, 通过预估未来可能发生的次生故障, 并据此优化网架结构, 从而显著提升系统应对高风险事件的生存能力。

## 3 提升输电网架韧性与稳定性的强化方法

### 3.1 韧性主动提升策略

电力系统韧性指的是系统在遭遇极端事件的时候, 具备抵抗、适应并迅速恢复的能力。新能源占比攀升, 极端天气事件频发, 输电网架韧性改善成了保证能源安全的关键。韧性主动提升策略的重点是规划时就前瞻性地考虑到系统

应对极端事件的能力，而不是等到发生后再去补救。

应用 PMRM 技术对电网在极端事件，如台风、冰雪、网络攻击下的表现进行更精细化的测量和评估，输出定量化风险图谱。经由改良网架重构恢复方案，缩减中、高损失次生故障的冲击，从而保证系统达成稳健的恢复进程。实际应用中，可构建“时步-超越概率-负荷损失”的三维曲面，直观展现系统在恢复过程中不同阶段的脆弱点，以辅助规划决策。

网架重构决策的窗口滚动机制是一种有效的韧性提升方式。网架重构是一个多时段的过程，考虑次生故障影响时，全局优化模型求解空间决策域过大，直接求解困难。窗口滚动机制是设置一个固定的滚动窗口，在这个窗口中建立并求解短期优化模型，然后不断更新窗口的边界、滚动窗口，直到整个网架重构过程结束。

差异化应对次生故障是韧性提升的关键。不同类型的次生故障对系统的影响不一样，规划时要采用不同的办法。对于高风险故障，要经由改良网架结构并恢复序列，来最大程度削减故障出现的几率及其影响，对于中低风险故障，可以在恢复效率和稳健性之间达成一种均衡。这样差异化的方法可以在有限的资源中达到最好的韧性提升效果。

### 3.2 网架重构与恢复策略

极端事件后系统能够迅速恢复，是网架韧性的重要表现。与传统策略追求恢复速度不同，面向新能源消纳的电网规划，必须将恢复过程的抗扰动性前置考量，构建兼具快速性与稳健性的网架重构方案。

思考韧性主动加强的改良策略是主要办法。该策略依靠窗口滚动机制，按照目标函数推动，模型按照系统恢复状况协调兼顾快速与稳健，在对将来也许出现的次生故障的判断里，改进调整网架结构，改善系统遭遇高风险事件的存活能力。研究显示，采取这种策略的系统，能在可在保持相近恢复速度的同时，大幅降低因次生故障导致的高负荷损失风险，对于严重故障的抵御能力更强。

同时重构过程中要发挥好新能源资源的支撑作用。传统的恢复策略主要依靠常规机组，但新能源资源在系统恢复中也起着重要的作用。规划需积极探索新能源作为黑启动电源的潜力，安排储能，设置构网型控制技术，让新能源在系统恢复的时候给予电压和频率方面的支持，加快恢复速度。

另外要创建“主动防御-应急恢复”一体化架构。网架重构不应是孤立的应急措施，要同系统主动防御体系联系起来。依靠加强电网监测预警能力，在极端事件出现之前就做好预案准备；事件发生时，则能基于实时态势感知，动态选择最优恢复路径，达成由被动应付到积极抵御的转变。

### 3.3 系统稳定保障技术

高比例新能源接入导致系统稳定特性发生改变，其低

惯量、弱支撑的特性要求稳定保障技术要不断更新。

构网型控制技术是应对这一挑战重要突破口，该技术可以改善新能源设备的电网支撑能力。在沙戈荒等高比例新能源外送地区，构网型技术可以抑制暂态过电压；在负荷中心可以提高系统短路容量；在弱交流电网可以提高保供能力和有功快速调节能力。应用该技术要提升技术风险管控力度，按照实际应用情况，加快构网型设备技术标准制定进程，规范支撑能力要求。

灵活调节资源建设是稳定保障基础。系统调节能力成为新能源消纳的主要限制因素，供给侧要大力推动煤电机组灵活性改造，系统侧加快新型储能发展，运行侧改进调度运行方式，增强系统整体调节能力。更重要的是，应通过市场机制设计，让各类调节资源公平参与电网调节，充分发挥市场在资源配置中的决定性作用，形成源网荷储协同互动的稳定保障新格局。

智慧调度系统是新能源电网稳定运行的中枢。要适应高比例新能源体系，需要构建一个全景感知、精准预测、智能决策、协同控制的现代化调度体系，全面优化提升配电网可观测、可测量、可调控的能力。通过大数据、人工智能等先进技术，做到新能源出力精准预测、运行方式优化仿真、故障异常智能处置，公平调用各类调节资源，形成源网荷储多种协同的调节体系，从而最大化系统的灵活性与消纳能力。

## 4 结语

面向新能源消纳的输电网架规划与强化，是推动能源绿色转型、构建新型电力系统的核心环节。本文通过系统分析表明，为应对高比例新能源带来的挑战，传统规划范式必须向多目标协同、源网荷储统筹、韧性前瞻提升的方向演进。通过构网型技术、智能调度系统、市场机制创新等综合手段，方可有效平衡经济性、可靠性与消纳能力。未来，随着新能源装机规模的持续增长，需进一步深化网架结构优化与调节资源配置，加强跨省区输电通道建设与分布式能源协同，同时完善基于全生命周期成本的经济性评价体系。唯有通过技术革新与制度保障的双轮驱动，才能实现新能源从“并网”到高质量“融网”的跨越，为新型电力系统建设提供坚实基础。

### 参考文献

- [1] 马士全, 丁进良. 面向可再生能源消纳的火电机组控制结构综合与分析[J]. 自动化学报, 1-15.
- [2] 邱伟强, 王茂春, 林振智, 杨莉, 王莲芳, 孙剑影. “双碳”目标下面向新能源消纳场景的共享储能综合评价[J]. 电力自动化设备, 2021, 41 (10): 244-255.
- [3] 冯佳威. 面向提升新能源消纳的综合能源系统低碳经济优化调度[D]. 沈阳工业大学, 2024.