



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2306981

引用格式:陈茜,白晶,陈小月,等.分布式光伏并网对配电网的影响综述[J].科学技术与工程,2024,24(27):11491-11504.

Chen Qian, Bai Jing, Chen Xiaoyue, et al. Review of the impact of distributed PV grid integration on the power grid[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(27): 11491-11504.

## 电工技术

# 分布式光伏并网对配电网的影响综述

陈茜<sup>1</sup>, 白晶<sup>2</sup>, 陈小月<sup>3\*</sup>, 王羽<sup>3</sup>, 王海云<sup>1</sup>, 周运斌<sup>2</sup>, 王方雨<sup>1</sup>, 董楠<sup>2</sup>

(1. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100075; 2. 国网北京市电力公司, 北京 100031;  
3. 武汉大学电气与自动化学院, 武汉 430072)

**摘要** 随着绿色电力的大力发展和新型电力系统的建设,分布式光伏发电系统已经成为未来的重要能源形式之一。由于光伏渗透率的不断提高,分布式光伏电源并网会改变传统的配网潮流结构,对配电网的电能质量、安全保护以及规划等方面产生影响。首先概述了分布式光伏发电系统的发展现状,分析分布式光伏并网的特点以及工作原理。其次,对分布式光伏并网接入配网造成的影响及治理措施进行概述分析和总结。最后期望为分布式光伏电源接入高渗透率的可再生能源配电系统的快速发展提供参考。

**关键词** 分布式光伏; 低压配电网; 电能质量; 继电保护; 配电网规划

**中图分类号** TM71; **文献标志码** A

## Review of the Impact of Distributed PV Grid Integration on the Power Grid

CHEN Qian<sup>1</sup>, BAI Jing<sup>2</sup>, CHEN Xiao-yue<sup>3\*</sup>, WANG Yu<sup>3</sup>, WANG Hai-yun<sup>1</sup>,  
ZHOU Yun-bin<sup>2</sup>, WANG Fang-yu<sup>1</sup>, DONG Nan<sup>2</sup>

(1. State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China; 2. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China; 3. School of Electrical and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**[Abstract]** The distributed photovoltaic (PV) power system is considered to be one of the most important forms of energy in the future with the vigorous development of green power and the construction of new power systems. As the penetration rate of photovoltaic continues to increase, the traditional distribution network trend structure will be changed, resulting in the impact of power quality, security protection and planning of the distribution network. The development status of distributed PV power generation system was outlined, the characteristics of distributed PV grid-connected and the working principle was analyzed. Secondly, the impacts of distributed PV grid-connected access to the distribution network and governance measures were outlined, analyzed and summarized. Finally, it was expected to provide reference for the rapid development of distributed PV power access to high penetration of renewable energy distribution system.

**[Keywords]** distributed photovoltaic; low-voltage distribution network; power quality; relay protection; distribution network planning

由全球经济高速发展而导致的能源短缺以及环境污染等问题,使可再生能源技术的开发和应用受到人们广泛关注。太阳能作为一种清洁能源,具有资源充足、不受地区限制的优势,在众多可再生能源之中占据重要地位。截至2020年底,中国可再生能源装机量达到9.34亿kW,多年稳居世界第一,

根据“十四五”可再生能源发展规划以及2021年10月国务院印发的《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》,建立新能源为主体的新型配电系统和推广光伏发电技术已是当下趋势。

光伏发电技术包括集中式光伏发电(centralized

收稿日期: 2023-09-06 修订日期: 2024-05-13

基金项目: 国网北京市电力公司科技项目(520223220007)

第一作者: 陈茜(1991—),女,汉族,北京人,硕士,高级工程师。研究方向:电网运行方式分析等。E-mail: ad\_cq9104@163.com。

\*通信作者: 陈小月(1987—),女,汉族,湖北荆门人,博士,副教授,硕士研究生导师。研究方向:电力系统电磁暂态仿真及过电压防护技术、气体放电及放电等离子体、电力系统分析与控制等。E-mail: chenxiaoyue@whu.edu.cn。

投稿网址: www.stae.com.cn

photovoltaic, CPV) 和分布式光伏发电 (distributed photovoltaic, DPV) 两种。前者规模大, 将发出的电直接并入电网, 无法充分发挥太阳能分布广泛等特点。而后者规模较小, 一般建设于用户场地附近, 以自发自用、余量上网的模式运行。近年来, 随着“金太阳工程”和“整县光伏”等方案的提出。随着分布式光伏的发展得到大力推动, 中国低压配电网光伏渗透率不断提升, 由于光伏发电自身随机性、波动性等特点以及配网自身消纳能力的技术限制, 大量的分布式光伏并网会对配电网产生一系列影响, 导致“弃光”等现象, 因此研究分布式光伏接入对配电网的影响具有重要的价值和意义。

综合来看, 国外光伏发电系统发展较早, 光伏实验室设备以及光伏并网准则较为完善, 对分布式光伏接入配电网研究较多。而中国对光伏并网对配电网的影响现有的研究中, 大多仅针其中某一方面带来的影响进行分析, 缺少全面深入的研究, 也有部分文献给出了光伏并网对配电网的多种影响, 也只属于总结定性概括, 并未对光伏并网后带来不良影响的应对措施进行分析, 对于光伏并网对配电网影响程度的评价体系, 也鲜有文献做过研究。

在现有的研究基础之上, 通过分析分布式光伏并网的原理及特点, 总结归纳分布式光伏并网之后对配电网电能质量、继电保护以及配电网规划的各种影响, 并提出其应对措施, 确保配电网电能质量、安全稳定运行的前提下, 提升规划经济性, 为构建新型电力系统提供参考。

## 1 分布式光伏发电系统的工作原理

分布式光伏发电系统, 也被称为光伏电池并网发电系统, 其工作原理主要是通过太阳能电池板中的半导体产生的光生伏特效应, 将太阳能转换为电能, 再通过逆变装置把直流电转换为符合国家规定的交流电, 最后直接或通过变压器接入电网。根据有无隔离变压器可以将光伏并网发电系统分为隔离型与非隔离型。

### 1.1 隔离型分布式光伏发电系统

工频隔离型光伏发电系统是主流的隔离型分布式光伏发电系统, 可将其分为单级工频隔离型光伏和双级工频隔离型光伏并网发电系统。

图 1 与图 2 所示分别为典型的单级、双极工频隔离型光伏发电系统的结构图<sup>[1]</sup>, 主要由光伏阵列、逆变器、滤波器和变压器组成, 具有结构简单、转换效率高的特点。

双极工频隔离型光伏发电系统与单极相比增加了 Boost 升压电路, 其优势在于可以通过使用最大

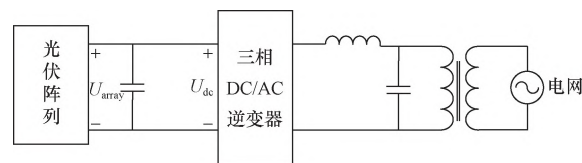


图 1 典型的单级隔离型光伏发电系统结构图

Fig. 1 Typical single-stage isolated PV power generation system structure diagram

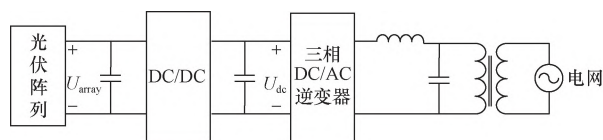


图 2 典型双级工频隔离型光伏并网发电系统结构图

Fig. 2 Typical two-stage frequency isolated PV grid-connected power generation system structure diagram

功率点跟踪技术对其电路进行控制, 可以使光伏电池在最大功率点附近工作, 同时也能实现电流控制。

### 1.2 非隔离型分布式光伏发电系统

采用不含变压器的非隔离型光伏并网系统, 是提高光伏并网效率的有效手段之一。省略复杂工频变压器或高频变压器, 使系统结构变简单、降低成本并提升效率。图 3 所示为典型的非隔离型光伏发电系统<sup>[2]</sup>。

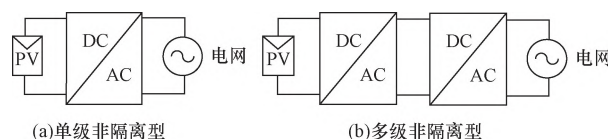


图 3 非隔离型光伏并网发电系统

Fig. 3 Non-isolated grid-connected photovoltaic power generation system

非隔离型光伏并网发电系统中, 光伏组件与公共电网直接相连, 这将会导致电池组与大地之间存在较大的分布电容, 使得更多的直流分量注入电网, 对电网产生影响, 因此需要对漏电流和直流电流采取限制, 确保主电路和控制电路的安全; 另外由于非隔离光伏并网逆变器具有体积小、质量轻、效率高、成本较低等优点, 该结构将会成为未来光伏系统主流逆变装置。

## 2 分布式光伏并网对配电网电能质量的影响及解决措施

光伏发电系统接入配电网后, 特别是从负荷侧接入后, 会改变整个网络的负荷分布。配电网网络结构复杂、抗扰动能力差, 随着大量的分布式光伏接入配电网, 分布式光伏自身的波动性、间歇性和随机性, 会影响配电网的电能质量, 改变配电网原

有电压分布<sup>[3]</sup>,产生电压偏差、电压波动、电压暂降等一系列问题,同时会对电网注入大量谐波,造成三相电流不平衡。

## 2.1 电能质量的评价指标

### 2.1.1 电压偏差

电压偏差指的是网络中某节点实际电压与额定电压的差值百分数,当系统负荷分布被改变时,将会产生电压偏差,表达式为

$$\Delta U = \frac{U - U_N}{U_N} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: $U$ 为实际电压; $U_N$ 为额定电压。

根据国标《电能质量供电电压允许偏差》(GB/T 12325—2008)规定,低压配电网允许的电压偏差范围是额定电压的 $\pm 7\%$ 。

### 2.1.2 电压波动

电压波动是指随着系统的波动,电压出现的规律性变化或者随机快速的变动。其定义为电压均方根线上相邻两极值之差与系统额定电压的比值,表达式为

$$d = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_N} \times 100\% \quad (2)$$

根据国标《电能质量电压波动和闪变》(GB/T 14549—93),当波动频率小于等于1次的时候,低压配电网电压波动允许值在低压侧和高压侧分别是4%和3%。

### 2.1.3 三相不平衡

三相不平衡是指电力系统中三相电压(电流)的幅值不一致并且三相幅值差值超过规定范围,是由于负载不平衡、元件参数不对称所导致。电压的三相不平衡度由电压正、负序分量均方根值之比的百分数所表示,即

$$\varepsilon = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中: $U_1$ 、 $U_2$ 分别为三相电压正、负序分量的均方根值, V。

根据国标《电能质量三相电压不平衡》(GB/T 15543),分布式光伏接入系统正常运行时,接入公共连接点的不平衡度允许值不超过2%,户用允许值不超过1.3%。

### 2.1.4 谐波和间谐波

谐波指的是电压或电流中频率为基波频率整数倍的分量,间谐波指的是频率为基波频率非整数倍的分量,工业中常用的炼钢电弧炉、电焊机、感应电动机等非线性负荷都是谐波源。谐波电压含量、总畸变率以及谐波电压含有率表达式为

$$U_H = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2} \quad (4)$$

$$\text{THD}_U = \frac{U_H}{U_1} \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{HRU}_h = \frac{U_h}{U_1} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $U_h$ 指第 $h$ 次谐波电压; $U_H$ 为谐波电压含量; $\text{THD}_U$ 为电压谐波总畸变率; $\text{HRU}_h$ 为谐波电压的含有率。同理也可以相应表示谐波电流含量、总畸变率以及谐波电流含有率。

根据国标《电能质量公共电网谐波》(GB/T 14549),分布式光伏并网后,10 kV 馈线公共连接点的谐波总畸变率允许值不超过4%。

## 2.2 分布式光伏并网电压问题及治理措施

### 2.2.1 分布式光伏并网电压问题

传统的低压配电网常为辐射状的拓扑结构,电能从配电网首端向用户末端单向流动,电压分布表现为沿着线路依次降低。图4所示为一典型分布式光伏并网后的配网等效图。由于低压线路的阻抗比较高<sup>[4]</sup>,线路受无功、有功影响较大,当大量的分布式光伏接入以后,会改变潮流方向,产生的一系列电压问题可归纳如下。

(1)改变配电网电压分布。即分布式光伏接入以后会使节点电压升高,且当接入光伏容量较小时,电压分布不改变,当接入光伏容量增大时,线路电压分布呈现出先降低再上升的趋势,当接入光伏容量继续增大时,各节点电压会超过首端电压,电压分布呈现为先升高再降低的趋势,此时并网点电压为线路电压最高点,并会导致电压越限。

(2)导致配电网电压波动。文献[5]通过建立分布式光伏并网的等效电路,分析电压波动的机理,指出产生电压波动的主要原因是由于分布式光伏输出功率的波动以及光伏电源接入点短路容量大小。而分布式光伏发电的输出功率主要取决于辐照度,当天气产生剧烈变化的时候,光伏发电输出功率发生波动,配网电压会产生明显的电压波动。

目前,针对分布式光伏并网对配电网产生的电压影响已经有大量文献对其进行研究。对于定性分

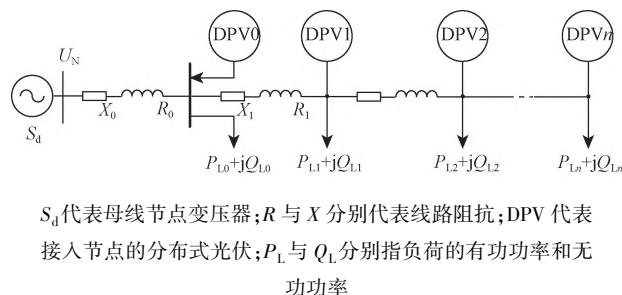


图4 含有分布式光伏接入配电网等效图

Fig. 4 Contain distributed PV access to distribution grid equivalent diagram



析,文献[6]针对单个光伏接入配电网的类型,研究光伏电源不同位置、不同出力情况对电压分布的影响,并得到不引起电压越限情况下可接入最大光伏容量的公式。文献[7]在此基础上,以 380 V 配电网的线路为例,考虑单个和多个光伏接入,对配电网电压变化机理进行分析,得出不同位置、不同出力大小,不同线路参数对电压的影响,得出由分布式光伏接入导致的电压偏差、电压越限的解决方案。对于定量分析,文献[8-9]基于 MATLAB 仿真平台,搭建分布式光伏并网的仿真模型,通过改变分布式光伏不同位置、不同容量,定量地分析了分布式光伏并网对配电网的影响,结果表明,当光伏电源只接入单一节点时,仅对该馈线电能质量产生影响,对于馈线几乎不产生影响,且光伏电源距离线路末端越近时或容量越大时,对配网电能质量影响越大。文献[10]主要从电压闪变的角度分析了分布式光伏接入对配电网电压的影响,对引起电压闪变的主要因素进行归纳总结,得出通过改变分布式光伏的启停次数可以有效地改善电压闪变。以上研究未讨论过分布式光伏接入对配网电压暂降的影响,文献[11]考虑电压暂降的幅值,分析分布式光伏容量对配网电压暂降凹陷域影响,而文献[12]在其基础之上综合电压幅值、持续时间和相位跳变三个方面进行分析,得出适当增加光伏并网容量可以减小凹陷域的范围。文献[13]通过研究电压暂降的自身物理特性,并且以可靠性、经济性以及范围性三个方便建立综合评价指标,通过某产业园的实例数据表明该模型具有较高的准确性,能够反映电压暂降的综合治理效果,对电压暂降的治理有一定的指导意义。

## 2.2.2 分布式光伏并网电压问题及治理措施

对配电网电压控制是解决分布式光伏并网所导致一系列电压问题的有效措施之一。电压控制的方法主要包括有功控制、无功控制和多目标协调控制。传统的电压控制手段又包括集中控制和就地控制。为解决分布式光伏并网带来的一系列电压问题,国内外学者对此也进行了广泛的研究。

传统的电压有功控制策略<sup>[14-15]</sup>,主要是利用最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)的方式进行控制如图 5 所示,光伏系统开始时 MPPT 模式运行,当过电压出现时可以按照有功功率曲线去削减有功,直到并网点电压恢复至正常水平。

利用光伏并网的逆变器进行无功控制也是常用的一种手段,包括恒无功功率控制、功率因数控制等方案。就地自适应控制,可以有效解决系统无功耗尽时,依旧存在电压越限的问题。文献[16]对

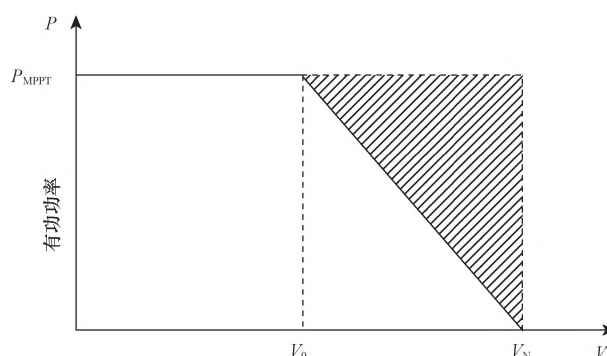


图 5 典型有功功率削减曲线

Fig. 5 Typical curve of active power curtailment

分布式光伏的本地电压控制进行研究,通过建立两自由度的动态控制模型,使分布式光伏获得不间断运行的特性。无功功率控制的优势在于可以充分地利用分布式光伏自身无功输出的能力,并且该方法属于就地控制,不依赖通信设备,但是由于大量无功电流流过线路,会导致网络中的损耗增加,并且当光伏处于额定有功功率发电时,无功输出会受到限制。削减有功的方式对电压越限进行治理,虽然不会造成过多的网络损耗,但是有功的降低会影响光伏发电所带来的收益。光伏可调的最大无功容量与逆变器之间的关系式<sup>[17]</sup>为

$$Q_{pv} = \pm \sqrt{S_{pv}^2 - P_{pv}^2} \quad (7)$$

式(7)中: $Q_{pv}$ 为光伏逆变器的最大无功输出量; $S_{pv}$ 为光伏逆变器的额定容量; $P_{pv}$ 为光伏的有功功率。从式(7)可以得出光伏逆变器的无功调节量与有功功率互相影响。针对以上问题文献[18]在无功容量用尽后通过缩减有功,将并网点电压恢复到正常水平。文献[19]在此基础上,结合集中控制和分布式控制相,提出一种新的分布式控制策略,即当线路电压正常时,采取就地预防的控制策略,通过无功补偿防止电压越限,当电压发生越限时,电压控制器进入紧急控制模式,先对电压进行无功协调,再进行有功缩减,最后当电压越限解决后,采取功率恢复的控制策略,将有功和无功恢复到就地控制参考值,并对 IEEE33 节点进行算例分析,证明所提策略可以一定程度上的消除分布式光伏接入所产生的电压越限的问题。上述研究,基本采用集中式和就地控制的方法对电压采取控制,但随着分布式光伏渗透率提高、分散性增强,上述方法将不再适用。文献[20]将集中式控制和就地控制的特点相结合,采取一种分布式控制的方法,提升配电网在复杂拓扑变化下的适应能力,文献[21]在其基础之上提出一种基于综合灵敏度的电网分区方法,通过节点电压灵敏度矩阵以及节点电气距离灵敏度矩

阵对负荷节点和发电机节点进行分区与归并,该方法更能够反映负荷功率与电压之间的耦合关系,优化所需识别的节点个数。

除了通过电压控制的方法,通过在节点配置储能装置以及对光储合理规划也能够有效对电压越限、波动问题进行治理。将在第4节分布式光伏并网配电网规划的影响中进行介绍。

### 2.3 分布式光伏并网谐波问题及治理措施

#### 2.3.1 分布式光伏并网谐波问题

分布式光伏并网系统中含有大量的电力电子设备,由于光伏系统渗透率不断提高以及光伏功率不稳定的特点,会使电网与谐波之间交互过程变得复杂,提升系统控制的难度<sup>[22]</sup>,分布式光伏并网对谐波的影响主要可以归纳如下。

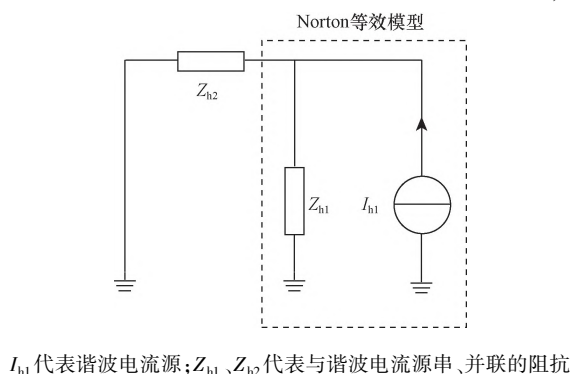
(1)接入位置不变时,接入的容量越大,配电网的谐波畸变水平就越高;接入容量不变时,接入位置越靠近线路末端,配电网的谐波畸变水平就越高,最大谐波电压畸变点位于线路末端节点。

(2)海量的分布式光伏接入后,会在电网站点中产生谐波叠加的效应。

#### 2.3.2 分布式光伏并网谐波治理

谐波源建模是分析新能源谐波问题的重要手段,目前谐波源的建模方式可以分为传统机理建模以及数据黑箱建模两种方式。传统的机理模型是根据谐波源的内在电路特性,考虑谐波电压和电流指点的电路耦合关系,对谐波源进行分析,典型的谐波源机理模型包括恒流源模型<sup>[23]</sup>、和 Norton 等效模型<sup>[24]</sup>、交叉频域导纳矩阵模型<sup>[25]</sup>。图6所示<sup>[24]</sup>为诺顿等效模型,其原理在于将谐波源等效为谐波电流源与阻抗的并联,能够很好地反映同次谐波电压与电流之间的关系,适用于电压变化敏感的谐波负荷建模,而交叉频域导纳矩阵模型考虑了不同次谐波电压与电流之间的关系,更加适用于基频恒定电压供电的稳态负荷建模。

光伏电源由于其波动性和不稳定性特点,传



$I_{h1}$ 代表谐波电流源; $Z_{h1}$ 、 $Z_{h2}$ 代表与谐波电流源串、并联的阻抗

图6 Norton 等效模型<sup>[24]</sup>

Fig. 6 Norton equivalent model<sup>[24]</sup>

统机理模型不能良好的表征其谐波产生的机理。随着大量在线检测平台技术的发展,可利用大量的离线、在线数据进行黑箱参数辨识,这种建模方式被称为数据黑箱建模,典型的黑箱模型有,基于神经网络的谐波源模型<sup>[26-27]</sup>、基于支持向量机的谐波源模型<sup>[28]</sup>、基于最小二乘法的谐波源模型<sup>[29-30]</sup>。针对分布式光伏接入配电网带来的谐波问题,文献[31]通过对光伏电站中谐波才产生的原理进行研究,研究多种工况下的谐波电流,建立大型电站动态谐波模型,得出谐波电流运行的规律,但该模型并未考虑功率波动所带来的影响。文献[32]在此基础上考虑光伏的随机性和波动性,结合谐波产生的机理,分析光伏功率与逆变器幅值的关系,最后得出计算谐波电流的表达式,并采用电磁暂态仿真软件PSCAD(power systems computer aided design)进行验证。

抑制谐波的方法主要有安装滤波器以及改变系统网络参数。由于分布式光伏系统或大型光伏源电站都是长距离的并网运行,因此一般使用电感-电容-电感(LCL)型滤波器,而LCL滤波器会导致并网系统的谐振<sup>[33]</sup>,降低系统的稳定性。为了解决以上问题,文献[34-35]通过在电网电流反馈环中加入有源阻尼,选取合适的阻尼系数,降低系统的谐波振荡。上述研究均未考虑到背景谐波的因素,文献[36]通过在线路末端安装有源滤波器,并与线路特征阻抗匹配,改善谐波放大的问题,但此方法无法解决谐波振荡。以上研究中未考虑长输电线路使并网点电压升高的问题,文献[37]针对上述问题,建立长输电线路集总参数模型,采取一种并网点处将有源阻尼器和无源网络相结合的方法,抑制谐波放大和系统振荡的问题,并通过仿真验证方案的正确性。

改变网络参数抑制谐波的方式主要是通过在线路两端并联可控电抗器,传统的可控电抗器的成本较高,响应速度较慢,谐波抑制效果较差。文献[38]针对单绕组式可控电抗器,通过分析滤波器谐波抑制效果与绕组布置之间的关系,得出当谐波抑制绕组位于控制绕组和工作绕组之间时,抑制效果最好。文献[39-40]提出一种双级和多级饱和的磁饱和结构的磁阀式可控电抗器,优化谐波抑制效果,将谐波电流抑制在输出电流的2.6%。但是当光伏出力出现剧烈变化时,采取并联电抗器的手段会更容易导致电压波动。混合有源滤波器,在特定的控制下等效于一个谐波阻抗,能在不产生电压波动的情况下,有效抑制谐波,通过此法来抑制谐波对目前谐波治理有一定参考价值。

综上所述,针对光伏并网谐波的治理方案,应当秉承“谁污染,谁治理”的原则,即在光伏场站安



装(升级)合适的滤波器来降低谐波。目前现有的滤波装置主要是针对低次谐波进行优化,高次谐波滤波器的研制也是当下所需要解决的问题。

### 3 分布式光伏并网对配电网保护的影响

对配电网采取检测、保护等措施,可以使得配电网更加智能化还能确保配电网安全稳定运行。随着分布式光伏电源的接入渗透率不断提高,配电网结构以及配电网短路电流方向发生改变,导致配电网继电保护准确性降低以及产生孤岛效应,严重危害了配电网的安全运行,本节对分布式光伏接入对配电网的继电保护、孤岛效应问题进行分析并总结解决措施。

#### 3.1 继电保护问题及治理措施

相对于高压大系统保护,配电网的继电保护属于一种简单保护,包括电流保护、反时限电流保护、变压器零序保护等。图7所示<sup>[41]</sup>的是典型的含分布式光伏电源的配电网模型,传统的继电保护方案主要有以下两种。

(1)传统三段式电流保护。传统三段式电流保护包括瞬时电流速断保护、限时电流速断保护和定时限过电流保护。瞬时电流速断保护能够快速动作切除故障但是无法保护全部线路;限时电流速断保护与定时限过电流保护通过与相邻线路配合整定,能够保护线路全长。

(2)反时限的过电流保护。反时限过电流保护动作时限与被保护线路中的短路电流相关。即当短路电流越大,动作时限越短,是配电网中广泛使用的一种继电保护方案。

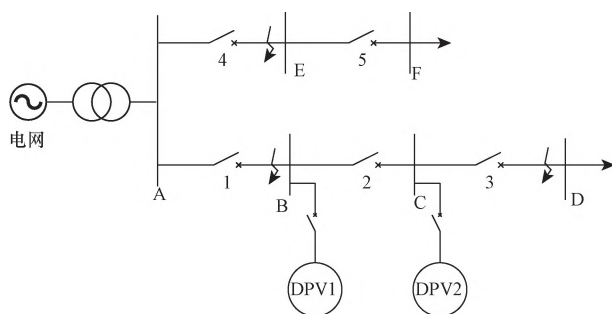


图7 含有分布式光伏接入配电网模型<sup>[41]</sup>

Fig. 7 Model with distributed PV access to the distribution network<sup>[41]</sup>

##### 3.1.1 分布式光伏接入对三段式电流保护的影响

三段式电流保护作为典型的继电保护方案,文献[42-44]全面分析了对分布式光伏接入对配电网造成的影响。通过以上分析,配电系统中并入分布

式光伏对三段式电流保护的影响主要表现为如下。

(1)分布式光伏接入会使得非故障线路误动作,使继电保护失去选择性,从而扩大事故范围。

(2)分布式光伏的接入,会降低本条线路保护的灵敏度。

(3)分布式光伏接入的容量和位置会影响三段式电流保护。当接入容量不变时,分布式光伏接入线路末端对电流保护的影响较小,当容量增大时,需要提前考虑极端状态下的电流保护值和灵敏度,同时为电流保护增加方向元件<sup>[45]</sup>。

##### 3.1.2 分布式光伏接入对反时限过电流保护的影响

对于反时限过电流保护,分布式光伏接入配电网带来的影响主要有以下两点。

(1)与三段式电流保护相同,分布式光伏的接入,同样会导致线路保护误动,扩大事故影响范围。

(2)分布式光伏接入会增加继电保护动作时限,降低故障的切除速度。

(3)分布式光伏接入线路末端对电流保护的影响较小,当容量增大时,也需要提前考虑线路极端状态下的电流保护值和灵敏度,增加方向元件。

##### 3.1.3 分布式光伏接入对自动重合闸的影响

采用自动重合闸装置不仅可以使系统供电快速恢复,提升系统供电的可靠性,还能对断路器的误动作进行纠正,因此自动重合闸在配网保护中得到广泛使用。分布式光伏接入配电网之后,当线路发生瞬时故障时,可能会出现自动重合闸装置与孤岛保护装置配合不当的情况,带来以下方面影响<sup>[39,46-48]</sup>。

(1)造成重合闸失败。由于分布式光伏的接入能够为故障点持续提供短路电流,导致电弧无法正常熄灭,最终使自动重合闸失败。

(2)导致非同期合闸。由于分布式光伏接入而形成的电力孤岛无法与配电网两者完全同步,即孤岛与电网之间存在相角差,这就会导致自动重合闸装置动作,出现非同期合闸。此时重合闸装置会失去快速恢复故障的能力,短路电路将会对配电网和光伏系统产生较大冲击,造成系统设备损坏。

(3)增大自动重合闸时间。为防止出现非同期合闸等安全隐患,在自动重合闸装置启动之前,需将光伏系统从故障线路中切除,这将使自动重合闸的时间延长,影响系统供电的快速恢复。

##### 3.1.4 分布式光伏并网继电保护问题解决方法

为解决分布式光伏并网所带来的继电保护问题,文献[49]根据分布式光伏接入配网后的结构和电流变化的特点,提出一种电流型的保护方案,通过将电流幅值进行综合比较的方式,得到一个故障范围区间,并利用电流相位关系对故障进行定位,

从而实现保护目的。文献[50]根据反时限电流保护原理,指出分布式光伏并网后会使得电流保护出现失配的问题,提出并采用一种电压因子修正的方案,提高保护的快速性。文献[51]认为当线路故障发生位置不同时,其故障电流的波形也不相同,通过采取 Hausdorff 距离算法,分析故障电流波形的相似度采取差动保护的方案,对线路进行保护,具有成本低和可靠性高的优点。

文献[52-54]对不同位置、容量光伏电源并网对配电网保护带来的影响进行讨论,并利用仿真平台进行验证,在考虑继电保护影响的条件下,提出提高分布式光伏接入配电网容量的方案。文献[55]从保护光伏系统本体入手,研究光伏电源与系统之间的协调关系,得出光伏并网位置差异以及故障位置不同对配网的影响并给出配电网保护配置方案。文献[56]根据分布式光伏机理模型的基础上,建立配电网保护检测系统,通过对继电保护装置进行检测,提高故障分析的效率,为分布式光伏并网继电保护提供技术支持。

### 3.2 分布式光伏接入引发的孤岛效应

分布式光伏并网导致的孤岛效应[57-58]指的是当电网因突发故障、停电检修或者其他原因供电停止之后,由于并网的分布式光伏发电系统未能及时检测出停电状态并继续给负荷供电,形成一个脱离电网控制的由光伏系统和负载组成的孤岛。图8所示为孤岛效应示意图<sup>[57]</sup>。

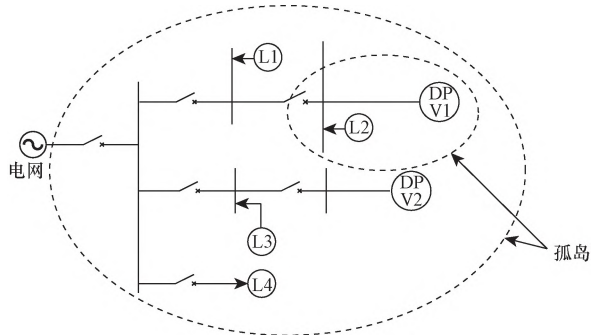


图8 分布式光伏并网导致的孤岛效应示意图<sup>[57]</sup>

Fig. 8 Distributed photovoltaic grid-connection leads to the island effect diagram<sup>[57]</sup>

#### 3.2.1 分布式光伏接入后产生孤岛效应对配电网的影响

当光伏电源再能够满足本地负载所需功率时,与本地负载构成孤岛运行,通过合理规划和响应保护措施,对配电网的供电恢复起到促进作用。但是,由于误操作而导致突发故障、停电等偶然的因素而形成的孤岛效应称为非计划孤岛<sup>[59-61]</sup>,非计划性孤岛产生后会配电网的安全造成严重影响,如

威胁工作人员生命、损坏用电设备、导致自动重合闸失败等。所以研究孤岛效应的检测和治理具有重要意义。

#### 3.2.2 孤岛效应治理措施

通过采取孤岛检测的方法可以在非计划性孤岛发生后,准确快速检测出孤岛并使光伏电源立即断开电网。常见的孤岛检测方法分为以下三类<sup>[62-63]</sup>。

(1) 远程通信检测法。远程通信法的原理是依靠电网与光伏电源之间的远程通信,通过接收到的信号状态来判断是否有孤岛发生。远程通信检测的优点是不会对电能质量产生影响,可靠性高并且无检测盲区,但由于其设备成本高控制策略复杂,一般仅适用于大型光伏发电系统。常见的远程通信检测法<sup>[64-65]</sup>有电力载波通信法、连锁跳闸法以及基于监控与数据采集法。

(2) 主动检测法。主动检测法又被称作是有源检测法,其原理是通过电网施加一个扰动改变公共连接点电压的幅值、谐波、等参数,从而检测是否有孤岛的发生。主动检测法检测速度快、检测盲区大,但由于扰动的引入,会使配电网的电能质量产生损害。常见的主动检测法包括主动移频法<sup>[66-68]</sup>、Sandia 频率偏移法<sup>[69-70]</sup>、滑膜频率偏移法<sup>[71-72]</sup>、功率扰动法等<sup>[73]</sup>。

(3) 被动检测法。被动检测法也称无源检测法,是通过对电气量变化进行检测,判断这些电气量是否超过预测安全范围判断是否发生孤岛。其优势在于,被动检测法不需要对系统施加扰动,对系统电能质量不会产生损伤,但其安全阈值难以确定,检测区域较小,尤其当负载功率与逆变器输出功率相差不大时,孤岛检测可能会失败<sup>[74]</sup>。常见的被动检测法包括过欠电压检测法、过欠频率保护法,相角跳变法等。

基于以上方法,文献[75]基于主动检测法,为弥补主动检测法无功扰动会使电能质量的下降,提出一种改进无功控制的检测算法,可以有效降低功率损耗。针对滑膜频率检测法存在检测速度慢,检测区间小的问题,文献[76-77]提出改进的滑膜频率偏移检测法,使逆变系统具有更好的检测性能。针对孤岛检测判据单一的问题,文献[78]采用基于MPPT的控制策略对公共连接点施加一个梯形扰动,将多个冗余盘踞结合,提升孤岛检测的准确性。以上研究主要都是针对单个孤岛进行检测,当面对多个逆变器并网检测时,传统的主动检测法无法及时检测孤岛,文献[79]提出一种基于零序电压的多孤岛检测方法,文献[80]基于被动检测法提出一种



考虑电压、频率、相位差等的多决策树模型能够有效提升多光伏电源的孤岛检测准确度。混合检测法是将被动检测和主动检测相结合的检测方法,可以有效解决被动检测的检测盲区以及主动检测对电能质量的污染。文献[81]采取混合检测的方式,将频率偏移法和频率变化法(rate of change of frequency, ROCOF)相结合,良好的应对了多分布式电源并网导致的功率不平衡等问题,克服了被动检测速度慢和主动检测对电能质量污染的缺点。

## 4 分布式光伏并网对配电网规划的影响

配电网规划是根据配电网当前状态,为满足未来负荷增长和电网发展的需求,确定对配电网空间内负荷的最佳建设方案<sup>[82]</sup>。通过对配电网进行合理的规划,不仅能够保证网络的电能质量还可以为配电网建设节省大量费用。分布式光伏并网后会对配电网的规划设计带来以下影响。

### 4.1 分布式光伏接入配电网负荷预测的影响

随着屋顶光伏、户用光伏的大力推动,越来越多的分布式光伏接入配电网,由于用户的分散性以及光伏发电自身的波动性、不确定性会提升配电网负荷预测的难度<sup>[83]</sup>,影响后续的配网规划。

### 4.2 分布式光伏对规划期经济性分析的影响

(1)分布式光伏发电系统会影响系统网络损耗;随着光伏渗透率的提高,当分布式光伏电源超过两倍的系统负荷容量时,会提升体统的网络损耗。而网损的大小会影响配电网的建设等相关方面,最终对电网的效益产生影响。

(2)分布式光伏接入会降低系统设备利用率:由于光伏电源的间歇性,在光伏电源停止发电的时,这些需要继续投用的配电网设备,在白天反而变成了光伏的备用设备,这将导致发电设备的利用率降低,使运营商收益减少。

### 4.3 分布式光伏对配电网规划的其他影响

(1)提升配网规划不确定性。由于光伏接入位置、容量的随机性,使其无法为规划区域稳定供电,导致规划中变电站的选址定容、分解开关调压区间以及无功补偿、继电保护设备的规划配置等都变得更加复杂。

(2)增大配电网适应性需求。分布式光伏发电系统的接入会导致潮流反向的问题,这将要求配电网规划设计需要较强的适应性,并且光伏电源的容量和位置的不同会影响配电网的网损,降低系统的可靠性等。

(3)增大配电网规划设计难度。配电网规划是

一个动态规划问题,随着光伏渗透率的上升,大量的光伏并网后会增加考虑分布式光伏接入的优化目标,这使得配电网规划的难度大大提升。

### 4.4 需要解决的问题及解决措施

分布式光伏发电系统接入配电网在实际配电网规划中存在以下两个问题。

(1)考虑分布式光伏并网前后对配电网规划造成的影响,对配电网规划期负荷发展提出需求。

(2)考虑光伏渗透率上升对配网的影响,提出新的配电网规划方案。

第一个问题的难点在于分布式光伏的接入会增大配电网负荷预测的难度,使得配电网规划困难。针对该问题需要对含光伏电源进行负荷预测,负荷预测的方法<sup>[84-85]</sup>有经典法、传统预测法以及人能智能预测方法。文献[86-87]采取机器学习的方法,通过对光伏自身特征因数以及出力之前的映射关系建立负荷预测模型,单此类方法一般面向的是确定性的预测,对极端突变天气无法做到准确的预测。另一类方法通过概率分析<sup>[88-90]</sup>的方式对下一时刻的光伏进行预测。概率性分析法的预测效果取决于人为选择的核函数,文献[91]提出一种推断深度过程的方法,建立分布式光伏负荷预测模型,并采用澳洲电网提供的300户净负荷数据进行对比试验,证明该方案的有效性,为解决配电网规划中负荷预测难的问题提供理论基础。以上方法并未考虑基于概率分析输出稳定性的问题。文献[92]通过使用多个神经网络作为子专家模型,构建挂起规则,通过对多个子专家模型进行整合输出,确保预测系统的精度和输出稳定性。

第二个问题是配电网规划的主体工作。其难点在于需要提出一个考虑多方因素最优的综合方案包括考虑光伏电源接入的位置、容量、安装难易程度、太阳能资源的潜力、政府能源补贴策略、以及经济环保等因素。目前含分布式光伏接入配电网规划方案的研究主要包括分布式光伏的定容选址研究针对分布式光伏的选址定容,文献[93-97]分别以网损最小<sup>[93,98]</sup>、投资建设费用最小<sup>[95-96]</sup>、停电损失最小<sup>[97]</sup>为目标建立规划模型,对分布式光伏进行选址定容进行分析,然而以上规划过于单一片面,实际实施中缺乏灵活性。文献[99]首先通过分析分布式光伏接入对配网电能质量的影响,建立考虑电能质量约束和投资成本最低、网络损耗最小的多目标优化模型,并采取多种群遗传算法进行求解,得到配电网规划优化方案。为了提升选址效率以及治理光伏渗透率上升对配电网的影响,文献[100]提出了一种基于电压灵敏度的储能预选址方



案,提前筛选出相对薄弱的节点,其仿真结果表明,通过该预选址方案,能够使电压波动处于一个安全范围,减少了电压越限的概率。提前以上文献以不同角度对分布式光伏接入配网的选址定容问题进行分析,能够有效缓解分布式光伏接入配网后带来的不利影响,但是随着光伏渗透率的升高,配网中部分节点特性将会由负荷转为电源,配电网的供电模式也会转变<sup>[101]</sup>,因此在配网规划布局阶段还需考虑运行控制的可行性。文献[102-103]提出一种集群划分的方法,如图9所示<sup>[103]</sup>,通过对配网中的节点和网架结构进行集群划分,建立双层的选址定容规划模型,并以某地区10 kV配电网为例验证分层的划分方法能提高配网运行的经济性以及自治能力。

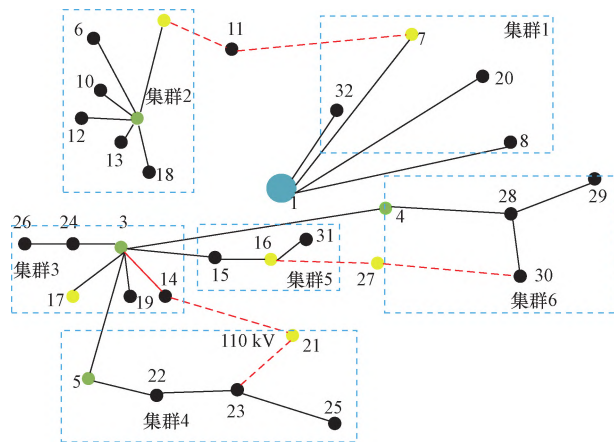


图9 配电网集群划分示意图

Fig. 9 Distribution network clustering diagram

## 5 结论

光伏发电作为新能源的一种重要形式有着良好的发展前景。但光伏并网发电会对配电网电能质量、配电网安全保护以及配电网规划等方面带来影响。本文中围绕含分布式光伏接入配电网,首先对分布式光伏接入配电网的拓扑模型进行分类,介绍隔离型和非隔离型分布式光伏的拓扑结构及其原理,同时针对分布式光伏接入配电网后一系列问题的解决措施进行分析。最后,对解决光伏接入配电网的系列问题的新技术进行了展望,以期能为该领域研究提供一些参考。

(1) 分布式光伏接入配电网会使配电网的电压产生波动、改变配网的电压分布以及对配网节点电压起到一定的抬升作用引起电压越限。目前解决分布式光伏带来的电压越限的主要途径包括安装储能装置对光储进行协调控制以及采取电压控制的策略进行电压治理。其中针对分布式储能的配置模型一般以经济性和电压波动率为目标函数,选取的优化目标相对单一,在下一步的研究中可以引

入新的优化目标例如环境参数如碳排放量,也可以研究新型配电技术的应用在电压治理中的作用,如5G通信技术。

(2) 分布式光伏接入会使配电网与谐波之间交互过程变得复杂,提升系统控制的难度,并且不同的分布式光伏容量和位置对谐波水平的影响不同。准确的对谐波源激励建模是分析该问题的基础,由于新能源发电的不确定性以及数据获取困难,建立不确定性的谐波源模型并应用在谐波分析中是当下需要解决的问题。二是,随着新能源的迅猛发展,输电线路分布电容与谐波源的交互问题也需要进行分析。目前,抑制分布式光伏接入而产生的谐波振荡的主要手段包括,安装滤波装置以及并联电抗器两种方法。通过滤波器来抑制谐波仍是主流手段,但是现有滤波器主要优化的是低次谐波,研制高次谐波滤波器正是当下所需解决的问题。

(3) 分布式光伏接入会使配电网继电保护装置产生误动作、影响继电保护的灵敏度,会增大自动重合闸时间、造成非同期合闸等问题。针对含分布式光伏的继电保护问题有两种解决方法。第一类方法是在传统继电保护基础上进行改进,例如安装方向元件来测的线路的电压和电流,此方法可靠性高,但操作较为复杂,经济性弱。第二类方法是利用通信装置在实现配电网中的信息交换,对故障进行定位。得益于现在通信的快速进步,可靠性的提高,利用通信装置来实施自适应保护是目前的主流研究方向。而针对非计划性孤岛带来的孤岛效应问题,混合检测法将两种方式相结合,即消除了检测盲区有可以尽可能地减小电能质量的污染,是目前主要研究方向。

(4) 分布式光伏接入配电网会增大配电网的不确定性,提升对配电网规划的设计难度。目前,针对分布式光伏电源接入的配电网规划,无论是负荷预测还是选址定容问题,主流的思路都是通过确立目标函数、约束条件,建立多目标的优化模型,采用人工智能算法进行求解,获得最优规划方法,随着含分布式光伏的配电系统规划研究的进一步深入,将会出现更多的类型的优化目标,针对此需要多目标体系进行优化以及提升人工智能算法的性能,提升求解的精确度和效率,使得输出的结果更加可靠。

## 参考文献

- [1] 张兴,曹仁贤. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2011.  
Zhang Xing, Cao Renxian. Solar photovoltaic grid-connected power generation and its inverter control [M]. Beijing: China Machine

- Press, 2011.
- [2] Slootweg J G, Kling W L. Impacts of distributed generation on power system transient stability [C] //Power Engineering Society Summer Meeting. New York: IEEE, 2002: 1043465.
- [3] 王志群, 朱守真, 周双喜, 等. 分布式发电对配电网电压分布的影响[J]. 电力系统自动化, 2004(16): 56-60.  
Wang Zhiquan, Zhu Shouzhen, Zhou Shuangxi, et al. Impact of distributed generation on distribution grid voltage distribution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004(16): 56-60.
- [4] Tonkoski R, Lopes L A C, El-Fouly T H M. Coordinated active power curtailment of grid connected PV inverters for overvoltage prevention[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(2): 139-147.
- [5] 陈懿, 刘涤尘, 吴军, 等. 分布式光伏电源对配电网电压波动的影响研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(14): 27-32.  
Chen Yi, Liu Dichen, Wu Jun, et al. Research on influence of distributed photovoltaic generation on voltage fluctuations in distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(14): 27-32.
- [6] Conti S, Raiti S, Tina G, et al. Study of the impact of PV generation on voltage profile in LV distribution networks [C]//Power Tech, IEEE Porto. New York: IEEE, 2001: 10. 1109.
- [7] 陈良耳, 王恩荣, 王琦, 等. 分布式光伏系统并网对配电网电压的影响及电压越限治理方案[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2017, 17(3): 15-21.  
Chen Lianger, Wang Enrong, Wang Qi, et al. Influence of distributed PV systems on voltage in distribution network and countermeasure of voltage beyond limits[J]. Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology Edition), 2017, 17(3): 15-21.
- [8] 韩智海. 分布式光伏并网发电系统接入配电网电能质量分析[D]. 济南: 山东大学, 2014.  
Han Zhihai. The power quality analysis of distribution network with photovoltaic generation[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [9] 韩富佳, 王淳. 基于 MATLAB 的分布式光伏并网发电系统对配电网电能质量的影响[J]. 电测与仪表, 2015, 52(14): 16-21.  
Han Fujia, Wang Chun. Influences of the distributed photovoltaic grid-connected generation system on the distribution network power quality based on MATLAB[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(14): 16-21.
- [10] Tran K, Vaziri M. Effects of dispersed generation (DG) on distribution systems[C]//Power Engineering Society General Meeting. New York: IEEE, 2005: 1109.
- [11] Cho K Y, Kwon Y I, Youn J R, et al. Interaction analysis between binder and particles in multiphase slurries[J]. Analyst, 2013, 138(7): 2044-2050.
- [12] 傅质馨, 王婧佳, 朱俊澎, 等. 分布式光伏接入对配电网凹陷域预估结果影响[J]. 电源技术, 2020, 44(10): 1518-1521.  
Fu Zhixin, Wang Jingjia, Zhu Junpeng, et al. Impact of distributed photovoltaic access on forecast results of sag regions in distribution networks[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(10): 1518-1521.
- [13] 丁凯, 李伟, 谢佳妮, 等. 电压暂降治理效果评价指标体系及综合评价模型[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(25): 197-203.  
Ding Kai, Li Wei, Xie Jiani, et al. Voltage sag governance effect evaluation index system and comprehensive evaluation model[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(25): 197-203.
- [14] Tonkoski R, Lopes L. Voltage regulation in radial distribution feeders with high penetration of photovoltaic[C]// Energy 2030 Conference. New York: IEEE, 2008: 206-212.
- [15] Yap W K, Havas L, Overend E, et al. Neural network-based active power curtailment for overvoltage prevention in low voltage feeders[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(4): 1063-1070.
- [16] Kim J, Lee J, Nam K. Inverter-based local AC bus voltage control utilizing two DOF control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(3): 1288-1298.
- [17] Jahangiri P, Aliprantis D C. Distributed Volt/VAr control by PV inverters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3429-3439.
- [18] 方景辉, 温镇. 分布式光伏就地自适应电压控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 49-55.  
Fang Jinghui, Wen Zhen. Research on local adaptive voltage control strategy based on distributed PV[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 49-55.
- [19] 魏昊煜, 刘健, 高慧. 分布式电源的本地电压控制策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 40-45.  
Wei Haokun, Liu Jian, Gao Hui. Local voltage control strategies for distributed power supplies[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 40-45.
- [20] 柴园园, 郭力, 王成山, 等. 含高渗透率光伏的配电网分布式电压控制[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 738-746.  
Cai Yuanyuan, Guo Li, Wang Chenshan, et al. Distributed voltage control in distribution networks with high penetration of PV[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 738-746.
- [21] 李英量, 王康, 高兆迪, 等. 基于综合灵敏度的两阶段电压控制分区方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(6): 2284-2290.  
Li Yingliang, Wang Kang, Gao Zhao Di, et al. Two-stage voltage control partition method based on comprehensive sensitivity[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(6): 2284-2290.
- [22] 潘玲, 潘爱强, 熊敏, 等. 基于相关向量机的光伏系统谐波发射水平评估方法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(18): 7303-7307.  
Pan Ling, Pan Aiqiang, Xiong Min, et al. Harmonic emission level evaluation method of photovoltaic system based on relevant vector machine[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(18): 7303-7307.
- [23] Bonner A, Grebe T, Gunther E, et al. Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks Part I: concepts, models, and simulation techniques[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(1): 452-460.
- [24] Thunberg E, Soder L. A Norton approach to distribution network modeling for harmonic studies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(1): 272-277.
- [25] Fauri M. Harmonic modelling of non-linear load by means of crossed frequency admittance matrix[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(4): 1632-1638.
- [26] Chang G W, Shih M F, Chen Y Y, et al. A hybrid wavelet transform and neural-network-based approach for modelling dynamic voltage-current characteristics of electric arc furnace[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 815-824.
- [27] Chen C I, Chen Y C. A neural-network-based data-driven nonlinear

- model on time-and frequency-domain voltage-current characterization for power-quality study[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1577-1584.
- [28] 郑连清, 吴萍, 刘小龙. 基于遗传算法的 LS-SVM 在谐波源建模中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 52-56. Zheng Lianqing, Wu Ping, Liu Xiaolong. Application of least squares support vector machine to harmonic sources modeling based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 52-56.
- [29] 赵勇, 张涛, 李建华, 等. 一种新的谐波源简化模型[J]. 中国电机工程学报, 2002(4): 47-52. Zhao Yong, Zhang Tao, Li Jianhua, et al. A new simplified harmonic source model for harmonic analysis and mitigation[J]. Proceedings of the CSEE, 2002(4): 47-52.
- [30] 李湘, 陈民铎, 郑永伟, 等. 基于稳健偏最小二乘法的谐波发射水平估计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(6): 86-90. Li Xiang, Chen Minyou, Zhen Yongwei, et al. Assessing harmonic emission level based on robust partial least squares regression[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(6): 86-90.
- [31] 谢宁, 罗安, 马伏军, 等. 大型光伏电站与电网谐波交互影响[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 9-16. Xie Ning, Luo An, Ma Fujun, et al. Harmonic interaction between large-scale photovoltaic power stations and grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 9-16.
- [32] 陈少伟, 林坤杰, 陈碧琳. 分布式光伏发电系统的谐波源机理模型[J]. 浙江电力, 2022, 41(8): 57-64. Chen Shaowei, Lin Kunjie, Chen Bilin. Harmonic source mechanism model of distributed photovoltaic power generation system[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(8): 57-64.
- [33] Nishida K, Ahmed T, Nakaoka M. A novel finite-time settling control algorithm designed for grid-connected three-phase inverter with an LCL-type filter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(3): 2005-2020.
- [34] Xu J M, Xie S J, Tang T. Active damping-based control for grid-connected LCL-filtered inverter with injected grid current feedback only[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(9): 4746-4758.
- [35] Wang X, Blaabjerg F, Loh P C. Analysis and design of grid-current-feedback active damping for LCL resonance in grid-connected voltage source converters[C]//Energy Conversion Congress & Exposition. New York: IEEE, 2014: 10. 1109.
- [36] Sun X, Zeng J, Chen Z. Site selection strategy of single-frequency tuned R-APF for background harmonic voltage damping in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 135-143.
- [37] 张劲松, 段文燕, 孙孝峰, 等. 基于长传输线的并网系统谐波谐振抑制策略研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(9): 2561-2570. Zhang Jinsong, Duan Wenyan, Sun Xiaofeng, et al. Suppression of harmonic propagation in grid-connected system based on long transmission line[J]. ACTA Energaie Solaris Sinica, 2019, 40(9): 2561-2570.
- [38] 顾生杰, 任恩恩, 田铭兴. 绕组布置对变压器式可控电抗器谐波抑制的影响[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 2059-2064. Gu Shengjie, Ren En'en, Tian Mingxing. Influence of winding arrangement on harmonic suppression for controllable reactor of transformer type[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(8): 2059-2064.
- [39] 田翠华, 陈柏超. 低谐波双级饱和磁控电抗器研究[J]. 电工技术学报, 2006(1): 19-23. Tian Cuihua, Chen Baichao. Study of low distortion two-stage saturable magnetically controlled reactor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006(1): 19-23.
- [40] 陈绪轩, 田翠华, 陈柏超, 等. 多级饱和磁阀式可控电抗器谐波分析数学模型[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 57-64. Chen Xuxuan, Tian Cuihua, Chen Baichao, et al. Mathematical model for harmonics analysis of the multi-stage saturable magnetic-valve controllable reactor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 57-64.
- [41] 高亮, 郎陈杰, 夏能弘. 分布式电源并网条件下配电网继电保护方案设计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 143-149. Gao Liang, Lang Chenjie, Xia Nenghong. Design of relay protection scheme of distribution network with DG[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 143-149.
- [42] 高研, 毕锐, 杨为, 等. 分布式发电对配电网继电保护的影响[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(4): 20-23. Gao Yan, Bi Rui, Yang Wei, et al. Effect of distributed generation on relay protection in distribution system[J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(4): 20-23.
- [43] 孙鸣, 余娟, 邓博. 分布式发电对配电网线路保护影响的分[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 104-107. Sun Ming, Yu Juan, Deng Bo. Analysis of impact of DGs on line protection of distribution network[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 104-107.
- [44] 井娟丽, 姬森. 光伏电站可靠性模型及其算例分析[J]. 电子测量技术, 2019, 42(23): 106-110. Jing Juanli, Ji Miao. Reliability model of solar power plant based on solar radiation and analysis thereof[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(23): 106-110.
- [45] 张艳霞, 代凤仙. 含分布式电源配电网的馈线保护新方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12): 71-74. Zhang Yanxia, Dai Fengxian. New scheme for feeder protection in distribution networks with distributed power supplies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 71-74.
- [46] 温阳东, 王欣. 分布式发电对配电网继电保护的影响[J]. 继电器, 2008(1): 12-14. Wen Yangdong, Wang Xin. Effect of distributed generation on relay protection in distribution system [J]. Relay, 2008(1): 12-14.
- [47] 庞建业, 夏晓宾, 房牧. 分布式发电对配电网继电保护的影响[J]. 继电器, 2007(11): 5-8. Pang Jianye, Xia Xiaobin, Fang Mu. Effect of distributed generation on relay protection in distribution system [J]. Relay, 2007(11): 5-8.
- [48] 胡雪凯, 张乾, 胡文平, 等. 分布式光伏对线路自动重合闸的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 75-82. Hu Xuekai, Zhang Qian, Hu Wenping, et al. Analysis of the influence of distributed photovoltaic on automatic reclosing [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 75-82.
- [49] 林霞, 陆于平, 王联合. 分布式发电条件下的新型电流保护



- 方案[J]. 电力系统自动化, 2008(20): 50-56.
- Lin Xia, Lu Yuping, Wang Lianhe. A new current protection scheme for distributed generation conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008(20): 50-56.
- [50] Nguyen T T, Phung T A, Truong A V. A novel method based on adaptive cuckoo search for optimal network reconfiguration and distributed generation allocation in distribution network[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2016, 78: 801-815.
- [51] 谢民, 王同文, 徐靖东, 等. 分布式电源对配网继电保护影响及综合改进保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 78-84.
- Xie Min, Wang Tongwen, Xu Jingdong, et al. Effect of distributed generation on relay protection of distribution network and comprehensive improvement of protection scheme[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 78-84.
- [52] 王江海, 邵能灵, 宋凯, 等. 考虑继电保护动作的分布式电源在配电网中的准入容量研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 37-43.
- Wang Jianghai, Tai Nengling, Song Kai, et al. Penetration level permission of for DG in distributed network considering relay protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 37-43.
- [53] 孙苗苗, 王慧, 朱晓荣. 光伏电站接入对配电网电流保护的影响研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(17): 29-34.
- Sun Miaomiao, Wang Hui, Zhu Xiaorong. Research on the impact of photovoltaic power station connection on distribution network current protection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(17): 29-34.
- [54] Yang P, Li X, Ni J F, et al. Fault diagnostic method for photovoltaic grid inverter based on online extreme learning machine[C]// Proceedings of the 2015 Chinese Intelligent Automation Conference. Berlin: Springer, 2015: 495-503.
- [55] 李捷, 华秀娟, 李正红, 等. 基于光伏并网的网源协调保护配合方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(9): 103-110.
- Li Jie, Hua Xiujuan, Li Zhenghong, et al. Research on coordination and protection of network sources based on grid-connection of photovoltaic [J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(9): 103-110.
- [56] 陈争光, 詹荣荣, 李岩军, 等. 分布式电源系统继电保护装置检测技术的研究[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 1115-1120.
- Chen Zhengguang, Zhan Rongrong, Li Yanjun, et al. Research on testing technology of relay protection for distributed power system[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 1115-1120.
- [57] 王乐勤. 分布式电源接入系统孤岛检测与保护研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- Wang Leqin. Research on islanding detection and protection for the distributed generation connected to the grid[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [58] 冯轲, 贺明智, 游小杰, 等. 光伏并网发电系统孤岛检测技术研究[J]. 电气自动化, 2010, 32(2): 39-42.
- Feng Ke, He Mingzhi, You Xiaojie, et al. Research on islanding detection method for photovoltaic grid-connected power system [J]. Electrical Automation, 2010, 32(2): 39-42.
- [59] Yu B, Jung Y, So J, et al. A robust anti-islanding method for grid-connected photovoltaic inverter[C]// IEEE World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. New York: IEEE, 2006: 1011-109.
- [60] 刘方锐, 段善旭, 康勇, 等. 多机光伏并网逆变器的孤岛检测技术[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 167-171.
- Liu Fangrui, Duan Shanxu, Kang Yong, et al. Islanding detection methods for multiple PV converters system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 167-171.
- [61] 张文煜, 李明, 任巍曦, 等. 基于光储控制的微电网改进同步控制及离并网切换策略研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(16): 8-14.
- Zhang Wenyu, Li Ming, Ren Weixi, et al. Research on improved pre-synchronization control and off-grid/on-grid switching strategy of microgrid based on optical storage control[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(16): 8-14.
- [62] 程启明, 王映斐, 程尹曼, 等. 分布式发电并网系统中孤岛检测方法的综述研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 147-154.
- Cheng Qiming, Wang Yingfei, Cheng Yinman, et al. Overview study on islanding detecting methods for distributed generation grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 147-154.
- [63] Al Hosani M, Qu Z, Zeineldin H H. Development of dynamic estimators for islanding detection of inverter-based DG[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1): 428-436.
- [64] Mahat P, Chen Z, Bak-Jensen B. Review of islanding detection methods for distributed generation[C]// Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. New York: IEEE, 2008: 1109.
- [65] 俞侃, 雍静, 梁仕斌, 等. 电力线信号技术的改进分布式发电系统孤岛检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3283-3291.
- Yu Kan, Yong Jing, Liang Shibin, et al. An improved power line signaling technique based anti-islanding protection approach for distributed generation system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3283-3291.
- [66] 陈佳斌, 陈阿莲. 一种改进的主动频率偏移孤岛检测算法[J]. 电源学报, 2017, 15(3): 140-147.
- Chen Jiabin, Chen Alian. An improved active frequency drift method of islanding detection[J]. Journal of Power Supply, 2017, 15(3): 140-147.
- [67] 张学广, 王瑞, 刘鑫龙, 等. 改进的主动频率偏移孤岛检测算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 200-204.
- Zhang Xueguang, Wang Rui, Liu Xinlong, et al. Improved active frequency drift anti-islanding algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 200-204.
- [68] 刘芙蓉, 康勇, 段善旭, 等. 主动移频式孤岛检测方法的参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2008(1): 95-99.
- Liu Furong, Kang Yong, Duan Shanxu, et al. Parameter optimization of active frequency drift islanding detection method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008(1): 95-99.
- [69] 谢东, 张兴, 曹仁贤. 参数自适应SFS算法多逆变器并网孤岛检测技术[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(21): 89-95.
- Xie Dong, Zhang Xing, Cao Renxian. Islanding detection technology for multiple grid-connected inverters based on adaptive parameters SFS algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(21): 89-95.
- [70] Vahedi H, Karrari M. Adaptive fuzzy sandia frequency-shift method

- for islanding protection of inverter-based distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 84-92.
- [71] 刘芙蓉, 康勇, 王辉, 等. 主动移相式孤岛检测的一种改进的算法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 172-176.
- Liu Furong, Kang Yong, Wang Hui, et al. An improved active phase-shift method for islanding detection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 172-176.
- [72] 陈增禄, 孟新新, 王晓俊, 等. 孤岛检测的低频相位扰动新方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 202-207.
- Chen Zenglu, Meng Xinxin, Wang Xiaojun, et al. A novel method of active low-frequency drift for islanding detection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 202-207.
- [73] 张纯江, 郭忠南, 孟慧英, 等. 主动电流扰动法在并网发电系统孤岛检测中的应用[J]. 电工技术学报, 2007(7): 176-180.
- Zhang Chunjiang, Guo Zhongnan, Meng Huiying, et al. Active current disturbing method for islanding detection of grid-connected inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007(7): 176-180.
- [74] Zeineldin H H. Droop curve for facilitating islanding detection of inverter-based distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 665-673.
- [75] 周林, 谢星宇, 郝高峰, 等. 一种新型的无功功率扰动孤岛检测方法[J]. 太阳能学报, 2020, 41(2): 275-283.
- Zhou Lin, Xie Xingyu, Hao Gaofeng, et al. A novel reactive power disturbance islanding detection method[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2020, 41(2): 275-283.
- [76] 邹培源, 黄纯. 基于模糊控制的改进滑模频率偏移孤岛检测方法[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 574-580.
- Zou Peiyuan, Huang Chun. An improved slip mode frequency shift islanding detection method based on fuzzy control[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 574-580.
- [77] 赵丽, 希望·阿不都瓦依提. 基于锁相环的改进型滑模频率偏移孤岛检测法[J]. 计算机仿真, 2022, 39(10): 104-108.
- Zhao Li, Xiwang · Abudwayiti. Improved slip-mode frequency shift islanding detection algorithm based on phase-locked loop[J]. Computer Simulation, 2022, 39(10): 104-108.
- [78] 陈晓龙, 杨志颖, 李永丽, 等. 基于MPPT梯形电压扰动的直流微电网新型孤岛检测方法[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4799-4808.
- Chen Xiaolong, Yang Zhiying, Li Yongli, et al. Novel islanding detection for DC microgrid based on MPPT trapezoidal voltage disturbance[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4799-4808.
- [79] 张军, 张新慧, 彭克, 等. 基于零序电压正反馈控制的多分布式电源孤岛检测方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 3040-3050.
- Zhang Jun, Zhang Xinhui, Peng Ke, et al. Multi-distributed generation island detection method based on zero-sequence voltage positive feedback control[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 3040-3050.
- [80] 杨晓梅, 桑丙玉, 李官军, 等. 基于决策树模型的多机孤岛被扰动式检测方法[J]. 复旦学报(自然科学版), 2020, 59(1): 116-121.
- Yang Xiaomei, Sang Bingyu, Li Guanjuan, et al. Multi-parallel inverter island passive detection method based on decision making tree model[J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2020, 59(1): 116-121.
- [81] Khodaparastan M, Vahedi H, Khazaeli F, et al. A novel hybrid islanding detection method for inverter-based DGs using SFS and ROCOF[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(5): 2162-2170.
- [82] 李楠, 王炜, 马雪, 等. 考虑碳交易成本及区域能源优化的配电网扩展规划研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(8): 3101-3109.
- Li Nan, Wang Wei, Ma Xue, et al. Distribution network expansion planning considering carbon trading cost and regional energy optimization[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(8): 3101-3109.
- [83] 杨健, 孙涛, 陈小龙, 等. 基于VMD-EWT-IASSP-EBILSTM的短期电力负荷预测[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(27): 11646-11654.
- Yang Jian, Sun Tao, Chen Xiaolong, et al. Short-term power load forecasting based on VMD-EWT-IASSP-EBILSTM[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(27): 11646-11654.
- [84] 康重庆, 夏清, 张伯明. 电力系统负荷预测研究综述与发展方向的探讨[J]. 电力系统自动化, 2004(17): 1-11.
- Kang Chongqing, Xia Qing, Zhang Boming. Review of power system load forecasting and its development[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004(17): 1-11.
- [85] 夏博, 杨超, 李冲. 电力系统短期负荷预测方法研究综述[J]. 电力大数据, 2018, 21(7): 22-28.
- Xia Bo, Yang Chao, Li Chong. Review of the short-term load forecasting methods of electric power system[J]. Power Systems and Big Data, 2018, 21(7): 22-28.
- [86] 丁施尹, 谭锡林, 叶萌, 等. 含高比例分布式光伏的母线负荷预测方法[J]. 可再生能源, 2021, 39(1): 117-122.
- Ding Shiyin, Tan Xilin, Ye Meng, et al. Bus load forecasting considering large-scale distributed PV interconnection[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(1): 117-122.
- [87] Hossain M S, Mahmood H. Short-term photovoltaic power forecasting using an LSTM neural network and synthetic weather forecast[J]. IEEE Access, 2020, 8: 172524-172533.
- [88] Peyghami S, Wang Z, Blaabjerg F. A guideline for reliability prediction in power electronic converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(10): 10958-10968.
- [89] 彭虹桥, 顾洁, 胡玉, 等. 基于混沌粒子群-高斯过程回归的饱和负荷概率预测模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 25-32.
- Peng Hongqiao, Gu Jie, Hu Yu, et al. Forecasting model of saturated load base on chaotic particle swarm and optimization-Gaussian process regression[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 25-32.
- [90] Van der Meer D W, Munkhammar J, Widen J. Probabilistic forecasting of solar power, electricity consumption and net load: Investigating the effect of seasons, aggregation and penetration on prediction intervals[J]. Solar Energy, 2018, 171: 397-413.
- [91] 廖启术, 胡维昊, 曹迪, 等. 新能源电力系统中的分布式光伏净负荷预测[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(12): 1520-1531.
- Liao Qishu, Hu Weihao, Cao Di, et al. Distributed photovoltaic net forecasting in new energy power systems[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2021, 55(12): 1520-1531.

- [92] 张翰霆, 陈俊, 陈根永. 基于 SEELM 多专家模型的分布式光伏系统负荷预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 69-75.  
Zhang Hanting, Chen Jun, Chen Genyong. An SEELM-based ensemble method for load forecasting in a distributed photovoltaic systems[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 69-75.
- [93] 白晓清, 赵瞻, 鲍海波. 基于 CLARA 算法的考虑时序特性分布式电源规划[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 14-22.  
Bai Xiaqing, Zhao Zhan, Bao Haibo. DG planning based on CLARA algorithm with consideration of timing characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 14-22.
- [94] 陈琳, 钟金, 倪以信, 等. 联网分布式发电系统规划运行研究[J]. 电力系统自动化, 2007(9): 26-31.  
Chen Lin, Zhong Jin, Ni Yixin, et al. A study on connected distributed generation system planning and its operation performance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007(9): 26-31.
- [95] 付丽伟, 王守相, 张永武, 等. 多类型分布式电源在配电网中的优化配置[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 79-84.  
Fu Liwei, Wang Shouxiang, Zhang Yongwu, et al. Optimal selection and configuration of multi-types of distributed generators in distribution network[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 79-84.
- [96] 王超, 洪潇, 王林炎, 等. 基于分阶段求解的 DG、BESS 和自动重合闸选址定容综合优化[J]. 电测与仪表, 2022, 59(3): 100-107.  
Wang Chao, Hong Xiao, Wang Linyan, et al. Optimal location and size of DG, BESS and automatic reclosers based on staged solution[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(3): 100-107.
- [97] Rotaru F, Chicco G, Grigoras G, et al. Two-stage distributed generation optimal sizing with clustering-based node selection[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 40(1): 120-129.
- [98] 张勇, 吴淳. 分布式发电机在配电网中的优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 33-37.  
Zhang Yong, Wu Chun. Optimal placement of DG unit in distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 33-37.
- [99] 刘科研, 盛万兴, 马晓晨, 等. 基于多种群遗传算法的分布式光伏接入配电网规划研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(6): 146-155.  
Liu Keyan, Sheng Wanxing, Ma Xiaochen, et al. Planning research of distributed photovoltaic source access distribution network based on multi-population genetic algorithm[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(6): 146-155.
- [100] 赵立军, 张秀路, 韩丽维, 等. 基于多场景的配电网分布式光伏及储能规划[J]. 现代电力, 2022, 39(4): 460-468.  
Zhao Lijun, Zhang Xiulu, Han Liwei, et al. Distributed photovoltaic generation and energy storage planning of distribution network based on multi scenarios[J]. Modern Electric Power, 2022, 39(4): 460-468.
- [101] 郑乐, 胡伟, 陆秋瑜, 等. 储能系统用于提高风电接入的规划和运行综合优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2533-2543.  
Zheng Le, Hu Wei, Li Qiuyu, et al. Research on planning and operation model for energy storage system to optimize wind power integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2533-2543.
- [102] 丁明, 方慧, 毕锐, 等. 基于集群划分的配电网分布式光伏与储能选址定容规划[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2187-2201.  
Ding Ming, Fang Hui, Bi Rui, et al. Optimal siting and sizing of distributed PV-storage in distribution network based on cluster partition[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2187-2201.
- [103] 石博, 肖传亮, 彭克, 等. 基于集群划分的配电网-源-储双层联合扩展规划策略[J]. 电力系统自动化, 2022(14): 43-51.  
Shi Bo, Xiao Chuanliang, Peng Ke, et al. Cluster partition based two-layer expansion planning of grid-resource-storage for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022(14): 43-51.