

# 含分布式电源的柔性配电网优化运行研究

潘洁

(桂林信息科技学院, 广西 桂林 541199)

**摘要:** 在电力负荷不断增长与传统化石能源短缺日益严重的背景下, 可再生能源的大规模并网已成为必然, 而分布式电源的随机性与波动性也对配网的稳定运行提出了新的挑战, 对配网的调压能力与灵活性提出了更高的要求。而随着电力电子设备的研发和生产日益成熟, 储能设备、柔性软开关等也逐渐投入运行, 配电网也在适应发展的需求, 逐渐演化为柔性配电网。与常规配网相比, 柔性配网可以实现柔性的运行, 调整能力更强, 响应速度更快, 运行损耗更低。因此, 柔性配电网是一种很有发展潜力的电力系统。但是, 由于配电网中功率器件数量众多, 可控器件种类繁多, 与传统配电网相比, 其模型与分析更加困难, 如何实现其最优运行, 亟待深入研究。本文便据此展开探索, 先对分布式电源的种类以及柔性配电网的演变机理及其特征进行了阐述, 并进一步分析了柔性配电网的优化运行措施, 希望可以予以一定参考。

**关键词:** 分布式电源; 柔性配电网; 优化运行

## 一、分布式电源的种类

分布式能源有很多种类型, 按照其能否参与到配电网的调度中来, 也就是按照受控性, 可以将其分成两种类型, 即可控型和不可控型。一般而言, 在配电网中, 大部分的分布式电源是不可控的, 如光伏、风机等, 它们的输出功率受自然条件及气象等因素的影响, 为了使其产生的功率得到最大程度的发挥, 通常将其看作是可控型分布式电源。而随着电力电子设备在配电系统中的普及, 可控型分布式能源(如小型燃气轮机、燃料电池等)所占比重逐渐增大。尤其是在电动汽车大规模推广应用的背景下, 电动车群充电可有效参与配电网优化运营, 并能够通过调整充电站或充电桩的运营策略, 实现对电力系统净负载的调控。

## 二、柔性配电网的演变机理及其特征

电力电子器件在配电系统中的广泛应用, 为配电系统的转型与升级提供了新的契机。与常规配电网相比, 柔性配电网可以利用电力电子变换器的功率调控功能, 实现对分布式电源的输出控制、对负荷变化的实时响应、对馈线之间的交互影响等。其内部驱动可归结为源网—网—荷耦合演化、网络结构变化和模型分析新要求。具体如下:

### (一) 源—网—荷的演化

配电网结构随源网荷形式的改变而改变, 并表现出显著的差异性。在技术层次上, “源—网—荷”等新要素的融合与发展, 驱动着配电网形态持续演变, 对其运营能力提出了更高的要求, 使得其转型与升级是一种必然趋势。

在供电端, 高渗透率的分布式能源接入使得配电网变得更洁净; 在电网端, 配电网的电力电子化发展趋势使电网的调节能力得到了极大的提高; 在负荷端, 柔性负荷和电动汽车等新型负荷的持续接入使得负荷需求更加复杂, 但也为需求侧的应对提供了条件。源—网—荷结构的演变轨迹, 从物理本质来看, 表现为配电网在更大范围内, 以更强的控制性来协调更多的资源, 从而实现配电网的持续调控。随着电力系统应用的日益多样化, “源网荷”结构的不断演变, 使得柔性配电网的出现成为必然选择。

### (二) 网架结构的变化

近年来, 配电网的发展和变化最为剧烈, 已由辐射式向多终端互联发展, 并向多层、多级和多环发展。多状态复杂网络的发展。我国配电网在发展初期, 主要是以单一辐射式为基础, 以满足社会发展对电力的基本需求。随着人们生活水平的不断提高, 以及对供电可靠性的要求越来越高, 用户侧电能质量与供电可靠性需求的不断提升, 配电网的结构也随之发生了一定的变化, 以适应发展的需要。与此同时, 配电网层次也在进行着深刻的变革,

以建设一个坚强、可靠、智能化的电力系统。在未来几年内, 为适应我国经济发展对配电网的需要, 配电网的绿色、智能化和高质量将会持续发展。

同时, 配电系统的网络结构也发生了很大的变化, 其中, 信息网的网络结构更加坚固。传统的配电网只是一个单向的信息流, 由各数据收集模块向中央控制中心传送数据。随着“云平台”等技术的不断发展, 配电网中的信息流变得更加复杂, 数据交互更加频繁, 使得用户有可能参与到配电网的优化运行和电力交易中去。在此基础上, 利用该广域测试系统, 可以实现对配电网中重要的电力参数的实时检测, 以满足实际工作需要。

### (三) 柔性配电网的特征

与常规配电网相比, 柔性配电网彰显了调节能力更强、响应速度更快、测量精度更高、运行目标层次更高等特点。

柔性配电网的调控能力会在源—网—荷的各环节中体现出来, 按其物理性质可分为初级调控能力、信息调控能力和用户调控能力三个层次。一次调节容量是指在配电网中, 利用各种可调装置, 对负荷进行有效均衡, 并对潮流进行合理分配的能力。信息调控能力是指柔性配电网利用更为准确的预报方法, 提前制定合理的调度策略, 以保障系统运行的安全性与可靠性。三是用户调控能力, 其实质是基于电力交易机制和市场导向下, 引导用户理性地参与配电网的优化运行。

与常规配电网相比, 柔性配电网的响应速度更快, 其根本原因是电力电子器件的快速响应特性。通过改变逆变器的开路角度, 使一部分分布式电源从“不可调度”转换为“可调度”, 再结合传统的配网优化方法, 既能使分布式电源得到最大程度的发挥, 又能提升系统的经济性和安全性, 改善系统的电能质量, 减少系统的阻塞。与此同时, 随着储能装置、柔性软开关等多种快速响应设备的接入, 柔性配电网的调控能力将得到进一步提升。

随着各种负荷预测方法的广泛使用和智能终端的广泛安装, 对电力系统测量数据的准确性提出了更高的要求。广域测试系统能够实现广域配电网的电能质量和电能质量的实时检测, 能够满足柔性配电网对多种类型、大范围、深层次信息的检测和信息采集的实际需要。在此基础上, 通过整合、分析、判断信息, 实现对当前电网运行状况的全面感知和评价。

柔性配电系统的一个重要特点就是其运行指标的不断丰富和完善。在配电网开发与建设之初, 以保障电能的高效供给为其基本运作目的。所以, 保障电力系统的有效供给, 提高电力系统的供电可靠度, 就成为了配电系统调度员的一项重要工作, 并被广泛应用。伴随着配电网形态的变化, 以及各种类型的客户的持续接入, 配电

网的运行目标也在不断地提高，并且运行评价指标也在不断地丰富和发展，主要与电能质量的需求以及运行经济性的需求有关。

### 三、考虑多种可控设备的联合优化策略

#### (一) 优化系统运行状态

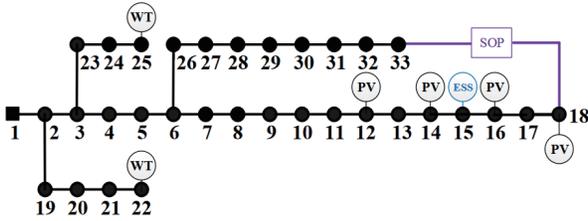


图1 改进的柔性配电网算例

通过构建三个典型的场景，分析可控设备的接入对柔性配电网的运行裕度的影响：

场景 I：不接入任何可控装置；

场景 II：接入储能装置，对功率进行调节，进而提高节点侧调节能力；

场景 III：进一步接入柔性软开关装置，通过对功率的调节，提高网络调节能力。

通过对一日内不同场景下配电网运行裕度指数及网损数据的分析，我们发现：当无控制装置时，高比例的分布式电源接入会加剧电力失衡，电网负荷余量 LPM、节点电压余量 NVM、系统运行裕度 SOM 等指标均会呈现较低水平。通过引入可控制装置，可以有效提高系统的调节能力。随着电力系统调节能力的增强，各柔性配电网的运行裕度也随之增大。当电力系统接入储能装置后，可实现对电能的合理储存与释放，从而提升配电网在不同时段的调峰能力。然而，由于储能系统在每日运行结束后仍需重新调整其荷电状态，其对运行裕度的提高受到限制。在此基础上，通过引入柔性软切换装置，可使各馈线间实现柔性互联，使整个系统的调整性能得到显著提升。整体而言，随着控制装置的逐渐接入，系统的操作余量指数将会提高，并且操作损失有所下降，这体现了配电网运行状态的优化。因而，利用可控装置的接入，可以对配电网的最优运行状态进行优化，降低系统的运行损耗，提高供电电能质量。另外，离变电所最近的线路，其工作状况也是最差的，所以在每一种情况下，其余量都是最小的。同时，因为负载的变化趋势是一致的，所以每个方案的出现时间也是一致的。然而，最大偏离值的节点位置却发生了变化。随着可控制装置的加入，各节点 NVM 指数都将提高，且最恶劣场景发生的节点也会相应变化。这样，经过控制装置的整合，各系统的运行裕度指标都有一定程度的提高，即配电网运行状态得到有效优化。

#### (二) 提高分布式电源消纳量

在柔性配电网中，多个受控装置的并网将有助于提高配电网中分布式电源装机的容量。在柔性配电网实际运行中，需要考虑装机容量不变的情况，因此以已有分布式电源接入的节点为装机容量候选节点，并进一步分析分布式电源装机容量的影响因素。在对分布式电源进行消纳时，应尽可能将有功功率作为优先事项，所以在待接入节点的分布式电源的功率因数上，可以都将其设定为 1.0，最大限度地满足消纳分布式电源的发电量的需要。

通过构建三个典型的场景，分析可控设备的接入对柔性配电网的消纳能力的影响：

场景 IV：不接入任何可控装置；

场景 V：接入储能装置，对功率进行调节，进而提高节点侧调节能力；

场景 VI：进一步接入柔性软开关装置，通过对功率的调节，提高网络调节能力。

表 1 可控设备对柔性配电网消纳能力的影响

场景	分布式电源消纳能力 /kVA	系统运行裕度 /p.u.	系统运行损耗 /kWh
IV	10932.18	{1.1*10 <sup>-7</sup> ,0.046}	17159.14
V	11136.80	{0.01,0.047}	17276.33
VI	11377.65	{1.7*10 <sup>-7</sup> ,0.085}	14615.53

表 2 各节点的消纳能力分析

	分布式电源消纳能力 /kVA		
	场景 IV	场景 V	场景 VI
12	3475.76	3503.78	3037.67
14	226.74	282.77	275.01
16	124.57	169.49	164.28
18	148.83	147.86	1164.06
22	3271.51	3311.71	3192.78
25	3684.78	3721.20	3543.84

研究表明，在可控装置的应用下，随着可控装置的数量增加，柔性配电网的消纳能力也随之增加。同时，从系统的运行裕度指数可知，为了消纳分布式电源的发电量，配电网的调节能力已基本耗竭，表现为线路功率余量和节点电压余量均趋近 0。通过对不接入任何可控设备和接入储能设备后的运行情况进行比较，发现在采用储能装置作为调节方式的条件下，随着分布式电源消纳量的增大，系统的运行损失也会随之提升。通过三种方案的比较，发现智能软开关与储能装置的协同工作，可以有效提高分布式电源的消纳能力，同时大幅降低系统运行的损耗。从每一个待接入节点的消纳量来看，在距离源节点较远的地方，消纳量约大。因此，通过储能装置的接入，可有效地实现运行时间的优化分配，提高配电网的消纳能力。由于柔性软开关连接了分布式电源 18 与分布式电源 33 的馈线，使得分布式电源 18 的电力消纳能力得到了极大的提升，其主要原因是柔性软开关沟通了节点 18 所在的馈线和节点 33 所在的馈线，两条馈线间的合理功率交互有效提高了分布式电源的消纳能力。

#### 四、展望

对于含有分布式能源的柔性配电网，目前仍需要进一步的研究，以改进配电网的运行质量。具体而言，首先，在构建含有分布式能源的灵活配网的优化运行数学模型过程中，可控装置的种类仍可不断充实与发展，而加入动态反应技术、需求侧反应技术等，则可进一步充实有关的数学模型。其次，在灵活配网的最优运行中，如何将分布式能源加入到电力系统的潮流调整中，最大限度地挖掘可用资源的潜能，达到灵活配网中不同时段之间电力功率的动态平衡，是一个值得深入探讨的问题。此外，二次圆锥转换方法可以解决一些基本的最佳运算问题，但是对于大型的、包含整数运算的问题，其运算速度和运算存储空间都比较大，所以对于相应的解法模型，还有待于进一步挖掘。

#### 参考文献：

- [1] 余云雯. 多电源柔性配电网供电恢复策略研究 [D]. 贵州大学, 2022.
- [2] 肖竣文. 含分布式电源的配电网故障恢复策略研究 [D]. 西华大学, 2022.

本文系：基金项目：2022 年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目《基于分布式电源的智能配电网优化运行研究》编号：2022KY1628