

# 主配网调控运行中的分布式电源协调策略

高翔宇 郭宇桐 史殊凡

国网北京大兴供电公司 北京 102600

**摘要:** 随着智能电网技术的深入发展,以及电网、风能、太阳能等分布式能源技术的日益成熟,分布式能源(Distributed Energy Resources, DER)的大规模开放和应用是电网智能和可持续发展的大势所趋。然而DER的大量接入将对配电网电压水平、短路容量、继电保护、供电可靠性以及电能质量等方面造成较大的影响,因此传统“被动”配电网的运行控制方法已难以应对新的发展需求。主动配电网(Active Distribution Network, ADN)和微电网(Microgrid, MG)是当前解决DER接入的两种主要研究方向。本文重点探讨主配网调控运行中的分布式电源协调策略,旨在实现DER的高效利用和配电网的安全稳定运行。

**关键词:** 主动配电网; 分布式电源; 协调控制; 电压调节; 储能系统

## 引言:

低碳背景下,考虑主动配电网(ADN)源-荷-储优化运行策略对ADN的低碳、经济、稳定运行具有重要意义。以光伏发电和风力发电为主的DER大量接入配电网,由于DER出力具有随机性及不确定性,且为了提高配电网的DER消纳能力,因此提出主动配电网的概念。分布式电源接入容易造成电网电压抬升,从而导致电网电压越限的风险。因此研究主动配电网的电压协调控制有助于配电网安全稳定运行,提升系统的电能质量。

## 1. 主动配电网的特点与发展

主动配电网(Active Distribution Network, ADN)是电力系统中的一项重要创新,它集成了对分布式电源(Distributed Generation, DG)、储能系统(Energy Storage System, ESS)、可控负荷(Controllable Load, CL)以及需求侧管理(Demand Side Management, DSM)的综合控制能力。ADN旨在提升配电网接纳可再生能源的能力,同时优化能源的综合利用效率,并确保用户的电能质量不受影响。这一新型配电网模式多应用于公共配电网,以并网运行为主要形式,特别适用于解决大规模间歇式可再生能源接入电网所带来的挑战。

ADN的协调控制架构是其核心所在,该架构通常包括三层结构:配电网调度层、微电网集中控制层以及微电源/储能/负荷等各设备的就地控制层。每一层都承担着特定的角色与责任。

1. 配电网调度层: 作为顶层管理单元,配电网调度层

主要负责微电网内部各类运行参数和设备状态信号的采集、传输与调度工作。它能够采集到的信号数据实时传输至配电网调度中心,实现与整个配电网的信息交换,从而在调度方面实现更加统一、高效的管理。

2. 微电网集中控制层: 位于配电网调度层与就地控制层之间,微电网集中控制层扮演着承上启下的角色。它负责接收来自配电网调度层的指令,并将其转化为具体的控制指令发送给各就地控制层。同时微电网集中控制层还负责监测和评估微电网的运行状态,确保微电网内的电压、频率等关键参数处于稳定状态。

3. 就地控制层: 包括微电源、储能系统和负荷等设备的控制单元。这些控制单元负责执行来自微电网集中控制层的控制指令,实现对各设备的精确控制。通过就地控制层,可以实现对分布式电源的出力调节、储能系统的充放电控制以及可控负荷的功率调整等功能。

ADN的发展不仅提升了配电网的灵活性和可靠性,还为可再生能源的大规模接入提供了有力支持。随着技术的不断进步和政策的持续推动,ADN将在未来电力系统中发挥更加重要的作用。

## 2. 分布式电源对配电网的影响

分布式电源(DG)的接入对配电网产生了深远的影响,这些影响既有积极的一面,也有潜在的风险。

一方面DG的接入能够平衡一部分的用电负荷,从而增强配电网的输电能力。由于节点电压的调整情况不同,DG

的接入还能够通过节点电压的升高来加强配电网的电压调节能力。这种调节能力对于提高电力系统的稳定性和可靠性具有重要意义。

然而另一方面如果 DG 的容量大小、安装环境以及接线方式选择不当，可能会对配电网造成不良影响。例如 DG 的接入可能会导致电力供需失衡，进而引发电压水平波动等问题。这些问题不仅会影响用户的电能质量，还可能对电力系统的安全运行构成威胁。

特别是在配电网发生故障时，DG 的接入也带来了新的挑战。当配电网发生故障时，其所在的微电网可以自动进行孤岛运行，从而体现 DG 进行独立供电的特点。然而为了确保 DG 在孤岛运行期间的安全性和稳定性，需要对其进行一定的隔离和保护措施。同时对于偏远地区供电或保证重要负荷不间断供电而言，DG 的独立供电能力具有重要意义。因此在规划和设计配电网时，需要充分考虑 DG 的接入方式和容量大小等因素，以确保电力系统的安全稳定运行。

### 3. 分布式电源的协调控制策略

在电力系统中，分布式能源 (Distributed Energy Resources, DER) 的高效利用和配电网的安全稳定运行是两个至关重要的目标。为了实现这两个目标，必须制定有效的分布式电源协调控制策略。本文提出了一种创新的源/储/荷协调控制技术，该技术综合考虑了分布式电源 (DG)、储能系统 (ESS) 和可控负荷 (CL) 的多时间尺度互补特性，旨在实现可再生能源的主动消纳和调度。

#### 3.1 储能系统的功率吞吐控制

储能系统 (ESS) 在主动配电网 (ADN) 的稳定运行中扮演着举足轻重的角色。ESS 通过逆变器外环 V/f 控制策略，能够主动、迅速地响应配电网的功率波动，通过释放或吸收电能来平抑这些波动。由于 ESS 的响应速度极快，其时间尺度可达毫秒级，这使得它成为应对配电网功率快速变化的有效工具。然而，ESS 的容量有限，无法长期持续释放电能，因此需与响应速度较慢但能提供长期功率支撑的分布式电源 (DG) 配合使用。

为了确保 ESS 在关键时刻能够提供足够的电能，需要对其进行充电，以提高其电能储存量，从而增强系统的故障应对能力。ESS 可以采用基于 V/f 控制的外环控制器并网，这样它可以在 V/f 和 PQ 两种控制模式下运行。在 PQ 控制模式下，ESS 与 DG 类似，通过设定有功功率和无功功率的

参考值来调节其输出功率。而在 V/f 控制模式下，ESS 能够实时控制并网逆变器的功率输出，从而实现对配电网功率波动的精确调节。

#### 3.2 分布式电源的功率控制

分布式电源 (DG) 在主动配电网 (ADN) 中扮演着至关重要的角色，它通过精确调节逆变器外环 PQ 控制中的有功功率 (P) 和无功功率 (Q) 参考值  $P_{ref}$  和  $Q_{ref}$ ，实现对输出功率的灵活调整，从而为配电网提供持续稳定的功率支撑。PQ 参考值的设定与调整虽然相对较慢，其响应时间尺度通常在秒级范围内，但这一特性使得 DG 在维持电网长期稳定运行方面发挥着不可替代的作用。

为了实现 DG 输出功率的精确控制，DG 并网逆变器采用了基于 PQ 控制的外环控制策略。这一策略的核心在于，通过精确设定 PQ 参考值，直接指导 PQ 控制器输出相应的功率。具体而言，控制策略的典型结构包括两个关键环节：首先通过比较有功功率和无功功率的实测值与参考值，得出误差信号；其次利用 PI 控制器对误差信号进行快速调节，从而实现对 DG 输出功率的精确控制。

在此过程中， $k_{p3}$ 、 $k_{i3}$ 、 $k_{p4}$ 、 $k_{i4}$  作为外环 PI 控制器的关键控制参数，对控制策略的性能具有决定性影响。 $k_{p3}$  和  $k_{p4}$  分别决定了有功功率和无功功率控制的响应速度，而  $k_{i3}$  和  $k_{i4}$  则决定了控制的稳定性。通过精细调整这些参数，可以进一步优化 DG 的功率控制性能，提高其在 ADN 中的适应性和稳定性。

综上所述，DG 的功率控制策略是 ADN 稳定运行的重要保障。通过精确设定 PQ 参考值，采用先进的 PI 控制器，以及精细调整关键控制参数，DG 能够在 ADN 中发挥更大的作用，为电力系统的安全稳定运行提供有力支持。

#### 3.3 可控负荷的减载控制

可控负荷 (CL) 在分布式电源的协调控制策略中也发挥着重要作用。通过利用可控柔性负荷的调节作用，可以最大化地消纳分布式能源的间歇性波动，保证 DG 的就地消纳。同时考虑到负荷的可控性和可控负荷的容量等因素，可以利用多个负荷协调消纳分布式能源。

可控负荷的减载控制策略通过调整负荷的功率需求来进一步平衡配电网的功率。当配电网出现功率不平衡时，可以根据系统总的功率不平衡量  $\Delta P$  和每个可控负荷的总可调负荷容量  $LCL_i$ ，计算出每个可控负荷的负荷调控量  $LC_i$ 。

然后,通过调整这些负荷的功率需求来平衡配电网的功率,从而提高 DER 的消纳能力。

综上所述,本文提出的源/储/荷协调控制技术综合考虑了 DG、ESS 和 CL 的多时间尺度互补特性,通过储能系统的功率吞吐控制、分布式电源的功率控制和可控负荷的减载控制等策略,实现了可再生能源的主动消纳和调度。这种协调控制策略不仅提高了 DER 的利用率和配电网的稳定性,还为电力系统的可持续发展提供了有力支持。未来随着智能电网技术的不断发展和 DER 接入规模的进一步扩大,这种协调控制策略将发挥更加重要的作用。

#### 4. 主动配电网的电压协调控制

随着分布式电源(DER)的大量接入,电网电压的稳定控制面临新的挑战。DER 的接入容易导致电网电压抬升,进而产生电网电压越限的风险。因此研究主动配电网(ADN)的电压协调控制策略对于确保配电网的安全稳定运行和提升系统的电能质量具有重要意义。

##### 4.1 电压协调控制架构

主动配电网的电压协调控制架构是一个多层次、多环节的系统,主要包括配电网调度层、微电网集中控制层以及微电源/储能/负荷等各设备的就地控制层。

1. 配电网调度层:作为整个电压协调控制系统的顶层,负责接收上级电网的调度指令,并根据电网运行状态和 DER 的接入情况,制定全局的电压控制策略。

2. 微电网集中控制层:位于配电网调度层和就地控制层之间,负责接收调度层的指令,并将其转化为具体的控制指令发送给各就地控制层。同时微电网集中控制层还负责监测和评估微电网的运行状态,确保微电网内的电压稳定。

3. 就地控制层:包括微电源、储能系统和负荷等设备的控制单元,负责执行来自微电网集中控制层的控制指令,实现对各设备的精确控制。

通过各层之间的信息交换和协调控制,主动配电网的电压协调控制架构能够实现对电压的稳定控制,确保电网的安全稳定运行。

##### 4.2 传统调压装置与储能的协调控制

传统调压装置,如变压器分接头和电容器组,一直以来在电网电压调节中扮演着重要角色。它们通过调节电压幅值和相位,有效维护电网电压的稳定。然而随着分布式能源资源(DER)的大量接入,电网电压的动态特性发生了显著变

化,这对传统调压装置提出了更高的挑战。DER 的间歇性和不确定性导致电网电压波动更加频繁和剧烈,而传统调压装置由于调节速度相对较慢,往往难以迅速响应这些变化,从而难以满足 DER 接入后电网电压的稳定控制需求。

为了应对这一挑战,将储能系统(ESS)与传统调压装置进行协调控制成为了一种有效的解决方案。储能系统以其响应速度快、调节灵活、能量吞吐量大等优点,在电网电压调节中展现出巨大潜力。通过精确控制储能系统的充放电过程,可以迅速响应电网电压的变化,实现对电网电压的快速调节。

在协调控制策略中,传统调压装置和储能系统各司其职,相互配合。传统调压装置负责进行长期的、小幅度的电压调节,而储能系统则负责应对短期的、大幅度的电压波动。通过实时监测电网电压状态,动态调整储能系统的充放电策略,可以实现对电网电压的精确控制,从而确保 DER 接入后电网电压的稳定性和可靠性。这种协调控制策略不仅提高了电网的电压调节能力,还优化了 DER 的接入和并网运行,为电力系统的安全稳定运行提供了有力保障。

##### 4.3 需求侧响应的引入

需求侧响应(Demand Side Response, DSR)是一种有效的电压协调控制手段。它通过引导负荷侧可调度资源参与主动配电网的电压协调优化控制,改善传统仅依靠可控机组调节的情况。

在需求侧响应中,负荷侧的可调度资源包括可控负荷、储能设备等。通过调整这些资源的功率需求或输出功率,可以实现对电网电压的进一步控制。例如在电网电压过高时,可以通过减少可控负荷的功率需求或增加储能设备的充电功率来降低电网电压;在电网电压过低时,则可以通过增加可控负荷的功率需求或减少储能设备的放电功率来提高电网电压。

通过引入需求侧响应,可以充分利用负荷侧的可调度资源,实现对电网电压的精确控制。这不仅可以提高系统的电压稳定性,还可以降低电网的运行成本,提高电网的经济性。

综上所述,主动配电网的电压协调控制策略是一个多层次、多环节的系统工程。通过构建合理的电压协调控制架构、引入储能系统与传统调压装置的协调控制以及需求侧响应的引入等措施,可以实现对电网电压的稳定控制,确保配电网的安全稳定运行和提升系统的电能质量。

## 结论

本文提出了一种主配网调控运行中的分布式电源协调策略,综合考虑 DG、ESS 和 CL 的多时间尺度互补特性,实现可再生能源的主动消纳和调度。通过储能系统的功率吞吐控制、分布式电源的功率控制以及可控负荷的减载控制,实现了对配电网的电压稳定控制和 DER 的高效利用。未来随着智能电网技术的不断发展和 DER 接入规模的进一步扩大,需要继续深入研究分布式电源的协调控制策略,提高配电网的安全稳定运行能力和 DER 的消纳能力。同时还需要考虑更多类型的 DER 接入,如电动汽车充电桩、储能电池等,

进一步丰富和完善分布式电源的协调控制策略。

## 参考文献:

- [1] 吴宏伟,宁鑫.含分布式电源的配电网合环电流调控策略研究[J].电子乐园,2021(002):000.
- [2] 佚名.一种基于分布式资源运行的配电网的综合调控方法及系统:CN202410750814.0[P].CN118336718A[2024-11-12].
- [3] 赵泓霖.含分布式电源的配电网合环电流调控策略研究[D].山东大学[2024-11-12].