

考虑用户侧柔性负荷响应的配电网经济运行调度模型及应用

郭汉臣

国网河北省电力有限公司保定供电分公司 河北保定 071000

摘要: 用户侧柔性负荷响应作为一种新型需求侧管理手段,现阶段能够为配电网的优化运行提供新的思路。本文就从理论层面构建了考虑用户侧柔性负荷响应的配电网经济运行调度模型,在文章中探讨了模型的核心思想、构成要素及应用逻辑。最终的研究表明,该模型能够充分地挖掘出用户侧资源的潜力,有助于提升配电网的经济性和灵活性,进而可以为配电网的高效运行提供理论层面的支撑。

关键词: 配电网;经济运行调度;用户侧;柔性负荷响应;理论模型

引言

在全球能源革命和数字革命的双重驱动之下,电力系统正朝着清洁化、智能化、市场化的方向加速转型。而配电网是电力系统的末端环节,它直接关系到电力的安全可靠供应和用户的用电体验,因此其经济运行调度一直都是电力行业研究的重点。传统的配电网经济运行调度主要关注着电源侧的发电成本和网络损耗,该方式对用户侧的负荷特性考虑较少。但随着分布式能源的广泛接入和智能电网技术的发展,用户侧的负荷呈现出多样化、互动性增强的特点,表明柔性负荷响应能力在逐渐地凸显。用户依据电力市场价格信号、电网运行状态等信息,能够灵活地调整自身的用电行为,如改变用电时间、调整用电功率等等,以此为配电网的经济运行调度提供了新的调控资源。

在此背景之下,研究考虑用户侧柔性负荷响应的配电网经济运行调度模型具有非常重要的理论意义和实际应用价值。它不仅能够提高配电网的经济运行效率,从而降低运行成本,还能增强电网的灵活性和可靠性,且促进可再生能源的消纳,最终能推动电力系统的可持续发展。

1. 用户侧柔性负荷响应的理论基础

1.1 柔性负荷的定义与分类

柔性负荷是相对刚性负荷而言的,它是指那些可以通过一定的技术手段和经济激励措施,在不影响用户核心用电需求的前提下,达到改变用电时间、用电功率或用电方式负荷的效果。对柔性负荷可以从不同角度进行分类^[1]。比如按照响应特性,可将其分为可转移负荷、可削减负荷和可调节负荷。其中,可转移负荷是指在一定时间段内可以从一个时

段转移到另一个时段的负荷,如电动汽车充电、洗衣机等家电的运行;可削减负荷则是指在紧急情况下可以暂时削减的负荷,如某些工业生产中的非关键设备用电;而可调节负荷是指可以在一定范围内调整用电功率的负荷,如空调的温度设定调整等^[2]。

若按照用户的类型进行分类,那么可分为居民用户柔性负荷、商业用户柔性负荷和工业用户柔性负荷。首先是居民用户的柔性负荷,主要包括了各类家电设备;其次是商业用户的柔性负荷,如商场的照明、空调等等;再者便是工业用户的柔性负荷,它与生产工艺相关,如某些生产过程中的用电设备。

1.2 柔性负荷响应的驱动机制

柔性负荷响应的驱动机制由经济激励和技术支持两个方面组成。一方面是经济激励,它是促使用户参与柔性负荷响应的重要手段。即通过制定合理的电价机制,像分时电价、实时电价、尖峰电价等等,来引导用户在电价较低时增加用电,且在电价较高时减少用电或者是转移用电时间,从而实现负荷的优化调整。此外还可以通过需求响应补贴、奖励等方式,使用户积极地参与负荷响应。另一方面是技术支持,它是实现柔性负荷响应的基础保障。该方式主要借助智能电表、智能家居系统、工业控制系统等技术的应用,使得用户能够实时地获取用电信息和电价信息,方便用户自行调整自己的用电行为。同时基于先进的通信技术和数据处理技术,还实现了电网与用户之间的信息交互和实时控制,得以为柔性负荷响应的高效实施提供技术层面的支撑。

1.3 柔性负荷响应的特性分析

不确定性是柔性负荷响应的第一特性,它源于用户的用电行为具有随机性和主观性。因为用户会对电价信号、激励措施的响应程度难以进行准确地预测,加之外界环境因素如天气变化也会影响到柔性负荷的响应。而可控性为柔性负荷的核心特性。基于该特性,仅需采取合理的调控手段,就能够改变负荷的时间分布和功率大小,以适应电网的运行需求^[3]。经济性则体现在用户参与柔性负荷响应可以降低自身的用电成本,同时电网经由利用柔性负荷响应,还可以减少发电成本和网络损耗,进而实现整体经济效益的提升。

2. 配电网经济运行调度的理论框架

2.1 配电网经济运行调度的目标

配电网经济运行调度的核心目标是在保证电网安全可靠运行的前提之下,可以实现运行成本的最小化。运行成本则由发电成本、网络损耗成本、购电成本等方面组成。但还需要考虑到一些辅助目标,如提高可再生能源的消纳率、减少环境污染等,以确保配电网的综合效益达到最优程度。

2.2 配电网经济运行调度的约束条件

配电网经济运行调度一定要满足一系列的约束条件,这样才能确保电网的安全稳定运行。展开来说:功率平衡约束即发电功率与负荷功率以及网络损耗之间保持平衡;电压约束为保证各节点的电压在允许的范围内波动;线路容量约束旨在防止线路过负荷运行;电源出力约束像分布式电源的最大和最小出力限制等等。

2.3 传统配电网经济运行调度模型的局限性

由于传统的配电网经济运行调度模型主要基于电源侧的调控,却忽视了用户侧的柔性负荷资源。因此这种模型在面对分布式能源大规模接入、负荷波动加剧等情况时,就难以实现资源的优化配置,可能导致运行成本增加、电网可靠性降低等问题出现。另外,传统模型对于用户的参与度考虑也不足,并无法充分地发挥出用户在电网调节中的作用。

3. 考虑用户侧柔性负荷响应的配电网经济运行调度模型构建

3.1 模型的核心思想

考虑用户侧柔性负荷响应的配电网经济运行调度模型的核心思想是将用户侧的柔性负荷响应能力作为一种可控资源纳入到配电网的调度体系之中,从而实现电源侧和用户侧的协同优化。对此,可以经过引导用户参与负荷响应,

来调整负荷曲线,使得发电资源与负荷需求变得更加匹配,以达到降低整体运行成本,以及提高电网经济性和灵活性的目的。

3.2 模型的构成要素

3.2.1 负荷预测模块

只有准确的负荷预测才是实现配电网精准调度的前提和基础,因为其预测的精度会直接影响到整个调度模型的运行效果。该模块需要构建多维度的预测体系,且综合地考量到历史负荷数据、用户类型的差异、天气因素和是否处于节假日期间等各类影响因素^[4]。基于这些因素,负荷预测模块需精准地预测出不同时段刚性负荷和柔性负荷规模,所谓刚性负荷是指用户核心用电需求对应的不可调整负荷,柔性负荷则是具备调整潜力的负荷。更为关键的是,该模块还需模拟不同的经济激励措施(如不同幅度的电价调整、补贴金额)下柔性负荷的响应程度,再通过建立响应度的预测模型,来为后续的调度决策提供科学、可靠的依据,使调度方案能够适应不同场景下的负荷变化。

3.2.2 柔性负荷响应管理模块

作为连接电网与用户的关键纽带,柔性负荷响应管理模块承担着引导用户合理调整用电行为、实现负荷优化配置的重要职责,它的运行效果与柔性负荷资源能否被充分地激活和利用紧密相连。就经济激励措施制定方面而言,该模块需结合电网的实时运行状态(如负荷高峰、低谷时段,线路负载率等)和负荷预测结果,动态地调整电价机制。除了电价机制之外,补贴政策也是非常重要的激励手段,面对积极参与了负荷响应且响应效果显著的用户,应当给予一定的经济补贴或奖励,从而提高用户的参与积极性。对于技术控制方面来说,该模块则需依托于智能控制系统,以实现柔性负荷的全流程管理。同时也要建立完善的响应评估机制,根据该机制对用户的负荷响应行为进行实时地跟踪和效果评估,为响应的有效性和可靠性提供保障。

3.2.3 电源调度模块

电源调度模块核心职责是根据负荷预测结果和柔性负荷的实际响应情况,对各类电源的出力进行统筹规划和优化配置。从电源类型方面入手,该方面需涵盖传统火电机组、水电机组等可控电源,以及风电机组、光伏机组等间歇性可再生能源电源,以及储能设备的充放电调度,从而平抑可再生能源的波动。实际在制定出力计划时,第一步是要满足功

率平衡约束,随后需严格地遵守各类电源的技术约束。在此基础上,电源调度模块还要基于多目标优化算法,在降低发电成本(如火电的燃料成本、水电的运行成本等)和网络损耗的同时,可以最大限度地提高可再生能源的消纳率。

3.2.4 优化决策模块

作为整个模型的中枢核心,优化决策模块承担着综合权衡各方因素、制定全局最优调度方案的重要职责,其决策质量是决定配电网经济运行整体效益的最大因素。该模块以运行成本最小化为核心目标函数,同时兼顾可再生能源消纳率最大化、电网损耗最小化等辅助目标,构建起多目标优化模型。之后在决策的过程中,需要整合负荷预测模块提供的负荷数据及响应预测结果、柔性负荷响应管理模块的激励措施方案、电源调度模块的初步出力计划等多个方面信息,使其形成完整的决策输入体系^[5]。

3.3 模型的运行逻辑

模型的运行逻辑通常可以分为以下几个步骤:首先通过负荷预测模块对未来一段时间内的负荷情况进行预测,当中包括了刚性负荷和柔性负荷的初始预测值;其次应根据负荷预测结果和电网的运行状态,在柔性负荷响应管理模块制定出初步的经济激励措施和控制策略,并且预测用户在这些措施下的负荷响应情况;然后是电源调度模块,要以调整后的负荷需求和电源的可用出力为依据,来制定初步的电源出力计划;接着便是优化决策模块,此时应将负荷响应后的负荷曲线、电源出力计划等信息纳入优化模型,以运行成本最小化为目标进行求解,再得到最优的调度方案;最后将最优调度方案下达给各执行环节,如用户、发电厂等等,进行实际的调度运行。

4. 模型的应用分析

4.1 在电力市场中的应用

在电力市场环境之下,考虑用户侧柔性负荷响应的配电网经济运行调度模型,有助于促进电力市场的高效运行。展开来说:借助灵活的电价机制和负荷响应措施,使得电力价格能够更加真实地反映出市场供求关系,在以此为基础引导用户合理地用电,进而提高电力资源的配置效率。不仅如此,用户参与负荷响应还可以获得一定的经济收益,能够提高用户的市场参与度,且促进电力市场的公平竞争。

4.2 在可再生能源消纳中的应用

风能、太阳能等可再生能源具有间歇性和波动性的特

点,其大规模地接入给配电网的经济运行调度带来了挑战。

而考虑用户侧柔性负荷响应的配电网经济运行调度模型,可以经由调整用户的用电行为,提高配电网对于可再生能源的消纳能力。当可再生能源的出力较大时,仅需采取降低电价等激励措施,就能引导用户增加用电,比如电动汽车充电、储能设备充电等等;若可再生能源出力较小,经由提高电价等措施,便能引导用户减少用电或转移用电时间,从而减少对于传统发电资源的依赖,达到促进可再生能源消纳的效果。

4.3 在提高电网可靠性中的应用

考虑用户侧柔性负荷响应的配电网经济运行调度模型,可以通过柔性负荷的调节作用,来提高电网的可靠性^[6]。像电网发生故障或出现负荷高峰时,经过削减或转移部分柔性负荷,就能减轻电网的运行压力,有效地避免了大面积停电事故的发生。同时模型还可以实时地监控电网的运行状态和用户的负荷情况,助力相关人员及时地发现潜在的故障风险,并通过调整负荷和电源出力进行预防和控制,最终便能提高电网的安全稳定运行水平。

结语:为了适应电力系统转型和发展,在实践中应该积极地应用考虑用户侧柔性负荷响应的配电网经济运行调度模型。该模型经由将用户侧的柔性负荷资源纳入调度体系,实现了电源侧和用户侧的协同优化,以此为提高配电网的经济性、灵活性和可靠性提供了新的途径。如果从理论层面来看,由于该模型深入地分析了用户侧柔性负荷的响应机制和特性,构建起包含了负荷预测、柔性负荷响应管理、电源调度和优化决策等模块的完整模型框架,因此丰富了配电网经济运行调度的理论体系,还拓展了需求侧管理的应用范围。而在实际应用之中,它能够在电力市场中促进资源的优化配置,在可再生能源消纳中发挥积极作用,并且在提高电网可靠性方面提供有效的支撑,表明该模型具有非常广阔的前景。但是模型的实际应用还面临着一些挑战,比如用户参与度不高、信息交互不畅、技术标准不统一等问题,对此需要在未来的研究和实践中进一步解决。

参考文献:

- [1] 张超.考虑柔性负荷的激励型需求响应的双层优化调度[J].新型工业化,2021,11(03):196-203.DOI:10.19335/j.cnki.2095-6649.2021.3.082.
- [2] 赵静怡.考虑需求侧资源互补的柔性互联配电网协调调度方法[D].广西壮族自治区:广西大学,2023.

DOI:10.27034/d.cnki.ggxiiu.2023.000900.

[3] 李凯强. 考虑需求侧响应及分布式储能的主动配电网优化调度研究[D]. 陕西省: 西安理工大学, 2023.

DOI:10.27398/d.cnki.gxalu.2023.001848.

[4] 彭宇文, 周永旺, 许灿城, 等. 考虑需求侧响应的综合能源系统低碳经济调度方法研究[J]. 黑龙江电力, 2023, 45(06): 498–506. DOI:10.13625/j.cnki.hljep.2023.06.005.

[5] 邱革非, 何超, 骆钊, 等. 考虑新能源消纳及需求响

应不确定性的配电网主从博弈经济调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(06): 66–72. DOI:10.16081/j.epae.202102021.

[6] 贾静然, 段昕, 卢锦玲, 等. 考虑需求侧响应的配电网柔性软开关优化控制方法[J]. 电源学报, 2024, 22(01): 189–195. DOI:10.13234/j.issn.2095–2805.2024.1.189.

作者简介: 郭汉臣(1996.5–), 男, 汉族, 河北省保定市, 硕士研究生, 职称工程师, 研究方向电力工程技术。