

DOI: 10.7667/PSPC171412

含智能负荷和分布式能源接入的配电网调度研究

刘岩¹, 吴以岷¹, 徐荣敏², 金明辉², 完绍岭³

(1. 国网上海电力公司市区供电公司调控中心, 上海 200080; 2. 国网上海市电力公司电力调控中心, 上海 200122; 3. 杭州智光一创科技有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 在配电网调度中引入智能负荷, 有助于充分利用新能源发电和减少调度备用机组。归纳分布式能源发电和负荷特点, 介绍了智能负荷及其在配电网调度中的应用。针对新能源分布式特点, 在含分布式能源接入的配电网调度中采用多智能体系统。多智能体系统所具有的协调性可以取得良好的配电网调度效果, 而且单个智能体也可以利用自身的自主性和学习经验参与配电网调度。设计了基于多智能体技术的配电网调度控制系统和实现流程。采用含分布式能源接入的配电网算例, 验证智能负荷在配电网调度中的有效性。

关键词: 配电网; 新能源; 调度; 智能负荷; 多智能体系统

Research on distribution network scheduling with smart load and distributed energy access

LIU Yan¹, WU Yimin¹, XU Rongmin², JIN Minghui², WAN Shaoling³

(1. Urban Power Supply Control Center, State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200080, China;
2. Electric Power Control Center, State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China;
3. Hangzhou Zhiguang Econ Technology Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: The introduction of smart loads in distribution network dispatch helps to make full use of new energy generation and reduce the dispatch of standby units. This paper summarizes the characteristics of distributed energy generation and load, and introduces the intelligent load and its application in distribution network dispatching. The new energy distribution network scheduling adopts multi-agent system to fit the new energy distribution characteristics. Multi-agent system can achieve a good distribution network scheduling effect for coordination characteristics, and a single agent can also use its own autonomy and learning experience to participate in distribution network scheduling. This paper designs a distribution network scheduling control system and implementation process based on multi-agent technology. An example of distribution network with distributed energy access is used to verify the effectiveness of intelligent load in distribution network scheduling.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company (No. 5209111500ZC).

Key words: distribution network; new energy; scheduling; intelligent load; multi-agent system

0 引言

作为智能电网的核心环节, 配电网逐步配置各种类型的传感器, 为实现配电网高级别调度提供了物理信息基础。通过配电网的合理调度, 有望实现电能的有序流动和有效利用, 确保配电网的平稳、安全运行^[1]。

随着风力、光伏、现代生物能等分布式能源的高速发展, 在配电网的比例也逐步增大, 配电网调

度面临新的挑战。对于新能源高渗透率的配电网来说, 由于风力和光伏等新能源发电通常具有随机性、波动性和间歇性特点, 对于发电情况具有一定不确定的新能源来说, 传统的配电网调度方式已逐渐不能适应, 亟需研究新能源高渗透背景下配电网的安全、经济调度^[2-4]。

由于新能源发电具有不确定性以及新能源并网对电网的冲击, 为了实现电网的功率平衡和电压稳定, 通常对新能源并网发电做了诸多限制, 甚至出现了严重的弃风、弃水以及光伏无法充分利用等能源严重浪费情况。

基金项目: 国网上海市电力公司科技项目资助(5209111500ZC)

从能源利用率来讲, 新能源按最大容量发电最为经济, 但这需要负荷端能够对应消纳, 否则完全依靠电池等进行电能调节并不划算。但新能源发电具有随机性, 为了保持能量平衡, 则需要负荷端也具有较强的适应性, 通过配电网调度对不同性质的负荷实现有效控制, 从而实现分布式能源的最大利用率^[5-6]。

已有文献开始研究具有智能功能的“智能负荷”^[7], 本文将根据分布式能源的特点, 在“智能负荷”基础上, 采用多智能体(Multi-Agent System, MAS)进行含分布式能源的配电网调度, 以实现新能源的最大利用率。

1 理论分析

1.1 分布式能源发电特点

分布式能源的发展因地制宜, 各地根据自身的能源优势发展多种形式的能源, 主要包括风力、光伏、海洋能、现代生物能、微型燃气轮机和柴油发电机等类型^[8]。

风力、光伏、海洋能和现代生物能等分布式能源发电具有不确定性, 发电量的多少主要取决于天气、海况等外界环境, 虽然当前已经有风力分析算法等进行风力发电预测, 但现场实际中的发电容量仍然难以控制, 无法作为调度可用的机组^[9]。

微型燃气轮机和柴油发电机等机组可以根据现场运行需要发电, 能快速地调整发电数量的输出, 调度系统能够根据配电网功率平衡需要, 制定该类机组的调度安排, 实现调度调节。

虽然微型燃气轮机和柴油发电机属于可调度机组, 但由于该类机组发电需要耗费燃油和柴油等不可再生能源, 大规模应用不具有经济性, 只是作为分布式能源发电系统的有益补充。由于微型燃气轮机和柴油发电机等可调度机组在实际的分布式能源现场中的应用比例较小, 无法完全依靠该类机组实现调度所需的功率。为了维持含分布式能源的配电网功率平衡, 还需在负荷端具有较好的适应性, 能够适应新能源发电的波动性, 实现新能源按最大容量发电。

1.2 智能负荷

电能具有不可以大规模长时间存储的特点, 发电和用电要能做到瞬时功率平衡, 在含分布式能源接入的配电网系统中, 由于新能源发电的不确定性和各发电系统间的功率、电压稳定约束, 含分布式能源接入的配电网调度具有动态波动、不容易预测和需要多个尺度联合协调控制的特性。单靠发电侧的调度, 通常需要大量成本不菲的备用发电机组或

是存储设备, 不具有经济优势, 通过源—荷协调控制有望实现更优的配电网调度。

针对负荷的灵活应用, 文献[10]提出智能负荷的概念, 将负荷分为关键负荷和非关键负荷。关键负荷指的是负荷的设备或电器的正常动作严格要求供电功率和电压的水平必须控制在很窄的范围内; 而非关键性负荷对于终端的供电质量则不敏感。

非关键性负荷包括: 1) 住宅和大型建筑的热水器、大型冰蓄冷系统和空调等设备; 2) 各种类型的路灯照明; 3) 一般的电阻负荷。

配电网调度中, 首先要保证关键负荷的功率和关键负荷上的终端电压能保持在严格的范围内, 不能出现电压和功率的大幅波动。非关键负荷则对所需的电压相对不敏感, 能够容许较大范围内的电压偏差, 对于负荷消耗的功率波动也有较大的容忍度, 非关键性负荷有望应用于配电网调度中的功率平衡。

文献[10]进一步提出电力弹簧装置与非关键性负荷联合起来提高功率平衡。电力弹簧装置主要由电力电子元件组成, 当前已研发出三种类型的电力弹簧装置应用于消除发电和负荷的失衡: (1) 无有功电源的电力弹簧装置; (2) 含有有功电源的电力弹簧装置; (3) 含储能装置, 基于联网双向 AC-DC 逆变器的电力弹簧装置^[11-12]。

具体应用于配电网调度中, 非关键负荷接入到电力弹簧装置, 组成智能负荷后接入到配电网系统中, 同时关键负荷以并联形式也接入到配电网中, 如图 1 所示。

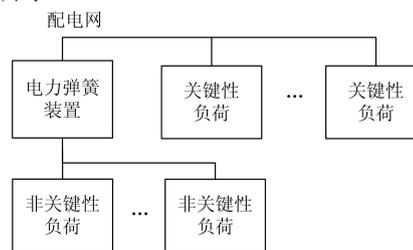


图 1 配电网的智能负荷

Fig. 1 Intelligent load of distribution network

智能负荷可自适应地减小有功功率的不平衡, 同时保持关键负荷的电压水平, 从而消除配电网内的发电和负荷的失衡。目前, 智能负荷能在功率过低时提升功率, 并在功率过高时降低功率。对于含交流微电网的配电网而言, 整个配电网还需维持无功平衡, 在电压偏离正常值时能快速恢复系统电压。

1.3 调度控制方式

配电网调度过程中, 通过对参与配电网的发电和负荷进行功率控制, 实现配电网内的功率平衡。传统电力系统依靠发电机来调节功率平衡, 通过同

步发电机的调速器实现有功功率调节或是通过励磁系统实现无功功率调节。传统的调度模式单纯地根据负荷需求的变化来调整发电机组的功率输出，无法依靠负荷等其他电力单元平衡系统功率。

配电网安装智能负荷后，利用智能负荷的功率调节功能，可以提高配电网对新能源的消纳能力，通过合理调度，确保配电网的安全运行，并尽可能调度新能源多发电，避免当前经常采用“弃光弃风”维持电网稳定的做法。主要分布式能源比较见表 1。

表 1 含分布式能源接入的配电网单元比较

Table 1 Comparison of distribution network unit including distributed energy access

电力单元	可控性/适应性	建成后每度电成本	参与调度
光伏、风力	差	发电成本低	较难
可调度机组	好	发电成本高	容易
智能负荷	好	电力弹簧装置	容易
关键性负荷	差	—	难

智能负荷接入配电网后，首先根据负荷的重要性的特点进行负荷分类，将功率和电压偏差允许度较高的一般负荷归纳为非关键性负荷，非关键性负荷通过电力弹簧装置组成智能负荷。由于智能负荷可参与配电网调度，因此，非关键性负荷容量越大，越有利于配电网调度，但对主要由电力电子元件组成的电力弹簧装置要求也越高。

本文在智能负荷基础上，为了降低电力弹簧装置要求，空调性负荷可通过配电网有效控制直接接入配电网。当配电网用电紧张时，配电网智能控制装置通过适当调高空调温度以降低对电能的需求，这对于空调负荷占据比重较大的夏季居民和商业区用电的配电网来说，将有较明显的错峰作用，同时空调度数的适当提高并不会明显地影响用户的用电感受。

关键性负荷直接接入到配电网中，由于关键性负荷对所需的功率和电压要求较高，配电网需维持在比较稳定的电压，且能满足关键性负荷所需的功率，这需要配电网调度调节发电机组和智能负荷，维持配电网的功率平衡。

微型燃气轮机和柴油发电机等可调度机组发电需要燃烧汽油和柴油等燃料，大规模应用并不经济，通常只作为新能源发电不稳定时的补充调节。光伏、风电等新能源建成后，在保证电力系统稳定运行的基础上，按最大容量发电能产生最大的经济效益。

2 基于 MAS 的配电网调度

2.1 调度基础

含分布式能源接入的配电网采用智能负荷后，

负荷以适当形式参与配电网的调度，对于参与调度的负荷用户来说，事实上是以降低负荷的电能质量来满足配电网的调度需要，在用电费用无差别情况下，用户通常选择自身负荷为关键性负荷，而不作为参与调度的智能负荷^[13]。

为了鼓励更多负荷参与配电网调度，在电力市场逐步深化背景下，用户按负荷参与调度的程度与成本进行收费，负荷用电费用定义

$$C = m \cdot t \cdot S_{base} \quad (1)$$

式中： S_{base} 为基础电费； t 为电力市场下不同时段的费用系数； m 为负荷参与调度的系数，本文中关键性负荷、智能负荷和可直接调高温度的空调类负荷，分别取 1、0.9 和 0.8。

风力、光伏等新能源投产后，发电成本很低，配电网调度根据新能源特点，制定风力、光伏的功率调节策略，最大程度地调度风力、光伏发电。微型燃气轮机和柴油发电机等可调度机组虽有较好的调节功能，但受限于经济性，不宜大规模应用于配电网调度。

配电网调度在维持配电网稳定运行基础上，根据光伏、风电等发电系统的运行特点，优先保障光伏、风力等新能源能最大程度发电。同时，光伏、风力等新能源间歇性发电对配电网功率平衡可能产生的不利影响，由负荷参与调节，技术上由智能负荷消除功率波动。

配电网调度安排流程如图 2 所示，调度中心首先汇集含分布式能源在内的配电网发电量情况，同

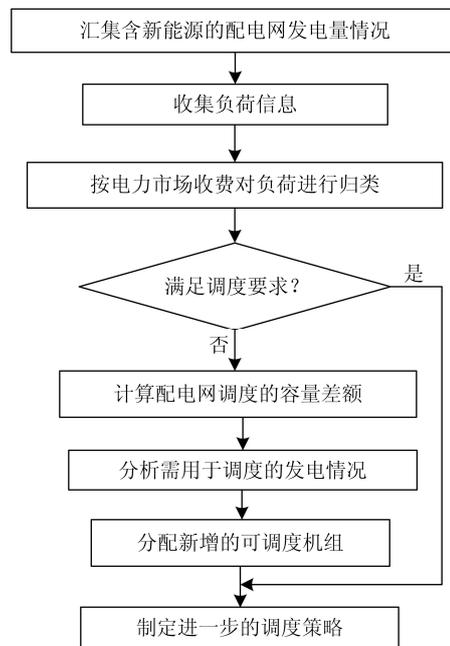


图 2 调度安排流程

Fig. 2 Distribution network scheduling process

时收集配电网用户的负荷信息;对所收集的用电情况,按电力市场收费对负荷进行归类,理清可用于调度的负荷容量,从而可以根据现有的发电和负荷情况,判断是否满足调度要求。

如果现有配电网调度还不满足要求,则需新增可用于调度的机组,以维持配电网系统平衡;进一步计算配电网调度的容量差额,并分析需用于调度的发电情况,从而分配新增的可调用机组,满足配电网调度需求。

2.2 MAS 调度

含分布式能源接入的配电网调度除了涉及传统的配电网调度技术,还需考虑新能源发电特点使其更具经济性,同时采用智能负荷后还涉及源-荷间的协调问题,配电网调度成为一个包含多个不同类型单元的复杂系统,如何高效地组织配电网各个组成单元进行联合控制便成了关键。

多智能体(Multi-Agent System, MAS)技术既能够发挥组织内各个成员自身的调控优势,又可以通过成员间高效的协作实现整体调控功能的优化^[14]。作为分布式人工智能的重要内容, MAS 于 20 世纪末开始得到了快速发展,在电力行业也有广泛的应用,用于解决单靠个体难以完成的规模较大、非线性等复杂难题。通过 MAS 技术,配电网调度问题将分解为配电网内各个智能体间的协调、管理、控制、合作和通信,降低控制难度。

配电网调度采用 MAS 技术,配电网母线配备管理母线的 Agent,配电网各个电气支路也配备对应的 Agent,如图 3 所示。

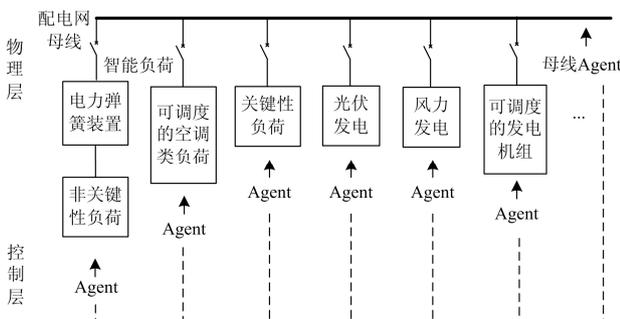


图 3 基于 MAS 配电网调度示意图

Fig. 3 Distribution network dispatching diagram based on MAS

Agent 完成配电网各个组成元件的数据采集、运算分析、功能协调、输出控制和高效通信等主要功能,由电量弹簧装置和非关键性负荷组成的智能负荷、大型办公楼和商场等集中供冷系统作为可调度负荷、光伏发电、风力发电和可调度的发电机组等配电网单元,自身已经配有控制系统,可以在现

有的控制系统上,增加配电网调度协调功能、Agent 通信和协调功能,实现相对简便。

对于关键性负荷和其他自身没有配备控制的系统,则需要新配具有 Agent 功能的智能电子设备,关键性负荷 Agent 不参与配电网调度控制,功能相对简单,主要实现负荷状态测量和 MAS 协商功能,将负荷信息与其他 Agent 交互。

MAS 应用于具有分布式异构系统性质的配电网时,可以根据配电网的结构,灵活进行配电网用电分区和潮流支路增减。根据配电网电气耦合紧密程度,一定数量 Agent 便可以组成一个功能独立的配电网 MAS 调度区域,也能与其他控制区域 MAS 或是上一层的 MAS 联合组成规模更大的配电网 MAS 调度区域,通过整体协调控制实现更好的调度效果。

同时, Agent 具有良好的沟通协调能力,配电网调度过程中,可以根据现场调度需要,与相关的 Agent 协调后,通过投切对应 Agent 控制的支路实现负荷的调度。

作为一个高度集成系统, MAS 借助于通信网络将各个 Agent 信息无缝集成,通过互相协调去解决类似于配电网调度这种复杂问题,图 3 所示的虚线为连接各个 Agent 的通信网络,电力工程现场中可以采用 RS485 或 RS422 等传统网络、CAN 或 Lonworks 等现场总线、甚至光纤以太网等当前的流行通信网络。

Agent 通信和协调功能是实现难点, Agent 专门设计了自身的语言以方便多个 Agent 间沟通, Agent 通信语言主要包括美国的知识查询和操作语言 (Knowledge Query and Manipulation Language, KMQL) 以及国际组织性质的物理智能体基金 (Foundation for Intelligent Physical Agents, FIPA) 的智能体通信语言 (Agent Communication Language, ACL)。配电网调度直接采用 KMQL 或 ACL 实现 Agent 协商,避免了需要进行 Agent 底层通信和协议设计等繁琐过程^[15]。

基于智能负荷的 MAS 配电网调度,在维持配电网安全、稳定运行基础上,既满足配电网用户的良好用户体验,又能最大程度地利用新能源发电,具体的配电网调度情况如图 4 所示。

光伏、风力等新能源发电 Agent 获悉配电网母线电压正常时,采用光伏控制和风力出力等发电措施,按最大功率发电,充分利用新能源。同时,母线 Agent 实时采集母线电压,并通过 MAS 系统,收集来自于相连支路的功率,从而可以分析本地配电网的潮流分布情况。

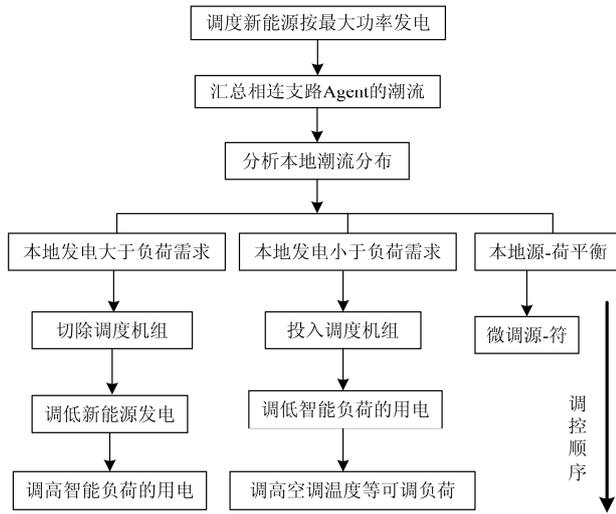


图4 基于智能负荷的MAS配电网调度
Fig. 4 MAS distribution network scheduling based on intelligent load

根据配电网潮流情况，分析本地发电与用电情况，尽量实现配电网本地的供用电平衡，可以减少线损等电能损耗。当本地的源-荷基本平衡时，则达到较好的调控结果，整个配电网MAS系统只需对现有的配电网一次系统进行微调。

当本地发电大于本地负荷需求时，如果电能外送通道顺畅，可以将本地多余的发电向外输送。本文重点考虑主要依靠本地源-荷实现功率平衡的情况。首先切除微型燃气轮机和柴油发电机等可调度机组，减少需要燃料机组的不经济性；接着通过Agent控制器适当调低光伏、风力等发电量；最后可借助智能负荷进行调峰，利用智能负荷对所承受功率的容忍度，通过控制电力弹簧装置，增加非关键性负荷的电能供给，从而协助配电网进行本地电能的消纳。

当本地发电小于负荷需求时，尽量增加本地发电以维持配电网功率平衡。首先投入微型燃气轮机和柴油发电机等可调度机组发电，利用可调度机组具有的快速发电特点，争取尽快补偿电能缺口。由于光伏、风力等新能源已经按默认的最大功率发电，接下来主要依靠本地的负荷端进行调节，降低负荷需求以适应发电不足的情况。利用智能负荷对于电能需求的“弹性”特点，调节智能负荷的电力弹簧装置以减少电能流向非关键性负荷，从而降低配电网当前本地的负荷需求；同时，遵循可调负荷低收费的电力市场手段，鼓励用户通过Agent协商控制功能，在本地负荷不足时通过调高空调温度等方法，减少可调负荷的用电需求。

配电网调度中，需要根据配电网运行中出现的各种复杂情况进行快速处理。基于MAS的配电网调度的组成单元，通过通信网络实现配电网的信息交互，各个Agent在母线Agent的协调下，实现联合控制，通过共同调节实现更好的配电网调度效果，最大程度地增加新能源发电，减少备用机组和储能设备，提高新能源的利用率。

Agent具有能动性和自主性特点^[16]，既能通过多个Agent协调控制取得较好的配电网调度结果，也可以在无法与其他Agent联系时，Agent能根据自身能力和经验，独立完成自身所属的配电网调度任务。

同时，Agent具有较强的自学习能力和灵敏的反应性^[17]，能够根据配电网的变化情况，自适应地调整自身的行为，从而改善自身的协调控制功能，以适应配电网出现的各种灵活情况。

3 仿真分析

本文采用国家能源局智能电网上海研发中心智能配电网实验室的配电网模型^[18]，测试含分布式能源接入的配电网调度情况，配电网主要组成单元包含4个光伏、2个风力、2个燃气轮机和大量蓄电池，配电网模型如图5所示，其中，PV表征光伏、WT表征风力、E表征电池储能、G表征燃气轮机。该配电网通过两个电气回路与外部电网(图中用电源模型表示)联系。

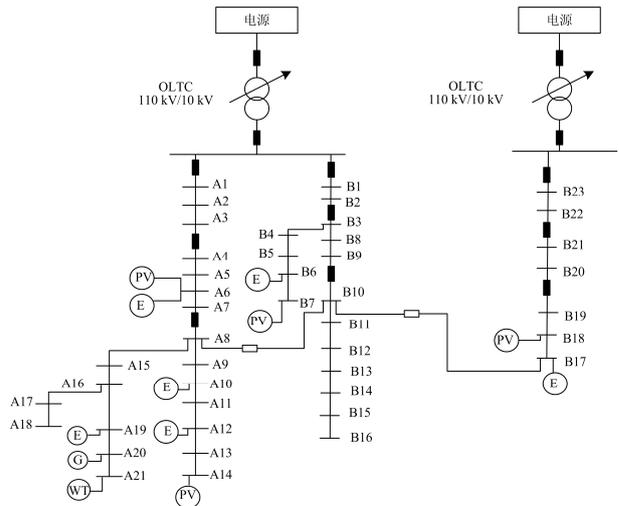


图5 含分布式能源接入的配电网仿真模型
Fig. 5 Simulation model of distribution network with distributed energy access

配电网组成元件的分布情况和容量大小详见文献[18]的具体参数，具体包括：光伏分别安置于

A6、A14、B7 和 H18, 光伏输出峰值功率分别为 500 kW、500 kW、500 kW 和 300 kW; 电池储能分别安置于 A6、A10、A12、A19、B6、B9 和 B17, 电池存储容量分别为 250kWh、250 kWh、250 kWh、250 kWh、500 kWh、500 kWh、250 kWh; 燃气轮机分别安置于 A20 和 B12, 燃气轮机输出功率分别为 300 kW 和 500 kW; 风力分别安置于 A21 和 B8, 风力输出峰值功率分别为 500 kW、300 kW。

本文在每个节点都配置一个 Agent, A6 节点同时具有光伏和电池两种单元的, 分别配置一个 Agent, 所有的 Agent 通过通信网络连接组成 MAS 系统。假设该配电网与外部电源不进行功率交换, 也就是外部电源回路断开基础上, 仅通过测试区域配电网功率影响, 以方便观察配电网调度情况, 同时假设负荷平均分布于该电网的各个节点, 负荷总量与光伏和风力两种新能源的最大发电量相等, 也就是在理想情况下, 依靠新能源最大功率发电便可满足负荷正常需求。

3.1 智能负荷不投入时

仿真中, 首先测试配电网所配置的负荷为一般负荷, 不是具有调节功能的智能负荷的情况。仿真中只采用光伏和风力两种新能源发电, 燃气轮机不投入使用, 仅投入少量的电池储能 A6。

仿真中首先假设光伏和风力开始时以峰值功率发电, 所发电能刚好满足配电网所配置的负荷需求。在 0.15 s 时由于新能源的间歇性, 由于风能变化导致风力发电减少, 观察 A1 所连接的配电网母线的电压变化情况, 如图 6 所示。

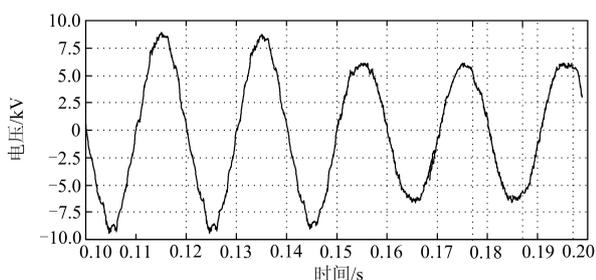


图 6 发电减少时配电网母线电压

Fig. 6 Bus voltage of the distribution network with reduced power generation

配电网的母线电压在 0.15 s 时发生了一定程度的变化, 此时, 配电网由于风力发电的减少, 导致配电网的本地供电减少, 由于仿真中已假设配电网没与外部电源相连, 整个区域配电网的功率供给减少。而配电网的负荷需求并没有减少, 整个区域配电网的供电不足以支撑负荷需求, 配电网母线电压

在 0.15 s 开始明显下降。

进一步仿真发电功率增加时区域配电网的变化情况。仿真中首先假设光伏和风力开始时虽以最大容量发电, 但受风能和光照等外界环境影响, 没达到峰值容量发电, 不足以支撑本地配电网负荷的电量需求, 电量缺口由燃气轮机发电补充。

仿真在 0.15 s 时由于风力和日照增加, 导致风力和光伏发电增加, 观察 A1 所连接的配电网母线的电压变化情况, 如图 7 所示。

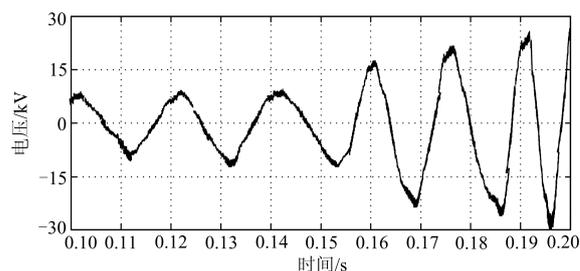


图 7 发电增加时配电网母线电压

Fig. 7 Bus voltage of the distribution network with increased power generation

配电网的母线电压在 0.15 s 时开始不稳定, 此时, 本地配电网负荷消纳一定, 而新能源不断增加发电, 由于电能没有外送, 本区域配电网的电能不断增加导致配电网不断失稳, 配电网的母线电压幅值和频率都不断增加。如果没有新增负荷或是减少发电, 使得本地配电网重新实现发电和用电平衡, 区域配电网功率失衡不断加剧情况下, 将导致整个配电网奔溃。

3.2 智能负荷投入时

仿真中只采用光伏和风力两种新能源发电, 燃气轮机不投入使用, 仅投入少量的电池储能 A6。仿真中首先假设光伏和风力开始时以峰值功率发电, 所发电能刚好满足配电网所配置的负荷需求。与图 6 仿真情况所采用的负荷不同, 本次仿真假设有 30% 的负荷为可用于调度的智能负荷。

在 0.15 s 时由于新能源的间歇性, 导致发电减少, 观察 A1 所连接的配电网母线的电压变化情况, 如图 8 所示。

0.15 s 时刻, 由于本地配电网发电减少, 发电量少于用电需求, 无法支撑配电网的电量供需平衡, 导致配电网母线电压下降。此时, 智能负荷 Agent 控制电量弹簧装置, 适当减少非关键性负荷的用电需求。当智能负荷具有的“弹性”容量能够弥补新能源发电所减少的缺口时, 配电网的功率逐步趋于平衡, 此时配电网电压也有望恢复正常。

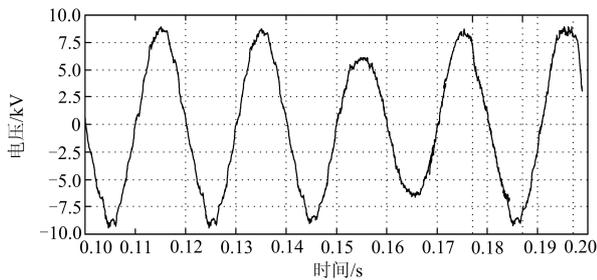


图8 基于智能负荷配电网母线电压
Fig. 8 Bus voltage of the distribution network
with intelligent load

智能负荷虽有一定的调度作用,但主要依靠非关键性负荷对电能变化的容忍度来实现,所能支持的调度容量具有一定限制,这还跟负荷特性和负荷自身大小等因素有关。另外,智能负荷是依靠电力弹簧装置的电力电子元件来控制负荷,需要一定的操作时间,用于调度时的响应时间具有延迟性,响应时间跟电力弹簧装置控制情况有关。

4 结论

1) 在含分布式能源接入的配电网调度中,通过引入智能负荷,将发电端和负荷端联合起来考虑配电网功率平衡,通过源-荷的共同作用,利用智能负荷的电能需求弹性特点,最大程度地增加新能源发电,减少备用机组和储能设备,降低新能源的间歇性发电带来的调度难题。

2) 含分布式能源接入的配电网调度涉及发电和负荷多个组成单元的协调控制,采用MAS技术,将配电网调度问题分解为配电网内各个智能体间的通信、管理、合作和控制,借助于Agent能动性、自主性和反应性等性能,较好完成含分布式能源接入的配电网调度任务。

参考文献

- [1] 徐立中, 易永辉, 朱承治, 等. 考虑风电随机性的微网多时间尺度能量优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 1-8.
XU Lizhong, YI Yonghui, ZHU Chengzhi, et al. Multi-time scale optimal energy dispatch of microgrid considering stochastic wind power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 1-8.
- [2] 王健, 谢桦, 孙健. 基于机会约束规划的主动配电网能量优化调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 45-52.
WANG Jian, XIE Hua, SUN Jian. Study on energy dispatch strategy of active distribution network using enhance-
- constrained programming[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 45-52.
- [3] 孟晓丽, 唐巍, 刘永梅, 等. 大规模复杂配电网三相不平衡潮流并行计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 45-51.
MENG Xiaoli, TANG Wei, LIU Yongmei, et al. Parallel computing of three-phase unbalanced power flow in large-scale complex distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 45-51.
- [4] 梁捷, 李刚, 王建楠. 基于字典优化法和 ϵ -约束法的双目标热电调度[J]. 热力发电, 2017, 46(10): 81-87.
LIANG Jie, LI Gang, WANG Jiannan. Double-objective heat and power dispatch based on lexicographic optimization method and ϵ -constraint technique[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(10): 81-87.
- [5] 许健, 刘念, 于雷, 等. 计及重要负荷的工业光伏微电网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 29-37.
XU Jian, LIU Nian, YU Lei, et al. Optimal allocation of energy storage system of PV microgrid for industries considering important load[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 29-37.
- [6] 高海东, 高林, 樊皓亮, 等. 火电机组实用智能优化控制技术[J]. 热力发电, 2017, 46(12): 1-5.
GAO Haidong, GAO Lin, FAN Haoliang, et al. Discussions on practical intelligent optimization control technologies for thermal power units[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(12): 1-5.
- [7] HUI S Y R, LEE C K, WU F F. Electric springs—a new smart grid technology[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1552-1561.
- [8] 陈达威, 朱桂萍. 低压微电网中的功率传输特性[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 117-122.
CHEN Dawei, ZHU Guiping. Power transmission characteristics of low voltage microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 117-122.
- [9] 蔡德华, 陈柏熹, 程乐峰, 等. 实施需求侧管理对提高发电系统可靠性的影响探究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 51-56.
CAI Dehua, CHEN Boxi, CHENG Lefeng, et al. Effective study about the implementation of demand side management on improving reliability of generation system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 51-56.
- [10] WU F F, VARAIYA P P, HUI R S Y. Smart grids with intelligent periphery: an architecture for the energy internet[J]. Engineering, 2015, 1(4): 436-446.
- [11] HUI S Y R, LEE C K, WU F F. Power control circuit and method for stabilizing a power supply: PCT, 61/389,

- 489[R]. 2012-04-05.
- [12] MOK K T, YANG T, TAN S C, et al. Distributed grid voltage and utility frequency stabilization via shunt-type electric springs[C] // 2015 IEEE Energy Conversion Congress & Exposition, September 20-24, 2015, Montreal, Canada: 3774-3779.
- [13] 刘思. 配电网空间负荷聚类及预测方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- LIU Si. Research on spatial load clustering and forecasting method of distribution network[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [14] 赵龙文, 侯义斌. Agent 的概念模型及其应用技术[J]. 计算机工程与科学, 2000, 22(6): 75-79.
- ZHAO Longwen, HOU Yibin. The concept model and application technology of Agent[J]. Computer Engineering and Science, 2000, 22(6): 75-79.
- [15] 李文云, 蒋亚坤, 雷炳银, 等. 基于 Multi-Agent 系统的含分布式电源电网能源优化管理[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 21-27.
- LI Wenyun, JIANG Yakun, LEI Bingyin, et al. MAS based energy management strategies of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 21-27.
- [16] 喻磊. 基于多代理理论的微电网分布式优化控制方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- YU Lei. Study on distributed optimization control approach for microgrid based on multi-agent theory[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [17] 周念成, 池源, 王强钢. 含非线性及不平衡负荷的微电网控制策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 61-66.
- ZHOU Niancheng, CHI Yuan, WANG Qianggang. Control strategies for microgrid containing non-linear and unbalanced loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 61-66.
- [18] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 主动配电网优化调度策略研究[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 177-183.
- YOU Yi, LIU Dong, ZHONG Qing, et al. Research on optimal schedule strategy for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 177-183.

收稿日期: 2017-09-20; 修回日期: 2017-11-26

作者简介:

刘岩(1962—), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为电力调度自动化系统运维、分析管理工作; E-mail: srfsgv546@163.com

吴以岷(1967—), 女, 博士, 工程师, 主要研究方向为电力调度自动化系统运维、分析管理工作;

徐荣敏(1975—), 男, 大专, 工程师, 研究方向为电力调度厂站自动化。

(编辑 张爱琴)