

一种基于智慧热电能源系统源端的 协调控制方案

孙海翠, 孙 漾, 周梦婕, 顾玉顺
(华东电力设计院有限公司, 上海 200063)

摘要:智慧能源对推进能源生产和消费革命, 构建清洁低碳、安全高效的能源体系起着重要作用。文中针对智慧热电能源系统如何进行源端协调控制提出了一种基于智慧能源站层级控制架构的定级排位负荷分配控制方法。通过综合考虑智慧能源系统内各能源站的综合系数, 进行排序定位以进行负荷分配协调, 并通过自动寻优与循环激活等机制促进负荷分配的可靠, 确保智慧能源系统源端有机协调、可靠经济地运行。

关键词:智慧能源; 源端; 协调控制; 定级排位

中图分类号: TM 73 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2023)02-0045-07

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230208

A Coordinating Control Scheme of Source Side Based on Electric and Heating Smart Energy System

SUN Haicui, SUN Yang, ZHOU Mengjie, GU Yushun
(East China Electric Power Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

Abstract: The smart energy will play a major role in pushing the energy production and consumption reform, as well as building a clean, low-carbon, safe and efficient energy system. A load distribution control method by sorting and positioning of hierarchical control architecture based on smart energy station is proposed herein for source-side coordinated control of electric and heating smart energy system. By considering the comprehensive coefficients of each energy station in smart energy system, sorting and positioning methods are carried out for load distribution coordination, and automatic optimization and cyclic activation mechanisms are adopted to promote the reliability of load distribution, so as to ensure the organic coordination and reliable and economic operation of source side of smart energy system.

Key words: smart energy; source side; coordinated control; sorting and positioning

0 引 言

智慧能源将先进的信息和通信技术、智能控制和优化技术与现代能源供应、储运、消费技术深度融合, 具有数字化、自动化、互动化、智能化、精确计量、广泛交互、自律控制等功能, 实现能源的优化决策和广域协调^[1]。中国自2015年首次提出“互联网+”的行动计划以来, 一系列的相关指导意见、示范项目等相继开展, 研究智慧能源的热潮随即而来, 智慧能

源成为改变高碳化的能源结构、实现能源领域可持续发展的优选战略^[2-4]。

近年来, 许多学者针对智慧能源展开了大量的研究, 文献[5-8]提出电力负荷预测的方法, 为风、光等可再生能源的调配奠定了基础。文献[9]提出考虑环境效益的多机组负荷分配优化方法, 利用设置的运行经济效益目标函数, 通过设置综合能源系统热负荷、电负荷需求等模型约束条件, 基于粒子群算法的热负荷分配多目标优化, 建立多机组负荷分配优化模型。文献[10-12]提出了综合智慧能源站智能工况动态寻优的方法, 基于电站的实时数据计算系统的经济性, 挖掘用户的用能习惯和系统特性,

基金项目:上海市“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目(20dz1205201); 中国能源建设股份有限公司重大科技专项和重点研发项目“揭榜挂帅”项目(CEEC2021-ZDYF-12)

支撑负荷的预测算法,演进寻优模型;并提出多区域综合能源系统的主动配电网双层博弈优化调度策略。文献[13]提出合同能源管理模式的电力园区节能优化及效益分配方法,通过优化光伏、燃气轮机、储能等设备的运行方式建立园区优化节能运行方案,并运用 Shapley 值法解决园区节能项目中各参与者的效益分配问题。文献[14]提出智慧能源站“多站融合”工程中交直流微电网供电系统结构,提高交直流系统的综合能效,推进智慧能源站“多站融合”试点工程的开展。文献[15]提出基于多时间尺度和多源储能的 IES 能量协调优化调度策略,以系统运行经济最优、滚动控制时域内购能成本与储能惩罚成本之和最低,以及设备输出功率调整量最小为目标,建立优化调度模型,分日前、日内和实时多个时间尺度以确保系统运行的经济性。

下面,针对智慧能源的源端提出了一种智慧热电源系统,它的一次能源端主要由太阳能电站、风能电站、燃气热电联产能源站、地热能热联产能源站等分布式可再生能源和清洁能源等构成。能源输配载体选用性能优越的电能和热能,组成高效的能源输配网络。针对能源生产源端如何有效地协调各能源站生产,使其安全、高效、经济地响应能源需求端的负荷需求,并最大效能地促进综合效益最大化,提出了由能源站基本生产控制层、能源站优化控制层和智慧能源集控层 3 层构成的层级控制架构。并针对如何进行智慧热电源系统负荷分配,提出了一种智慧热电源系统负荷分配定级排位分配控制方法,以促进智慧热电源系统集控中心协调调度各能源站,使得能源网络协调一致地进行能源生产,提高能源生产网络协作、耦合生产运行效率,促进智慧能源技术的进一步发展。

1 智慧热电源系统

智慧能源以信息化与工业化深度融合为主线^[16],将移动互联网、大数据等信息通信技术与智能电网、热能网、交通网等多种能源网络进行整合,相互紧密耦合。能源共享网络令人充满期待,但通往智慧能源目标的征途中,还有很多工作要做。下面聚焦于可再生能源和清洁能源的利用,组建一种智慧热电源系统,系统组成如图 1 所示。

所提智慧热电源系统的能源供应中心,由太

阳能热发电站(配置储能系统)、分布式光伏系统(配置储能系统)、风能发电站、燃气热电联产能源站、地热能热电联产能源站等组成,此为能源生产端的组成构架,实际应用中依据工程规划与实施确定。

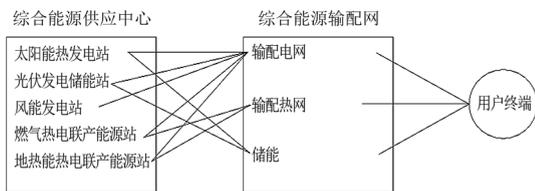


图 1 智慧热电源系统

上述综合能源供应中心,有电能和热能的协调,也有储能系统的调节作用。如何在智慧能源集控中心有效地协调各种能源生产,以使各能源站既有机协作又平稳可靠地响应负荷端的需求是系统稳定运行的必要前提。

2 智慧热电源系统协调控制方案

智慧能源供应网络是由独立能源站有机组合而形成的能源供应体系,作为一个相互协同的能源供应网络,它高效运行的前提是各个能源供应站点科学有效的耦合、协调,以使智慧能源供应网络及时响应输配网络能源供给需求,优化功率分配控制,最优化配置智慧能源网络中各能源站的出力。

智慧能源协调控制功能是布置于各分布式能源站上层的高层控制中心,控制对象是智慧能源集控中心下辖的有机组合在一起的能源分站。若要实现智慧能源集控中心全局能源协调控制功能,需要满足以下条件:

- 1) 能源分站作为独立个体,具有高度自动化水平,减少运行人员干预且控制性能稳定可靠;
- 2) 能源分站能够快速、准确地响应智慧能源集控中心指令,彻底消除控制盲区,确保控制指令的深度、全方位下达与执行;
- 3) 能源分站具有智能检测、设备诊断、性能分析、价格成本分析等功能,本体是功能完善的智能个体。

智慧能源协调控制系统为一个层级控制架构,整体由 3 个层级组成,分别为能源站基本生产控制层、能源站优化控制层和智慧能源集控层,如图 2 所示。

底层智慧能源站基本生产控制层完成各能源站作为独立个体的高度自动控制功能,使能源站在接受上层能量输出指令时能按照其内部层级控制功

能,调动机组、系统、子系统至设备协调一致地响应能源站接受的能量生产输送需求。

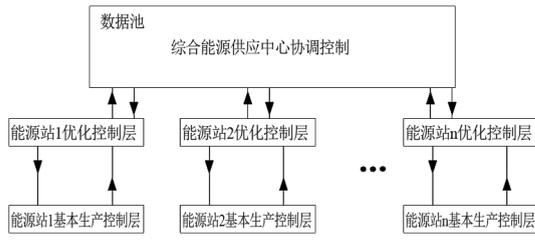


图2 智慧能源协调控制系统

智慧能源站优化控制层共享生产实时数据,建立能源站工艺系统和设备的性能数学模型,在线计算、分析、评价电厂技术经济指标和设备的性能指标,实时监测能源站运行的性能。智慧能源站优化控制层还将部署设备状态监测与预测性维护系统,以完成实时监测系统设备状态、分析系统设备的健康安全系数等。同时,智慧能源站优化控制层还能根据采集的能源站实时输出负荷信息以及性能计算分析、系统设备分析等信息,计算分析其实时可增减负荷潜能值,用于智慧能源网进行负荷分配的计算。

智慧能源集控中心位于由各能源站汇集而成的能源池,进行全局监测和控制,实现智慧能源源端输出与能源输配网络能源需求的匹配,并按需求进行能源站能源生产任务的协调优化分配,控制智慧能源网络有机匹配,运行稳定。

智慧能源控制功能的实现是将能源站数据与智慧能源集控层数据全线贯通。数据按照需求流向自下而上进行传递,将下层生产状态数据、系统设备安全健康状态等传递给上层指令层进行分析决策。同时数据自上而下传递,将上层做好的指令数据下传至能源站进行能源生产。因此,稳定可靠的数据平台是整个系统安全可靠运行的重中之重。

同时,消除智慧能源系统运行中的各种扰动,确保能源网络安全、稳定、可靠的运行,保证功能站在站组发生异常工况时,各子系统之间相互配合、切换和调节到安全状态,不致产生严重后果。

3 智慧热能电源系统负荷分配控制方案

智慧热能电源系统协调控制,需要解决智慧能源集控中心如何合理分配能源输配网络能源的供给需求。针对图1所示的智慧能源网络提出了一种定级排位分配控制方法。

设定智慧能源供应站配置多种类型能源站。为了提高能源站能源生产效率、提升经济性能,依据能源站特点设定多种能源生产模式。如太阳能热发电站、光伏发电储能站进行电能生产,同时配备储能系统以增加系统调节的灵活性。燃气电站和地热能源站进行热电联产。模型仅给出一种可能的匹配方式,而在实际应用中依据区域性发展战略和特点创建的能源供应站同样适用下面所述的控制方案。

智慧能源负荷分配控制方案首先判断热电联产能源站的运行模式是否为“发电主导”模式,即该能源站首要任务是响应发电需求。若该能源站处于“发电主导”模式,则被送入发电分配序列,等待进行发电负荷分配;若该能源站不处于“发电主导”模式,则被送入供热分配序列,等待进行供热负荷分配。智慧能源负荷分配控制如图3所示。

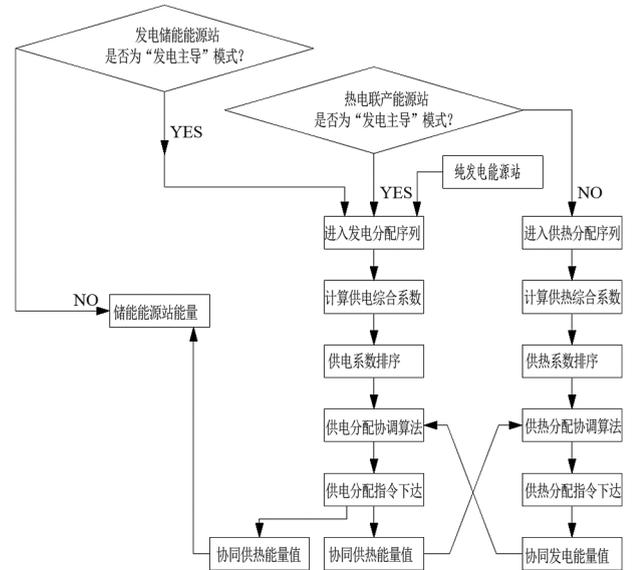


图3 智慧能源负荷分配控制

所提出的针对智慧热能电源系统源端进行的发电和供热能源之间的协调,即对于智慧能源站本体的发电和供热之间的协调由能源站控制层实现,智慧能源集控层将依据能源站传送的“发电主导”模式或“供热主导”模式信号,将其引接入对应的能源分配控制程序行列,以进行对应能源的协调控制功能实现。进入发电分配序列的能源站将执行计算供电综合系数程序,根据计算的供电综合系数进行分配排序。

排序后进入供电分配协调算法模块进行分配负荷计算,然后将计算指令数值下达到对应能源站。供热分配程序与上述发电分配程序类似,即判断能

源站是否为“供热主导”模式。若该能源站处于“供热主导”模式,则其被送入供热分配序列,等待进行供热负荷分配,后续执行供热负荷分配功能。

4 负荷分配定级排位分配控制方法

智慧能源负荷分配定级排位分配控制方法采用最优排序思路进行能源站负荷分配,基本思想是考量能源站当前时刻区间的性能系数,以计算其综合最优系数值进行排序,即最优功能站最先进行任务领取,依次类推,以完成负荷需求的分配。

供电综合系数的计算如式(1)所示。

$$\sum_{k=m_1}^{m_2} b_i^k = \sum_{k=m_1}^{m_2} (p_i^k \times e_i^k \times s_i^k \times q_i^k \times c_i^k) \quad (1)$$

式中: b_i^k 为第*i*个能源站*k*时刻供电综合系数; p_i^k 为第*i*个能源站*k*时刻性能系数; e_i^k 为第*i*个能源站*k*时刻经济系数; s_i^k 为第*i*个能源站*k*时刻安全系数; q_i^k 为第*i*个能源站*k*时刻供电质量系数; c_i^k 为第*i*个能源站*k*时刻调节系数。

式(1)计算时间区间为 $[m_1, m_2]$ 的综合系数,以避免能源协调的频繁扰动。

式中综合考虑能源站性能系数,以考量能源站性能指标是否处于较佳的状态,同时经济系数将实时计算当前时刻该能源站成本参数,以确定相对于智慧能源网络其经济系数水平。能源站设置的缜密的智能监测仪表将全方位监测能源站系统、设备运行的健康状态,并计算其对应的健康系数。供电质量系数用以评价能源站生产电能的质量,确定其接入能源网络的质量水平。调节系数为能源站由于特别事项而引入的设定系数,如机组大修、特殊运行条件、特殊分配考量等,默认值可设为1。

为了增强综合系数的评价调节效果,引入评价矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} r_1^k \\ r_2^k \\ r_3^k \\ r_4^k \\ r_5^k \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, r_n^k 为*k*时刻调节系数第*n*项系数评价权值。引入评价矩阵 R 后,能源站供电综合系数由智慧能源集控中心根据能源网络调控政策、季节因素、市场

因素等进行评价矩阵赋值以调整各能源站各项系数权值,增强不同时段综合系数计算的适配性。以上参数获取将于智慧能源协调控制系统能源站优化控制层完成。

$$\begin{bmatrix} p_1^k & e_1^k & s_1^k & q_1^k & c_1^k \\ p_2^k & e_2^k & s_2^k & q_2^k & c_2^k \\ p_3^k & e_3^k & s_3^k & q_3^k & c_3^k \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_i^k & e_i^k & s_i^k & q_i^k & c_i^k \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} r_1^k \\ r_2^k \\ r_3^k \\ r_4^k \\ r_5^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1^k \\ b_2^k \\ b_3^k \\ \dots \\ b_i^k \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据式(3)计算的综合系数计算数值将各能源站进行排序,各排序位置能源站依据下述方法进行负荷分配。

假设智慧能源网络*k*时刻(即时间区间 $[m_1, m_2]$)电能总需求为 W^k 。首先考虑热电联产类型能源站的以热定电模式可提供的对外供电总量,求得待分配供电需求总量为

$$W_d^k = W^k - \sum W_{HUO} \quad (4)$$

式中: W_d^k 为*k*时刻待分配供电需求总量; $\sum W_{HUO}$ 为以热定电模式热电联产类型能源站总计供电总量。

分配供电需求总量 W_d^k 将首先分配给排序第一位的能源站 UO_1 。假设*k*时刻能源站 UO_1 的发电能力是 U_1^k ,则分配给其负荷任务位 U_1^k 。完成该步,将进入排序第二位能源站的负荷分配,假设*k*时刻能源站 UO_2 的发电能力是 U_2^k ,则分配给其负荷任务为 U_2^k 。依次类推,完成待分配供电总量的分配。智慧能源负荷分配控制算法如图4所示。

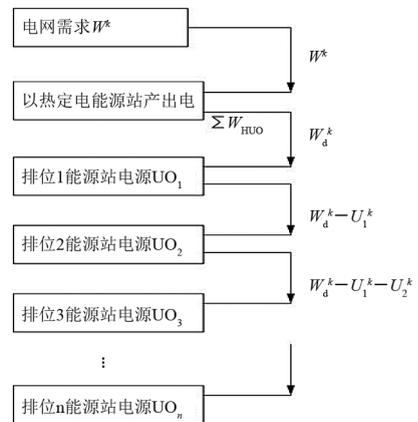


图4 智慧能源负荷分配控制算法

假定按照上述分配机制分配完完整功能站,即功能站可用负荷能力被完整分配结束,剩余待分配供电需求总量为 W_{dr}^k ,则

$$W_{dr}^k = W_d^k - \sum U_i^k \quad (5)$$

剩余待分配供电需求总量为 W_{dr}^k 的处理方法采用基于自动寻优机制与循环激活加负荷机制相结合的处理方法。设定定级排位分配控制方法进行负荷分配至排位 p 的能源站时,当 W_{dr}^k 低于排位 p 能源站发电能力 U_p^k ,则控制器进行判断 W_{dr}^k 是否大于排位 p 能源站经济负荷低限。若成立,则将剩余待分配供电需求总量 W_{dr}^k 分配给排位 p 的能源站;若不成立,则顺次向下寻优,即判断 W_{dr}^k 是否大于排位 $p+1$ 能源站经济负荷低限。若成立,则将剩余待分配供电需求总量 W_{dr}^k 分配给排位 $p+1$ 的能源站;否则,依据上述寻优原则继续向下进行寻优。

若寻优至排位最后的能源站仍未完成能源分配,将执行循环激活加负荷机制,进行第二轮次的加负荷分配。其基本做法为,剩余待分配供电需求总量 W_{dr}^k 进入排位 1 能源站,并判断排位 1 能源站是否有加负荷潜能,若有加负荷能力,则进行排位 1 能源站加负荷,加负荷量等于优化控制层计算数值;若能源站 1 不具备加负荷能力,则分配控制功能继续向下进行排位 2 能源站加负荷,加负荷方法同排位 1 能源站。该方法依次向下循环,直至负荷分配完毕。智慧能源负荷分配之残余负荷控制方法详见图 5。

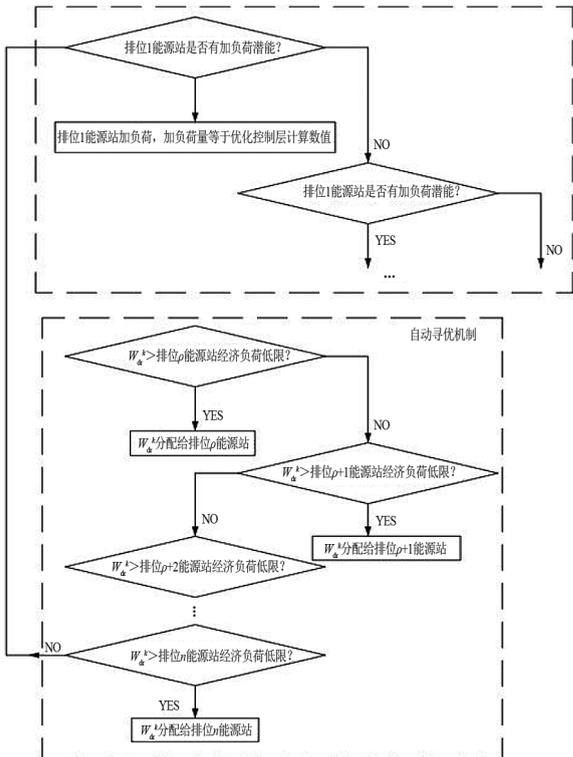


图 5 智慧能源负荷分配之残余负荷控制

为了确保智慧能源系统集成控制中心负荷分配的稳定性,避免出现大范围的波动影响系统的性能。采用圈内序列维稳及出圈关键信号确认机制来解决不同时间区间平稳切换负荷分配的功能。下面将某一时刻,对应某一区间内的序列中已分配负荷且平稳运行的能源站,定义为圈内能源,同时将该序列中未被分配负荷处于停止状态的能源站定义为圈外能源站。设定 k_1 时刻(即时间区间 $[m_1, m_2]$) 对应序列 S_1 的已执行圈内能源站序列为 $\{UO_1^{k_1}, UO_2^{k_1}, UO_3^{k_1}, \dots, UO_n^{k_1}\}$, k_2 时刻(即时间区间 $[m_2, m_3]$) 对应序列 S_2 的计算圈内能源站序列为 $\{UO_1^{k_2}, UO_2^{k_2}, UO_3^{k_2}, \dots, UO_n^{k_2}\}$ 。此时进行序列 S_1 的圈内能源站与序列 S_2 的圈内能源站的模糊比对具体为:1) 当判断某能源站既在序列 S_1 的圈内能源站又在序列 S_2 的圈内能源站时,则维稳运行,等待负荷分配函数进行负荷指令下达。2) 序列 S_1 的已执行圈内某能源站不在序列 S_2 的计算圈内能源站时,执行出圈关键参数确认法,运算程序搜索针对该能源站的关键参数,如停机指令、设备故障、手动指令等。若搜寻到,则执行该能源站退圈指令;若未搜寻到,则维稳运行,继续保持该能源站在圈内运行,直到其排序超出运行圈排序一定值时,退出运行圈并发起报警。3) 当判断序列 S_2 的计算圈内能源站不在序列 S_1 的已执行圈内能源站内时,也就是说新的序列中,该能源站的排位计算进入圈内时,将执行负荷分配等待机制,即等待运行圈内负荷分配有余量时,新进圈的能源站将接收指令进行能源生产。

所述智慧热电源系统源端协调控制方案以电源系统协调分配为主,热源系统协调分配实现原理和机制与其类似。

5 算例分析

以某市某日各时段智慧能源系统源端用电需求为例,如图 6 所示。根据用电负荷的长期规律设定 23:00—4:00 为时段 1, 5:00—10:00 为时段 2, 11:00—16:00 为时段 3, 17:00—22:00 为时段 4。

智慧能源系统源端网络设置能源站情况如表 1 所示。

根据智慧能源站生产实时数据库数据以及计算模型等获取某时段能源站的各项系数数值如表 2 所示。设定该时段评价矩阵 $R = [0.2, 0.2, 0.3, 0.3, 1.0]^T$,

根据所提方法计算各能源站的综合系数如表 2 所示。

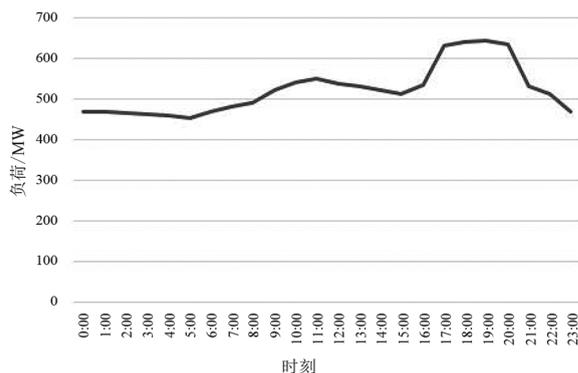


图 6 智慧能源用电需求

表 1 智慧能源系统站点构成

| 能源站 | 发电额定功率/MW | 能源站 | 发电额定功率/MW |
|-----|-----------|-----|-----------|
| 站 A | 100 | 站 E | 32 |
| 站 B | 60 | 站 F | 70 |
| 站 C | 200 | 站 G | 200 |
| 站 D | 45 | 站 H | 100 |

表 2 某时段智慧能源系统站点综合系数

| 能源站 | 性能系数 | 经济系数 | 安全系数 | 供电质量系数 | 调节系数 | 综合系数 |
|-----|------|------|------|--------|------|-------|
| 站 A | 0.89 | 0.96 | 0.92 | 0.86 | 1.00 | 1.904 |
| 站 B | 0.92 | 0.70 | 0.84 | 0.86 | 1.00 | 1.834 |
| 站 C | 0.80 | 0.88 | 0.78 | 0.85 | 1.00 | 1.825 |
| 站 D | 0.86 | 0.85 | 0.89 | 0.91 | 0.89 | 1.772 |
| 站 E | 0.84 | 0.85 | 0.81 | 0.80 | 0.90 | 1.721 |
| 站 F | 0.77 | 0.86 | 0.87 | 0.78 | 0.85 | 1.671 |
| 站 G | 0.84 | 0.88 | 0.76 | 0.83 | 0.77 | 1.591 |
| 站 H | 0.93 | 0.72 | 0.67 | 0.84 | 0 | 0.783 |

根据智慧能源系统集成中心实时数据测算的能源站排位序列如表 3 所示。

表 3 智慧能源系统案例时段序列

| 时段 1 | 时段 2 | 时段 3 | 时段 4 |
|------|------|------|------|
| 站 A | 站 B | 站 B | 站 G |
| 站 B | 站 C | 站 C | 站 B |
| 站 C | 站 D | 站 D | 站 C |
| 站 D | 站 A | 站 G | 站 D |
| 站 E | 站 F | 站 F | 站 F |
| 站 F | 站 E | 站 E | 站 E |
| 站 G | 站 G | 站 A | 站 A |
| 站 H | 站 H | 站 H | 站 H |

时段 1 内,用电需求与排位序列协调一致,此时进入发电供给的能源站 A/B/C/D/E/F 将协调负荷总用电需求量。时间段 2 内,用电需求增加,按照排位序列的能源站 G 虽然满足序列的要求,但因其不

符合经济运行需求,因此激活下一位能源站 H 进入发电供给序列。时段 3 内,用电需求基本稳定,此时能源站 H 运行稳定,为了维稳,采取序列靠前的能源站 E 暂时等候。时段 4 内,用电需求进一步增加,能源站出现关键参数确认退出情况,此时按照排律序列进行发电供给的能源站 G/B/C/D/F,计算能源站 E 进入发电供给序列将不满足整体经济性能,因此跳步选择能源站 A。针对本案例,进行智慧能源系统源端协调分配,如图 7 所示。

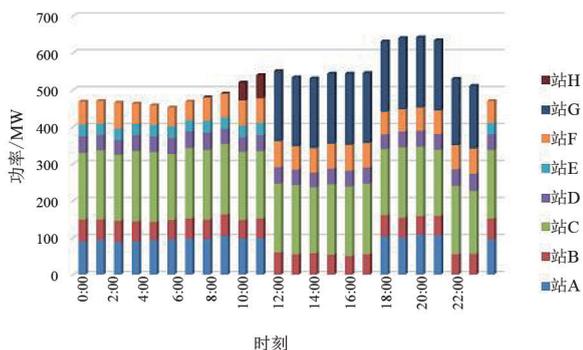


图 7 智慧能源系统案例站点协调

从图 7 可知,智慧能源系统源端协调按照定级排位分配控制方法进行协调匹配,同时兼顾系统运行过程中稳定性需求与经济性运行需求,以匹配最优的协调方案。

6 结 论

智慧能源通过能源基础设施和信息技术的深度融合,形成了一张泛在、融合、智能、低碳的能源互联网络,并形成与之相适应的以可再生能源为重点的分布式能源供应与消费系统,对提高能源供需协调能力、推动能源清洁生产、促进可再生能源消纳具有重要的现实意义和深远的战略意义。上面提出了一种分布式可再生能源和清洁能源组成的智慧热电源系统,主要内容及结论如下:

1) 针对智慧能源供应网络,提出了基于智慧能源站为能源互联网网络节点,以数据贯通为数据流流线,以智慧能源系统集成中心为总指挥中心的层级控制架构。整体由 3 个层级组成,分别为能源站基本生产控制层、能源站优化控制层和智慧能源集控层。

2) 针对智慧能源系统源端的负荷协调分配问题,提出了一种负荷分配定级排位分配控制方法,综合考虑智慧能源系统内各能源站的运行性能、经济性能、安全性能,并设置调节系数,以解决智慧能源

系统内能源站调配的其他非设定因素、偶然因素、主观因素等,使智慧能源系统集成中心的负荷协调分配策略综合优化。

3) 针对智慧能源系统源端的负荷协调分配的定级排位分配控制方法,提出了通过自动寻优与循环激活等机制促进负荷分配的可靠;通过圈内序列维稳及出圈关键信号确认机制避免系统大的波动,确保智慧能源系统源端有机高效协调。

参考文献

- [1] 冯庆东.能源互联网与智慧能源[M].北京:机械工业出版社,2015.
- [2] 梁海峰,李晓航,高亚静.首批“互联网+”智慧能源示范项目特点研究[J].电力科学与工程,2018,34(9):1-7.
- [3] 陈以明,李治.智慧能源发展方向及趋势分析[J].动力工程学报,2020,40(10):852-858.
- [4] 成蓉,刘彤.加快区块链技术创新赋能实体经济[EB/OL].(2019-10-30).[2022-06-17].http://m.xinhuanet.com/tech/2019-10/30/c_1125168864.htm.
- [5] 王金玉,金宏哲,王海生,等. ISSA 优化 Attention 双向 LSTM 的短期电力负荷预测[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(5):111-117.
- [6] 祝文军,王思宁,高晓欣,等.基于知识流和迁移学习的负荷预测[J].电信科学,2022(5):114-123.
- [7] 朱清智,董泽,马宁.基于即时学习算法的短期负荷预测方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(7):92-98.
- [8] 胡威,张新燕,李振恩,等.基于优化的 VMD-mRMR-LSTM 模型的短期负荷预测[J].电力系统保护与控制,2022,50(1):88-97.
- [9] 杜玉吉,林小杰,张晓灵,等.智慧区域能源系统设计与

调控关键技术与应用[J].中国科技成果,9(19):38-42.

- [10] 吕宝龙,王海军,赵鸿飞,等.综合智慧能源站智能工况动态寻优系统研究[J].科学技术创新,2021(1):107-110.
- [11] 杨海柱,李梦龙,江昭阳,等.考虑需求侧电热气负荷响应的区域综合能源系统优化运行[J].电力系统保护与控制,2020,48(10):30-37.
- [12] 李咸善,马凯琳,程杉.含多区域综合能源系统的主动配电网双层博弈优化调度策略[J].电力系统保护与控制,2022,50(1):8-22.
- [13] 贾楚蕴,李华强,高红均.基于合同能源管理的园区能耗优化及多主体利益分配研究[J].新能源,2020,48(10):30-36.
- [14] 周星,刘江敏,褚农,等.智慧能源站“多站融合”工程中交直流微网系统研究[J].电测与仪表,2022,59(6):27-32.
- [15] 何畅,程杉,徐建宇,等.基于多时间尺度和多源储能的综合能源系统能量协调优化调[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(2):77-84.
- [16] 颜拥,陈星莺,文福拴,等.从能源互联网到能源区块链:基本概念与研究框架[J].电力系统自动化,2022,46(2):1-14.

作者简介:

孙海翠(1982),女,硕士,高级工程师,主要从事发电厂仪控与智能化设计研究;

孙 漾(1984),男,博士,高级工程师,主要从事发电厂仪控与智能化设计研究;

周梦婕(1988),女,硕士,工程师,主要从事发电厂仪控与智能化设计研究;

顾玉顺(1992),男,硕士,工程师,主要从事发电厂仪控与智能化设计研究。(收稿日期:2022-07-19)

(上接第7页)

- [51] YANG J N, MANNING S D. Stochastic crack growth analysis methodologies for metallic structures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1990, 37(5):1105-1124.
- [52] 王世村,孙炳楠,叶尹.自立式单杆输电塔顺风向风振疲劳分析[J].浙江大学学报(工学版),2005(12):1880-1884.
- [53] 李天,李杰,沈祖炎.高压变电站抗震可靠性分析(二)[J].地震工程与工程振动,2000(4):37-43.
- [54] 李天,李杰,沈祖炎.高压变电站抗震可靠性分析(一)[J].地震工程与工程振动,2000(3):43-49.
- [55] 李杰.生命线工程的研究进展与发展趋势[J].土木工程学报,2006(1):1-6.
- [56] 郭惠勇,张陵,蒋健.电力电容器组架结构抗震性能的

优化分析和计算[J].工程抗震,2002(4):31-36.

[57] 李亚琦.电瓷型高压电气设备体系抗震性能分析[D].北京:中国地震局地球物理研究所,2002.

[58] 张伯艳,杜修力,吴忠,等.550 kV 高压开关抗震性能计算分析[J].工程抗震,1999(2):34-37.

[59] 刘晓明,曹云东,王尔智,等.220 kV 高压 SF₆ 电流互感器抗震性能分析[J].变压器,2001(2):21-24.

[60] 郭振岩.变压器抗地震性能的研究[J].变压器,2005(S1):13-31.

作者简介:

刘敬华(1977),男,硕士,教授级高级工程师,研究方向为输电线路工程;

李 鹏(1987),男,博士研究生,研究方向为结构工程;

汉京善(1992),男,硕士,工程师,从事输电线路在线监测工作。(收稿日期:2022-08-28)