

信息物理融合的电力系统日前-日内优化调度

程凯,王鹏宇,包涛,俞靖一,张子昊

(南方电网数字电网研究院有限公司,广东 广州 510000)

摘要:原有的电力系统调度模型是物理模型与信息模型分立的。建立信息物理融合的电力系统调度模型,可以充分分析与挖掘可调资源的调节能力,扩大电力系统可调度空间,增强电网对可再生能源的消纳能力。为此以我国现有电力系统调度框架为基础,提出了一种信息物理融合的电力系统日前-日内调度框架,在此框架下对电力系统源-网-荷建模,形成信息物理融合的电力系统日前-日内调度模型。基于所建模型,以经济调度为目标,提出了电力系统日前-日内优化调度策略。算例分析验证了所提策略的有效性,结果表明电力系统的信息物理融合建设可以降低系统的运行成本。最后指出在电力系统的信息物理融合建设过程中应以目标为导向,建设多时间尺度的分层级信息物理融合电力系统。

关键词:信息物理融合;电力系统调度框架;日前-日内;多时间尺度

中图分类号:TM73 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed24228

Day-ahead and Intra-day Optimal Dispatching of Cyber-physical Integrated Power System

CHENG Kai, WANG Pengyu, BAO Tao, YU jinyi, ZHANG Zihao

(Digital Grid Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510000, Guangdong, China)

Abstract: The original power system dispatching model is separated from physical model and information model. Establishing a cyber-physical integrated power system dispatching model can fully analyze and explore the regulation ability of adjustable resources, expand the dispatchable space of power system, and enhance the grid's ability to consume renewable energy. Based on the existing power system dispatching framework in China, a cyber-physical integrated day-ahead and intra-day dispatching framework for the power system was proposed, under which the source-grid-load model of the power system was established to form a cyber-physical integrated day-ahead and intra-day dispatching model for the power system. Based on the proposed model, the optimal day-ahead and intra-day dispatching strategy was proposed with the objective of economic dispatching. The effectiveness of the proposed strategy was verified by example analysis, and the results show that the construction of cyber-physical integration in power systems can reduce the operation cost of system. Finally, it was pointed out that the construction of multi-timescale hierarchical cyber-physical integrated power system should be goal-oriented in the process of cyber-physical integration construction of power system.

Key words: cyber-physical integration; power system dispatching framework; day-ahead and intra-day; multi-timescale

2021年两会碳达峰、碳中和被首次写入政府工作报告。大规模可再生能源并网供电将成为电网运行常态,然而可再生能源发电调节性能差,仅通过发电侧调节无法满足电力系统实时功率平衡需求,信息物理融合的电力系统建设可充分挖掘全网可调资源的调节能力,扩大电力系统可调度空间,增强电网对可再生能源发电功率的消纳能力。

传统电力系统优化调度一般寻求较长时间周期内符合电网安全约束的发电机组经济调度。文献[1]以月为单位考虑大型发电机组组合,在长时间范围内实现节能发电调度;文献[2]建立电力系统源-网-荷成本模型,以实现电力系统日前调度对全局运营成本的优化,并为电网电价制定提供参考;文献[3]针对电力系统日内滚动经济调度问题,提出了采用Benders分解法构建主、子问题

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(SYKJXM20210054)

作者简介:程凯(1995—),男,硕士,研究员,Email: chengkai@csg.cn

迭代求解,解决了电力系统调度的非线性问题;针对电力交易机构双边交易安全预校核问题,文献[4]提出了一种功率域到电量域的映射方法,可直接校核交易电量是否满足电网安全约束。

近年来随着需求侧响应的不断发展,电网将需求侧资源调度计划纳入电力调度范围。文献[5]建立了各种需求侧资源模型,并考虑其对电力系统调度的影响;文献[6]以碳交易为背景分析了以虚拟电厂为代表的的需求侧资源参与碳交易对电网调度的影响;文献[7]考虑了风力发电不确定性,设计了一种机组间的备用机制,提升了可再生能源接入的电力系统的鲁棒性;文献[8]则分析了需求侧资源响应电网调度后,其自身的经济优化问题;文献[9]基于非支配排序遗传算法-II(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)设计了一种智能电网源荷协调经济调度方法;文献[10]将上述方法应用于国内电网调度以验证其有效性。

随着国内外需求侧响应资源信息化与市场化的快速发展,需求侧资源已经被验证具有全面响应电网各类调度指令的能力。文献[11]总结了近年来国内外需求侧响应市场的建设情况,并指出了我国需求侧响应市场的建设方向;文献[12]则建立了需求侧资源参与能量市场和备用辅助服务市场的联合出清模型;文献[13]则基于我国电力系统分层分区的现状提出了一种需求侧资源参与电能量市场和辅助服务市场的联合优化方法。

上述研究充分说明了需求侧调节在电力系统调度中起到的重要作用,但其研究角度均为需求侧资源如何更优地响应电力系统调度指令,以及电网调度如何获取更优的经济调度目标。随着物联网、大数据等信息技术的飞速发展,电网向数字化逐步转型,实现了信息系统和物理系统的深度融合。然而现有的调度研究都聚焦于物理系统侧,未充分考虑信息系统对调度带来的影响。一方面将信息物理融合技术引入到电力系统中,建立信息物理融合的电力系统,有利于充分挖掘信息物理融合后带来的能力提升,增强电力系统在经济调度过程中可调度资源的可观性和可控性,从而提升可调度资源的综合调节性能。另一方面对于发电侧和需求侧,可以提升发电侧的物理信息到需求侧的传导效率,减小电力系统调度中源荷信息差,以利用需求侧的主动调

节实现大规模的可再生能源消纳。另外建设不同的信息物理融合程度的电网,建设成本、取得效益也不尽相同,因此在建设信息物理融合的电力系统前应明确其建设目标。

为此本文将信息物理融合技术引入到电力系统中,提出了信息物理融合的电力系统日前-日内调度框架,建立了信息物理融合的电力系统调度模型,并提出了一种信息物理融合的电力系统日前-日内优化调度策略。基于对算例结果的分析,讨论了电力系统信息物理融合建设对实现经济调度目标的影响,指出在电网数字化建设过程中应以目标为导向,建设多时间尺度的分层级信息物理融合电力系统。

1 信息物理融合电力系统日前-日内调度架构

提出信息物理融合的电力系统日前-日内调度框架,该框架综合考虑电力系统中发电侧资源与需求侧可调度资源的统一调度问题,为建立信息物理融合的前-日内调度模型打下基础。

1.1 传统电力系统日前-日内调度架构

传统电力系统日前-日内调度问题被描述为电网安全约束下的经济调度问题,经过多年的发展已有成熟的体系架构,其根据负荷预测曲线,安排发电侧的启停计划与发电功率,实现电网内发用电功率平衡,维持电网中电压幅值与频率的稳定。电力系统日前调度计划所安排的发电侧启停计划与发电功率需满足两部分要求:一是发电功率与预测负荷功率的平衡,二是预留备用容量以满足电网实时运行的功率平衡要求。电力系统日内调度计划是依据超短期负荷预测与日前调度计划所制定的^[14],在日前调度计划所安排的发电侧启停指令基础上,日内调度计划形成发电机组发电功率指令,日内调度计划同样包括功率平衡和备用两部分。传统电力系统调度框架下,电网中负荷用电功率高峰与用电功率低谷均由发电侧启停与功率调节平衡,二次调频与一次调频均利用发电侧备用容量自动调节^[15]。

1.2 信息物理融合的电力系统日前-日内调度架构

基于我国电力调度的信息系统建设基础,提出信息物理融合的电力系统日前-日内调度架构。本框架中日前调度以负荷预测曲线和可再生能源发电曲线为依据,制定符合电网安全约束的可再生能源消纳计划、需求响应计划和火电机

组发电计划,基于日前调度计划和超短期预测,日内调度输出可再生能源消纳计划、需求响应指令和火电机组发电指令,并明确各可调度资源所预留的备用功率。鉴于我国需求侧响应建设仅为日前市场,不存在日内新增的可调度需求侧资源,可再生能源发电与火力发电在日内均无可新增设备,因此日内可调度资源集合应为日前可调度资源集合的子集。

2 信息物理融合电力系统日前-日内调度模型

2.1 电力系统源-网-荷对象模型

本节针对电力系统调度问题所涉及的特征,以特征向量的形式分别建立电力系统源-网-荷对象模型。

2.1.1 电源模型

电源模型如下:

$$G_I = (P_U^{G_I}, P_L^{G_I}, \Delta P^{G_I}, T_{\min}^{G_I}, P_t^G, p_t^G) \quad (1)$$

式中: $P_U^{G_I}, P_L^{G_I}$ 分别为第 I 个电源输出功率上、下限; ΔP^{G_I} 为第 I 个电源最大爬坡速率; $T_{\min}^{G_I}$ 为第 I 个电源最小连续开机时间; P_t^G 为电源可输出最大功率向量,向量长度为96; t 为间隔15 min的96个时段, $t \in [1, 2, \dots, 96]$; p_t^G 为第 I 个电源的不确定度,传统火电机组为0,可再生能源发电机组不确定度取值为(0,1)。

当电源为火电机组时, $P_t^G = P_U^{G_I}$;当电源为可再生能源发电机组时, $P_t^G = P_{pt}^{G_I}$ 。

式中: $P_{pt}^{G_I}$ 为可再生能源发电功率在 t 时段的预测值。

2.1.2 电网模型

电网模型如下:

$$L_{ij}^k = (Z_k, S_{\max}^k) \quad (2)$$

式中: L_{ij}^k 为连接第 i 个电网节点与第 j 个电网节点的线路, k 为线路编号; Z_k 为 k 线路等效阻抗; $S_{\max}^k$ 为 k 线路传输容量上限。

2.1.3 可调节负荷模型

可调节负荷模型只考虑电力系统调度机构可调度的需求侧资源,具体表示为

$$D_r = (P_L^{D_r}, P_U^{D_r}, P^{D_r}, \Delta P^{D_r}, T_{\min}^{D_r}, p_r^{D_r}) \quad (3)$$

式中: $P_L^{D_r}$ 为第 r 个需求侧资源的功率调节下限向量,向量元素为各调度时段需求侧资源申报的调节量下限; $P_U^{D_r}$ 为第 r 个需求侧资源的功率调节上限向量,向量元素为各调度时段需求侧资源申报的调节量上限,未申报则为0; P^{D_r} 为第 r 个需求侧

资源功率转移向量,表征激励型需求响应后该可调度资源的负荷反弹量,若该可调节负荷不参与激励型需求响应则该向量为零向量; ΔP^{D_r} 为第 r 个需求侧资源调节速率; $T_{\min}^{D_r}$ 为第 r 个需求侧资源最小调节时间; $p_r^{D_r}$ 为第 r 个需求侧资源不确定度。

2.2 电力系统可调度资源的信息物理融合关系

信息物理融合程度对电力系统调度资源的利用范围存在影响,为此,需要建立信息物理融合程度与电力系统可调度资源的可观可控性的关系,具体表现为信息物理融合建设成本对电网可调度资源参与电网调节的类型和不确定度。

信息物理融合建设成本与可调度资源参与电网调节类型关系如下:

$$r_a^w = \begin{cases} 0 & F > f_a^w \\ 1 & F \leq f_a^w \end{cases} \quad (4)$$

式中: r_a^w 为第 w 类可调度资源参与第 a 种电网调节类型,0为不参与,1为参与; F 为信息物理融合建设成本; f_a^w 为第 w 类可调度资源参与第 a 种电网调节类型的成本门槛。

式(4)表明当信息物理融合建设成本 F 不超过成本阈值 f_a^w 时, r_a^w 为1,即可调度资源参与调度;反之,当建设成本 F 超过临界值 f_a^w 后, r_a^w 为0,即可调度资源不参与调度。这样某类调度资源随着其信息物理建设成本的增加而降低被调度的可能性,从而节省建设成本。可调度资源类型 w 分为电源 G 和负荷 D 两种,电网调节类型 a 根据时间尺度不同划分为日前调度、二次调频、一次调频,分别对应 a 为1,2,3。

信息物理融合建设成本与可调度资源参与电网调节不确定度关系如下:

$$q_a^w = \begin{cases} k(F - f_m) & f_a^q \leq F \leq f_{(a+1)}^q \\ 0 & F \geq f_{(a+1)}^q \end{cases} \quad (5)$$

式中: q_a^w 为第 w 类可调度资源参与第 a 种电网调节的不确定度; k, f_m 分别为线性拟合系数; $f_a^q, f_{(a+1)}^q$ 分别为建设成本 F 的上、下限。

要求 q_a^w 在闭区间 $[f_a^q, f_{(a+1)}^q]$ 是连续的,即不确定度随着成本的增加连续降低。

定义参与第 a 种电网调节类型的可调度资源矩阵为 $R_a = \text{diag}(r_v^a)$,参与第 a 种电网调节类型不确定度矩阵为 $Q_a = \text{diag}(q_v^a)$, v 为可调度资源编号。

2.3 信息物理融合的电力系统日前-日内调度模型

建立基于信息物理融合的电力系统日前调度框架,信息物理融合的电力系统日前调度表达式如下:

$$\mathbf{G}_{m \times 24} = \mathbf{Q}_1 \left(\mathbf{R}_1 \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{m \times 24} \\ \mathbf{D}_{n \times 24} \end{bmatrix} \right) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{G}_{m \times 24}$ 为 m 个发电侧资源的24点调度计划; $\mathbf{D}_{n \times 24}$ 为 n 个需求侧资源24点调度计划。

定义运算 $\mathbf{Q}_1(\mathbf{M})$ 中, $\mathbf{Q}_1(\cdot)$ 对矩阵 $\mathbf{M}$ 的作用为将矩阵 $\mathbf{M}$ 元素 m_{ij} 转化为在区间 $m_{ij} \cdot [1 - q_a^w, 1 + q_a^w]$ 内的不确定性表达形式。调度指令应在2.1节中模型可执行范围内。

信息物理融合的电力系统日内调度表达式如下:

$$\mathbf{N}_T^t = \mathbf{Q}_2 \left((\mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_2) \begin{bmatrix} \mathbf{G}_m^{t+1} \\ \mathbf{D}_n^{t+1} \end{bmatrix} \right) \quad (7)$$

$$\mathbf{N}_{T,b}^t = \mathbf{Q}_3 \left(\sum_{a=1,2} \mathbf{R}_a \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{m,b}^{t+1} \\ \mathbf{D}_{n,b}^{t+1} \end{bmatrix} \right) + \mathbf{Q}_4 \left(\sum_{a=1,2,3} \mathbf{R}_a \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{m,x,b}^{t+1} \\ \mathbf{D}_{n,x,b}^{t+1} \end{bmatrix} \right) \quad (8)$$

式中: $\mathbf{N}_T^t$ 为 t 时段做出的日内调度指令; $\mathbf{G}_m^{t+1}$ 为发电侧 $t+1$ 时段调度指令; $\mathbf{D}_n^{t+1}$ 为需求侧 $t+1$ 时段调度指令; $\mathbf{N}_{T,b}^t$ 为 t 时段做出的日内备用计划; $\mathbf{G}_{m,b}^{t+1}$ 为发电侧二次调频备用计划; $\mathbf{D}_{n,b}^{t+1}$ 为需求侧二次调频备用计划; $\mathbf{G}_{m,x,b}^{t+1}$ 为发电侧一次调频备用计划; $\mathbf{D}_{n,x,b}^{t+1}$ 为需求侧一次调频备用计划。

为确保日前优化调度的鲁棒性, $\mathbf{N}_T^t + \mathbf{N}_{T,b}^t$ 的上、下界应符合电网安全约束。

3 信息物理融合的电力系统日前-日内优化调度

3.1 信息物理融合的电力系统日前优化调度模型

3.1.1 目标函数

电力系统日前优化调度以经济性为目标,目标函数为

$$\min(F^{T-1}) = \min(F_1^{T-1} + F_2^{T-1} + F_3^{T-1} + F_4^{T-1}) \quad (9)$$

$$\begin{cases} F_1^{T-1} = \sum_{t=1}^k \sum_{i=1}^g (a_i P_{it}^2 + b_i P_{it} + c_i) \cdot C_{i1} \\ F_2^{T-1} = \sum_{t=1}^k \sum_{i=1}^g \rho_{it} \cdot C_{i2} \\ F_3^{T-1} = \sum_{t=1}^k \sum_{i=1}^g \Delta P_{it} \cdot C_{i3} \\ F_4^{T-1} = \sum_{t=1}^k \sum_{i=1}^g P_{it}^L \cdot C_{i4} \end{cases} \quad (10)$$

式中: F_1^{T-1} 为火电机组发电成本; F_2^{T-1} 为火电机组启停成本; F_3^{T-1} 为火电机组调节成本; F_4^{T-1} 为网损成本; g 为火电机组数量; k 为可调度时段数量,本文取 $k=24$; P_{it} 为第 i 个火电机组在第 t 个调

度时段的发电功率; ρ_{it} 为第 i 个火电机组在第 t 个调度时段的启停指令; ΔP_{it} 为第 i 个火电机组在第 t 个调度时段的功率调节量; P_{it}^L 为第 i 条线路在第 t 个调度时段的功率损耗; $C_{i1}, C_{i2}, C_{i3}, C_{i4}$ 为对应单位成本。

本文目标仅为火电机组运行成本最小,从而使得优化结果中尽可能多地调用可再生能源发电与需求侧响应资源,该目标函数中隐含了电力系统低碳运行要求^[16]。

3.1.2 约束条件

电力系统日前优化调度需要考虑的约束条件如下:

1) 功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^m P_{it} - \sum_{i=m+1}^{m+n} P_{it}^{D_i} = \alpha P_{it}^L \quad (11)$$

式中: α 为考虑备用的日前功率平衡系数, $\alpha > 1$; P_{it}^L 为日前负荷预测中 t 时段的负荷功率; $P_{it}^{D_i}$ 为 t 时段激励型需求响应后该可调度资源的功率转移量。

2) 火电机组调节爬坡约束:

$$-\Delta P^{G_i} < \Delta P_{it} < \Delta P^{G_i} \quad (12)$$

3) 火电机组功率上、下限约束:

$$P_{L_i}^{G_i} < P_{it} < P_{U_i}^{G_i} \quad (13)$$

4) 火电机组连续启停时间约束:

$$T_{\min}^{G_i} < T^{G_i} \quad (14)$$

式中: T^{G_i} 为第 i 个火电机组连续工作或连续退出时长。

5) 电网传输线容量约束如下:

$$0 < S_k < S_{\max}^k \quad (15)$$

式中: S_k 为联络线实际传输功率。

6) 需求侧资源连续调节时间约束:

$$T_{\min}^{D_r} < T^{D_r} \quad (16)$$

式中: T^{D_r} 为第 r 个需求侧资源连续响应或连续不响应时长。

7) 需求侧资源响应功率上、下限约束:

$$P_{L_r}^{D_r} < P_{it}^{D_r} < P_{U_r}^{D_r} \quad (17)$$

式中: $P_{it}^{D_r}$ 为 t 时段需求侧资源 r 的响应功率。

8) 需求侧资源爬坡约束:

$$-\Delta P^{D_r} < \Delta P_{it}^{D_r} < \Delta P^{D_r} \quad (18)$$

式中: $\Delta P_{it}^{D_r}$ 为第 r 个需求侧资源在第 t 时段的功率调节量。

9) 需求侧资源恢复功率约束:

$$P_{\min}^L < P_{it+1}^{D_r} < P_{\max}^L \quad (19)$$

式中: $P_{\min}^L$ 为由电网功率平衡与线路容量决定的需求侧资源反向功率恢复最大值; $P_{\max}^L$ 为由电网功率平衡与线路容量决定的需求侧资源正向恢复功率最大值; $P_{t,t+1}^{D_i}$ 为第 t 时段的需求侧资源调节导致的第 $t+1$ 时段的需求侧资源恢复功率。

3.2 信息物理融合的电力系统日内优化调度模型

电力系统日内滚动优化与式(9)的日前优化目标函数具有相同形式,并以日前优化调度结果作为基准,由于电力系统日前调度所决定的机组启停计划在日内调度中一般不加更改,因此日内调度约束条件无需考虑机组启停约束,同时日内调度需考虑电网实时能量平衡,需新增关于备用的约束条件。

1) 备用容量约束如下:

$$\begin{cases} \vartheta_t^+ < \sum_{i=1}^g \vartheta_t^{+G_i} + \gamma \sum_{i=g+1}^m \vartheta_t^{+G_i} + \lambda \sum_{i=m+1}^{m+n} \vartheta_t^{+D_i} \\ \vartheta_t^- < \sum_{i=1}^g \vartheta_t^{-G_i} + \gamma \sum_{i=g+1}^m \vartheta_t^{-G_i} + \lambda \sum_{i=m+1}^{m+n} \vartheta_t^{-D_i} \end{cases} \quad (20)$$

式中: ϑ_t^+ 为 t 时段系统正备用需求; ϑ_t^- 为 t 时段系统负备用需求; γ 为考虑可再生能源不确定性的备用削减系数, $\gamma \in (0,1)$; λ 为考虑需求侧资源不确定性的备用削减系数, $\lambda \in (0,1)$ 。

式中第1个求和项为火电机组备用容量;第2个求和项为可再生能源发电机组备用容量;第3个求和项为需求侧资源备用容量。

2) 调频里程约束如下:

$$\xi_t < \sum_{i=1}^g \xi_t^{G_i} + \gamma \sum_{i=g+1}^m \xi_t^{G_i} + \lambda \sum_{i=m+1}^{m+n} \xi_t^{D_i} \quad (21)$$

式中: ξ_t 为 t 时段系统调频里程需求。

3.3 优化调度求解算法

优化调度算法分为两部分,第1部分为优化调度主程序,第2部分为考虑不确定性的调度场景生成。为减小电网输电线路阻塞,确保优化后系统的调节性能,优化调度主程序采用双层规划方法求解模型,外层为电网潮流优化,内层为电网经济运行,其中潮流优化的目标函数为

$$\begin{cases} \min(L) \\ \text{s.t. } L = \max(S^k) \quad k = [1, T], k \in N \end{cases} \quad (22)$$

式中: S^k 为最小化电网中最大传输功率; T 为电网中传输线的数量。

S^k 使得电网潮流均匀分布,各负荷尽可能从邻近的发电机取电。潮流优化部分以 0.1 (标么值) 为步长,不断减小潮流约束,直至问题不可行,从而得到最优潮流的近似解,电网经济运行

部分基于 Matlab 2018a 平台 Yalmip 工具包调用 Cplex 12.8 求解器求解。

考虑可再生能源发电与需求侧响应不确定性的调度场景采用蒙特卡洛法生成,可再生能源发电与需求侧响应资源的变化部分采用 $(0,1)$ 正态分布表示,以功率变化率为指标,在生成的各场景中选取功率变化率最大场景作为最劣场景,优化调度结果需在该场景下可行。

4 算例分析

4.1 算例分析

本文以 IEEE30 节点网络为例,分析信息物理融合的电力系统建设与其优化调度间的关系。网络中发电机数据引用自文献[17],为配合本文分析,对网络中元素进行了适当修改,如表1所示,算例中以 100 MW 为基准功率计算。

表1 电力系统可调度资源数据

Tab.1 Regulatable resources data of power system

可调度资源名称	接入母线	可调度资源类型	功率调节范围 (标么值)	功率调节特征
Gen1	1	发电机	[0.5, 2]	0.5(标么值)/h
Gen2	2	发电机	[0.2, 0.8]	0.3(标么值)/h
Gen3	5	发电机	[0.15, 0.5]	0.15(标么值)/h
Gen4	8	发电机	[0.1, 0.35]	0.15(标么值)/h
Gen5	11	发电机	[0.1, 0.3]	0.15(标么值)/h
Gen6	13	可再生	[0.12, 0.4]	0.15(标么值)/h
Dem1	3	负荷	[-0.4, 0.4]	实时调节
Dem2	4	负荷	[-0.2, 0.2]	实时调节
Dem3	7	负荷	[-0.2, 0.2]	实时调节
Dem5	26	负荷	-	削峰填谷
Dem6	29	负荷	-	削峰填谷
Dem7	30	负荷	-	削峰填谷

算例中日前调度所依据的负荷曲线如图1所示,该曲线依据算例基础数据进行了适当修改,日内滚动优化所依据负荷曲线按照3.3节方法生成。

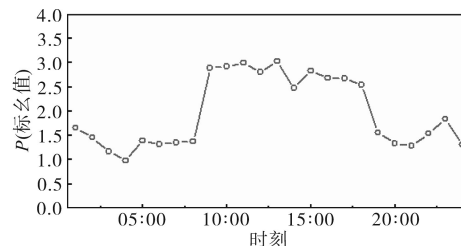


图1 电力系统日前调度负荷预测曲线

Fig.1 Load forecast curve for power system day-ahead dispatching

算例中考虑需求侧资源的日前优化调度所采用的可调度资源矩阵为

$$R_1 = \text{diag}([1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]) \quad (23)$$

考虑需求侧资源参与日内二次调频所采用的可调度资源矩阵为

$$\begin{cases} R_1 = \text{diag}([1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]) \\ R_2 = \text{diag}([1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0]) \end{cases} \quad (24)$$

考虑需求侧资源参与日内一次调频所采用的可调度资源矩阵为

$$\begin{cases} R_1 = \text{diag}([1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]) \\ R_2 = \text{diag}([1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0]) \end{cases} \quad (25)$$

算例中仅对可再生能源发电与需求侧资源不确定性进行定性分析,因此,确定性可调度资源对应矩阵 Q_e 对应元素为1,不确定性可调度资源对应矩阵 Q_e 对应元素统一为0.8。

4.2 场景1:需求侧资源参与电力系统日前调度

图2为计及需求侧资源的电力系统日前调度结果。从图中可以得出,需求侧资源参与日前调度后,充分调动了调节成本较低的1号发电机组的调节能力,并降低了2号发电机组~6号发电机组的功率调节量,从而减小了发电机的调节成本。在需求侧资源未参与日前调度的情况下,2号发电机组在20:00—22:00时段有2 h的关机时间,之后又重新开机,需求侧资源参与日前调度

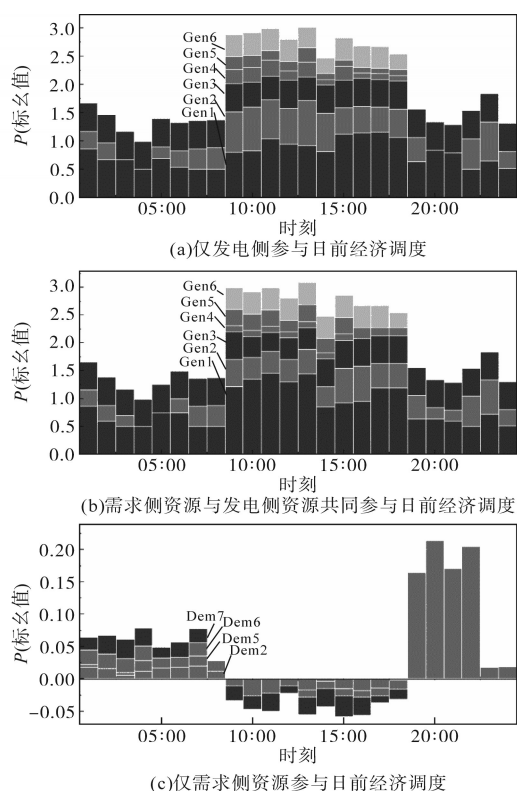


图2 计及需求侧资源的电力系统日前调度结果
Fig.2 Power system day-ahead dispatching result considering demand-side response

后, Dem2在20:00—22:00时段上调功率,从而使2号发电机组可以最低功率运行,避免了发电机组增加额外的启停成本。由此可得,适当的需求侧资源参与电力系统日前调度可以减小电力系统发电机组调节压力,进一步节约了电力系统运行成本。

4.3 场景2:需求侧资源参与电力系统日前-日内调度

图3为计及需求侧资源参与日内调度的电力系统日前调度结果。图3a为日前调度中发电机启停指令,图3b为日前经济调度结果。当部分需求侧资源参与到日前调度后,仅 Dem5~Dem7在日前调度进行了电网的削峰填谷,其调度结果与图2c中 Dem5~Dem7基本相同,而其他可实时调节负荷更愿意参与日内调频。表2为 Dem1~Dem3在日前申报的日内调频时段与调频容量,需求侧资源的调频里程由其爬坡速率决定。对比图3与图2可以发现,由于 Dem2未响应日前调度,导致了2号机组在20:00—22:00时段内,依然需要关闭,单就日前调度的经济性来看,不优于场景1。

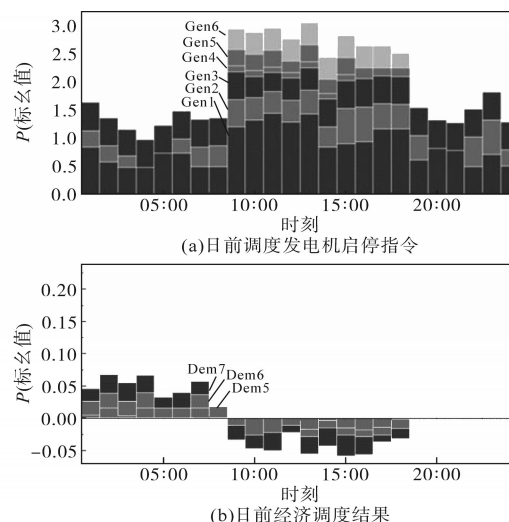


图3 计及需求侧资源参与日内调度的电力系统日前调度结果
Fig.3 Power system day-ahead dispatching result considering demand-side response

表2 需求侧资源参与日内调度申报结果

Tab.2 Claiming of the demand-side resources took part in the intra-day dispatching

可调度资源名称	响应时段	最大调节功率(标么值)
Dem1	13:00—15:00	±0.38
Dem2	01:00—08:00	±0.19
Dem2	19:00—24:00	±0.20
Dem3	10:00—15:00	±0.16

图4中实线为电力系统日内96点负荷曲线,实虚线(对应图中从上往下数第4条曲线)为考虑Gen6可再生能源发电机组功率波动后的供给侧调频备用容量,虚线(对应图中从上往下数第1条曲线)与点画线(对应图中从上往下数第3条曲线)分别为考虑需求侧资源Dem1~Dem3不确定性后的需求侧响应可为电力系统增加的最小调频备用容量。由图4可得,需求侧资源参与电力系统日内调度,可增加电力系统调节性能,扩大电力系统运行的功率调节范围,从而更好地消纳电力系统中可再生能源发电功率。相比利用式(24)计算可调节负荷均参与电力系统二次调频备用,利用式(25)计算时,可调节负荷更倾向于参与电力系统一次调频备用,从而使得需求侧资源二次调频容量有所减小。

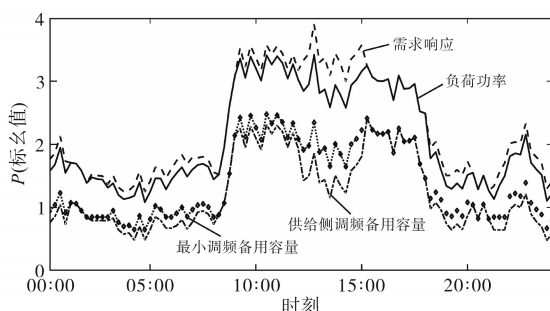


图4 电力系统实时发电功率曲线及其功率调节区间

Fig.4 Real-time power curve of power system and its regulation intervals

4.4 场景对比

对比算例中给出的各场景下电力系统信息物理融合建设为电力系统日前-日内优化调度所带来的影响可知,信息物理融合的电力系统日前-日内优化调度策略可有效减少传统发电机组调节功率与启停次数,并提升电力系统调节能力,从而提升电力系统可再生能源发电功率消纳能力。但一味追求高性能的电力系统信息物理融合建设会导致各类可调节资源调节目的不明确,容量分配不合理,提高了电力系统投资建设成本,降低了系统调节效益。电力系统信息物理融合建设应以目标为导向,统一建设相应层级的信息物理融合网络。例如当电力系统所面临峰谷差太大,导致发电机组经济运行问题时,应匹配相应容量的需求侧资源进行调峰;当电力系统所面临的问题是可再生能源接入导致的波动性问题时,应根据该电力系统中所接入的可再生能源特征,适当配置相应容量的需求侧资源容量进行调频;当电力系统面临多种问题时,应分时间

尺度地建立多层级信息物理融合电力系统,同时需合理分配各层级各时间尺度的需求侧资源容量,使得电力系统有序运行的同时提升电力系统信息物理融合建设的经济性。

5 结论

本文首先分析了信息物理融合对电力系统调度的影响,主要为减少发电侧与需求侧的信息差,提升需求侧可调节资源的可观可控性。结合现有电力系统调度框架,提出信息物理融场景下需求侧资源参与电力系统日前-日内调度的框架,在此框架下对电力系统源-网-荷建模,形成信息物理融合的电力系统日前-日内调度模型。以经济调度为目标,提出信息物理融合的电力系统日前-日内优化调度策略,算例推算过程展示了电力系统的信息物理融合建设对实现经济调度目标的影响。

在电网数字化进程中,建设不同的信息物理融合程度的电网,建设成本不一样,需要依据电力系统运行所面对的实际问题,以目标为导向,建设多时间尺度的分层级信息物理融合电力系统。

参考文献

- [1] 周冬玥,胡福年,陈军. 基于复杂网络的电力系统鲁棒性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 72-80.
ZHOU Dongyue, HU Funian, CHEN Jun. Robustness analysis of power system based on a complex network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 72-80.
- [2] 张涛,郭玥彤,李逸鸿,等. 计及电气热综合需求响应的区域综合能源系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 52-61.
ZHANG Tao, GUO Yuetong, LI Yihong, et al. Optimization scheduling of regional integrated energy systems based on electric-thermal-gas integrated demand response[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 52-61.
- [3] 陈泽雄,张新民,王雪锋,等. 分布式光伏电站接入配电网的分布鲁棒优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 30-42.
CHEN Zexiong, ZHANG Xinmin, WANG Xuefeng, et al. A distributionally robust optimal allocation method for distributed photovoltaic generation stations integrated into a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 30-42.
- [4] 孙高星,华栋,陈皓勇,等. 考虑柔性负荷的电量和备用辅助服务联合市场出清模型[J]. 广东电力, 2020, 33(6): 1-11.
SUN Gaoxing, HUA Dong, CHEN Haoyong, et al. A joint clearing model of power energy and reserve ancillary service market

- considering flexible load[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(6):1-11.
- [5] 周华锋,胡亚平,聂涌泉,等. 区域互联电网电能量与备用辅助服务联合优化模型研究[J]. 电网技术, 2020, 44(3):991-1001.
- ZHOU Huafeng, HU Yaping, NIE Yongquan, et al. Co-optimization model of energy and reserve auxiliary service for regional interconnected power grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(3):991-1001.
- [6] 周树鹏. 考虑需求响应的电力系统优化调度模型与方法研究[D]. 北京:华北电力大学, 2017.
- ZHOU Shupeng. Research on power system optimal dispatch model and method considering demand response[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [7] 张玉敏. 应对不确定性的机组组合决策理论研究[D]. 济南:山东大学, 2019.
- ZHANG Yumin. Theoretical research on decision-making of unit commitment to address uncertainties[D]. Jinan: Shangdong University, 2019.
- [8] 王澹,蒋传文,李磊,等. 考虑碳排放权分配及需求侧资源的安全约束机组组合问题研究[J]. 电网技术, 2016, 40(11):3355-3362.
- WANG Tan, JIANG Chuanwen, LI Lei, et al. Security constrained unit commitment problem considering carbon emission allocation and demand side resources[J]. Power System Technology, 2016, 40(11):3355-3362.
- [9] 王剑晓,钟海旺,夏清,等. 基于成本-效益分析的温控负荷需求响应模型与方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5):45-53.
- WANG Jianxiao, ZHONG Haiwang, XIA Qing, et al. Model and method of demand response for thermostatically-controlled loads based on cost-benefit analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5):45-53.
- [10] XU D, WU Q, ZHOU B, et al. Distributed multi-energy operation of coupled electricity, heating, and natural gas networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4):2457-2469.
- [11] ZHANG Z, WANG C, LÜ H, et al. Day-ahead optimal dispatch for integrated energy system considering power-to-gas and dynamic pipeline networks[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(4):3317-3328.
- [12] 唐程辉,张凡,张宁,等. 考虑可再生能源随机性和需求响应的电力系统日前经济调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15):18-25, 63.
- TANG Chenghui, ZHANG Fan, ZHANG Ning, et al. Day-ahead economic dispatch of power system considering renewable power uncertainty and demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15):18-25, 63.
- [13] 李美成,梅文明,张凌康,等. 基于可再生能源不确定性的多能源微网调度优化模型研究[J]. 电网技术, 2019, 43(4):1260-1270.
- LI Meicheng, MEI Wenming, ZHANG Lingfang, et al. Research on multi-energy microgrid scheduling optimization model based on renewable energy uncertainty[J]. Power System Technology, 2019, 43(4):1260-1270.
- [14] 赵书强,李志伟. 考虑可再生能源出力不确定性的多能源电力系统日前调度[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2018, 45(5):1-10.
- ZHAO Shuqiang, LI Zhiwei. Day-ahead scheduling of multi-energy power system considering renewable energy uncertain output[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2018, 45(5):1-10.
- [15] 许汉平,李姚旺,苗世洪,等. 考虑可再生能源消纳效益的电力系统“源-荷-储”协调互动优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17):18-25.
- XU Hanping, LI Yaowang, MIAO Shihong, et al. Optimization dispatch strategy considering renewable energy consumptive benefits based on "source-load-energy storage" coordination in power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17):18-25.
- [16] 吴界辰,艾欣,胡俊杰. 需求侧资源灵活性刻画及其在日前优化调度中的应用[J]. 电工技术学报, 2020, 35(9):1973-1984.
- WU Jiechen, AI Xin, HU Junjie. Methods for characterizing flexibilities from demand-side resources and their applications in the day-ahead optimal scheduling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(9):1973-1984.
- [17] PEREZ-RUA J A, STOLPE M, CUTULULIS N A. Integrated global optimization model for electrical cables in offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3):1965-1974.

收稿日期:2022-03-08

修改稿日期:2022-07-11