

基于光量子计算机的虚拟电厂 分布式资源解聚合优化方法

郭梦婕¹, 王晗^{2*}, 严正³, 张文博¹, 陶玮¹, 周新生¹, 文凯⁴, 马寅⁴, 魏海⁴

(1. 北京清大科越股份有限公司, 北京市朝阳区 100020; 2. 上海非碳基能源转换与利用研究院(上海交通大学), 上海市闵行区 200240; 3. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海市闵行区 200240; 4. 北京玻色量子科技有限公司, 北京市朝阳区 100020)

Disaggregation Optimization of Distributed Resources in Virtual Power Plants Based on Optical Quantum Computer

GUO Mengjie¹, WANG Han^{2*}, YAN Zheng³, ZHANG Wenbo¹, TAO Wei¹,
ZHOU Xinsheng¹, WEN Kai⁴, MA Yin⁴, WEI Hai⁴

(1. Beijing QU Creative Technology Co., Ltd., Chaoyang District, Beijing 100020, China; 2. Shanghai Non-carbon Energy Conversion and Utilization Institute (Shanghai Jiao Tong University), Minhang District, Shanghai 200240, China; 3. Key Laboratory of Power Transmission and Conversion of Ministry of Education (Shanghai Jiao Tong University), Minhang District, Shanghai 200240, China; 4. Beijing QBoson Quantum Technology Co., Ltd., Chaoyang District, Beijing 100020, China)

ABSTRACT: Quantum computers serve as platforms for high-performance quantum computing and its practical applications. With unique operational characteristics, they require scientifically feasible application methods tailored to specific scenarios and problems to leverage quantum advantages. This paper presents a quadratic unconstrained binary optimization (QUBO) model construction method for distributed resource disaggregation optimization in virtual power plants, based on optical quantum computing. It provides conversion methods for penalty terms in QUBO models corresponding to optimization objectives, equality constraints, and inequality constraints, establishing a practical quantum computing paradigm for power system optimization. Furthermore, a redundant constraint identification method and qubit sharing mechanism are developed, specifically considering virtual power plant operations to minimize required qubits. Utilizing the team's self-developed optical quantum computer, application tests demonstrate the feasibility and effectiveness of solving virtual power plant disaggregation problems. This breakthrough in solving power system optimization problems with optical quantum computers paves the way for addressing large-scale power system optimization

challenges in the future.

KEY WORDS: quantum computing; optical quantum computer; virtual power plants; distributed resources; quadratic unconstrained binary optimization (QUBO)

摘要: 量子计算机是支撑高性能量子计算及其实用化的载体, 其本身具有独特的运行特性, 为发挥量子计算优势, 需要结合实际场景与问题选择科学可行的应用方式。该文以光量子计算机为依托, 首先, 提出面向虚拟电厂分布式资源解聚合优化的二次无约束二值优化(quadratic unconstrained binary optimization, QUBO)模型构建方法, 给出优化问题目标函数、等式和不等式约束对应 QUBO 模型惩罚项的转换方式, 为应用光量子计算机求解电力系统运行优化问题提供可行的量子计算范式; 然后, 建立考虑虚拟电厂运行特征的冗余约束辨识方法与量子比特共用机制, 尽可能减少 QUBO 问题求解所需的量子比特数量; 最后, 依托团队自主研发的光量子计算机真机开展应用测试, 验证光量子计算机真机求解虚拟电厂解聚合优化问题的可行性与有效性, 实现电力系统优化问题通过光量子计算机真机求解的突破, 也为未来大规模电力系统优化问题的求解开辟新路径。

关键词: 量子计算; 光量子计算机; 虚拟电厂; 分布式资源; 二次无约束二值优化

基金项目: 国家自然科学基金项目(52107116, U2166201)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52107116, U2166201).

0 引言

量子计算作为一种新型计算方法, 能够在量子

力学规律下调量子信息单元以完成高速并行计算^[1]，其指数级加速效果已引起国内外研究人员的广泛关注。随着量子计算研究的深入，Shor 快速质因数分解算法^[2]、Grover 量子搜索算法^[3]、HHL 量子线性方程算法^[4]相继被提出，并展现巨大的算力优势。近年来，量子计算在金融服务^[5]、化工材料^[6]、人工智能^[7]等领域也取得一定研究进展。

在电力系统领域，量子计算相关探索研究目前主要涉及电力系统潮流计算、机组组合优化、稳定性评估等^[8]。在潮流计算方面，纽约州立大学石溪分校 P. Zhang 等在文献[9]中首次提出一种快速解耦的量子潮流方法并验证所提方法的高效性。浙江大学江全元团队在文献[10]中提出一种基于变量子算法的潮流计算方法，并实现量子计算机真机测试。文献[11]提出一种基于量子门电路的直流潮流计算方法，并验证量子计算的指数级加速效果。在机组组合优化方面，文献[12]提出分布式架构下量子计算和经典计算协调处理机组组合问题的思路。文献[13]提出应用量子退火算法求解离散化的机组组合问题，并采用 D-wave 系统验证算法的可行性。文献[14-15]分别提出量子交替方向乘子法和机组组合子问题分解算法，试图将机组组合问题分解为子问题以实现有限量子资源下的快速求解。在稳定性评估方面，文献[16]提出一种基于量子电路的暂态稳定评估方法，并验证所提方法在有噪声场景下的适用性。此外，文献[17]中西安交通大学别朝红团队对量子信息学在电力系统中的应用展开全面梳理，展望量子计算在电力系统中的应用前景。

上述研究为量子计算在电力系统领域的应用提供有力支撑，但受限于物理硬件，大多数研究均采用量子模拟器或模拟平台开展，仿真计算的量子加速效果可能无法在实际量子计算机中实现，实用化量子计算机的研发仍是制约量子计算推广应用的瓶颈问题^[18]。目前，量子计算机构建方案主要有超导^[19]、离子阱^[20]、光学^[21]。超导量子计算机速度快，但需要保持超低温，运行条件苛刻、成本高，量子比特数扩展难度大；离子阱量子计算机运行稳定，量子门保真度高，但其需要使用大量激光，操作效率低；光量子计算机可在室温下运行，相干时间长，理论上可构造的量子比特规模大，但其实现量子门困难，量子计算机的通用性不佳。其中，超导和离子阱构建方案针对的是通用量子计算机，该类量子计算机具备通用问题求解功能，但需要在绝

对零度附近的超低温下才能工作，且量子比特(Qubit)扩展难度大。相较而言，光量子计算机是求解组合优化问题的专用量子计算机，具有可常温下编码操控、相干时间长、全联接等方面的技术优势，且其量子比特数量进一步扩大的可行性较强，目前全球范围内已发布含 100 000 个量子比特的光量子计算机构建方案^[22]。

考虑量子计算机研发现状，针对电力系统优化运行问题，光量子计算机具备独特应用优势：1) 现有绝大多数电力系统优化运行研究本质为直接或间接(线性化或转化)处理混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)问题，然后调用商业求解软件 Gurobi 或 Cplex 求解。而光量子计算机可将 MILP 问题转化为二次无约束二值优化(quadratic unconstrained binary optimization, QUBO)问题并实现高性能求解，这是其在电力系统优化运行领域应用的基础。2) 相较于其他类型的量子计算机，光量子计算机量子比特数量具备大规模扩展的可能性，其支撑量子计算在电力系统优化运行领域发挥算力优势的预期更强、可实践性更高。基于上述 2 点，本文以虚拟电厂内分布式资源解聚合优化问题为研究对象，依托团队研发的光量子计算机，开展模型验证与真机测试，主要贡献包括以下几个方面。

1) 提出面向虚拟电厂分布式资源解聚合优化的 QUBO 模型构建方法，详细说明优化问题目标函数、等式和不等式约束对应 QUBO 模型惩罚项的转换方式，为应用光量子计算机求解电力系统运行优化问题提供可行的量子计算范式。

2) 提出考虑虚拟电厂运行特征的冗余约束辨识方法与量子比特共用机制，减少光量子计算机求解时所需的量子比特数量。基于团队研发的光量子计算机真机开展应用测试，验证光量子计算机求解虚拟电厂解聚合优化问题的可行性与有效性。测试结果表明含 101 个量子比特的光量子计算机求解效率优于 Gurobi 和 Cplex，实现电力系统优化问题通过光量子计算机真机求解的突破，也为未来大规模电力系统优化问题的求解开辟新路径。

1 虚拟电厂分布式资源解聚合优化模型

虚拟电厂参与市场交易后获得市场出清结果，并以此为基础进行内部分布式资源的解聚合，以实现分布式资源协调优化。本文重点研究虚拟电厂解

聚合优化过程,以虚拟电厂运营商收益最大化为目标,构建分布式资源解聚合优化模型。该模型的目标函数包含2项:第1项 F_1 为虚拟电厂总收益,第2项 F_2 为尽可能减少分布式资源调节次数而设置的惩罚项,如下所示:

$$\max F_1 - F_2 \quad (1)$$

$$\begin{cases} F_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N p_{i,t} l_{z,t} \Delta t (1 - k_i) \\ F_2 = L(u_{i,t}^{\text{up}} + u_{i,t}^{\text{down}} + u_{i,t}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $p_{i,t}$ 为第 i 个分布式资源在 t 时段的调节功率; Δt 为各时段时长; T 为虚拟电厂总调节时段数; k_i 为第 i 个分布式资源响应调节所得收益占总中标收益的比例,本文采取虚拟电厂运营商与内部分布式资源按比例 k_i 分摊收益的商业运营模式; N 为分布式资源的总个数; $l_{z,t}$ 为虚拟电厂 t 时段中标电量所对应的中标价格; L 为惩罚系数; $u_{i,t}^{\text{up}}$ 、 $u_{i,t}^{\text{down}}$ 分别为第 i 个具有固定调节功率的分布式资源 t 时段上调/下调状态的二元0-1变量,其为1时表示分布式资源提供上调功率,否则不提供; $u_{i,t}$ 为表征第 i 个灵活可调分布式资源 t 时段是否参与调节的二元0-1变量,其为1时表示参与调节,否则不参与。

所构建虚拟电厂分布式资源解聚合优化模型的约束条件如下文所述。

1) 分布式资源调节功率约束。

本文所考虑的分布式资源分为2种:①具有固定上调或者下调功率的分布式资源,包括柔性负荷(如可平移负荷、可削减负荷)、配储的分布式风电机组、配储的分布式光伏等,适合申报固定可调用容量;②灵活可调的分布式资源,包括分布式储能装置、燃气轮机等,具有更强的调度灵活性。对于第①种分布式资源有如下约束:

$$p_{i,t} = u_{i,t}^{\text{up}} p_i^{\text{up}} - u_{i,t}^{\text{down}} p_i^{\text{down}} \quad (3)$$

式中 p_i^{up} 、 p_i^{down} 分别为第 i 个分布式资源可调用的上调功率和下调功率,且上调/下调0-1状态变量 $u_{i,t}^{\text{up}}$ 、 $u_{i,t}^{\text{down}}$ 需满足:

$$u_{i,t}^{\text{up}} + u_{i,t}^{\text{down}} \leq 1 \quad (4)$$

对于第②种灵活可调的分布式资源约束如下:

$$-u_{i,t} p_i^{\text{max}} \leq p_{i,t} \leq u_{i,t} p_i^{\text{max}} \quad (5)$$

式中 p_i^{max} 为第 i 个灵活可调分布式资源的最大可调节功率。

2) 中标量与分布式资源调节总量平衡约束:

$$P_{z,t} = \alpha_{z,t} \sum_{i=1}^N p_{i,t}, \quad t=1, \dots, T \quad (6)$$

式中: $P_{z,t}$ 为虚拟电厂 t 时段中标的市场调节需求; $\alpha_{z,t}$ 为表征虚拟电厂 t 时段是否中标的二元0-1状态变量,其为0表示虚拟电厂 t 时段未中标(即不参与市场调节),否则为中标。

3) 功率调节偏差考核约束。

为保证分布式资源参与响应后实际输出功率满足预调度下的偏差考核要求,需满足如下约束:

$$\begin{aligned} (1-b)(P_{z,t} + \sum_{i=1}^N p_{i,t}^{\text{base}}) &\leq \sum_{i=1}^N (p_{i,t}^{\text{base}} + p_{i,t}) \\ (1+b)(P_{z,t} + \sum_{i=1}^N p_{i,t}^{\text{base}}) &\leq \sum_{i=1}^N (p_{i,t}^{\text{base}} + p_{i,t}), \quad t=1, \dots, T \end{aligned} \quad (7)$$

式中: b 为允许最大偏差比例; $p_{i,t}^{\text{base}}$ 为第 i 个分布式资源在 t 时段的基线功率。

4) 全时段总用电量平衡约束。

为保证分布式资源参与响应前后总用电量不变,需满足如下约束:

$$\sum_{t=1}^T p_{i,t} = 0, \quad i=1, \dots, N \quad (8)$$

5) 分布式资源调节范围约束。

分布式资源实际功率需满足其上、下限约束:

$$P_{i,t}^{\text{min}} \leq p_{i,t}^{\text{base}} + p_{i,t} \leq P_{i,t}^{\text{max}}, \quad i=1, \dots, N, \quad t=1, \dots, T \quad (9)$$

式中 $P_{i,t}^{\text{max}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{min}}$ 分别为第 i 个分布式资源 t 时段允许输出功率的最大值和最小值。

6) 分布式资源运行成本降低约束。

为使得分布式资源参与响应后获益,引入分布式资源运行成本降低约束:

$$\sum_{t=1}^T (p_{i,t}^{\text{base}} + p_{i,t}) l_{c,t} - p_{i,t} l_{z,t} k_i \leq \sum_{t=1}^T p_{i,t}^{\text{base}} l_{c,t}, \quad i=1, \dots, N \quad (10)$$

式中 $l_{c,t}$ 为 t 时段电力市场分时电价。

2 面向虚拟电厂分布式资源解聚合优化的 QUBO 模型构建方法

2.1 QUBO 模型

QUBO 模型常用于组合优化问题建模, QUBO 模型的基本形式如下所示:

$$\min \sum_{x_i, x_j \in A, i \neq j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{x_i \in A} \alpha_i x_i \quad (11)$$

式中: x_i 和 x_j 为二元0-1变量; $A=\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 为二元0-1变量的集合; N 为二元0-1变量的数量; β_{ij} 为QUBO模型中二次项系数; α_i 为QUBO模型

中一次项系数。

由于二元 0-1 变量 x_i 的平方形式与其一次项形式等价(即 $x_i = x_i^2$), 则 QUBO 模型还可表示为如下矩阵形式^[23]:

$$\min \mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$; \mathbf{Q} 为 QUBO 模型的系数矩阵, 对称形式下 $Q_{ii} = \alpha_i$ 、 $Q_{ij} = \beta_{ij}/2$ 。

在给定 \mathbf{Q} 矩阵后, 式(12)所示的 QUBO 模型可进一步转换为 Ising 模型^[24], 并利用专用量子计算机实现超高速求解。因此, 面向实际应用, 如何将所研究的问题转化为 QUBO 模型是依托专用量子计算机实现量子加速求解的关键。

2.2 虚拟电厂解聚合优化 QUBO 模型构建方法

含约束条件的优化模型转换为 QUBO 模型的思路是通过数据离散化与二进制表达, 将约束条件表征为目标函数中多个惩罚项, 从而实现 QUBO 模型的构建。

1) 分布式资源调节功率约束的转换。本文暂时仅考虑具有固定上调或下调功率的分布式资源, 并假定灵活可调的分布式资源可用于弥补固定功率调节后的偏差。因此, 根据式(3)分布式资源固定的上/下调功率表达式, 优化目标函数式(1)可转换为如下 QUBO 模型的函数项:

$$H_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (x_{i,t}^{\text{up}} p_i^{\text{up}} - x_{i,t}^{\text{down}} p_i^{\text{down}}) l_{z,t} \Delta t (k_i - 1) + L(x_{i,t}^{\text{up}} + x_{i,t}^{\text{down}}) \quad (13)$$

式中 $x_{i,t}^{\text{up}}$ 、 $x_{i,t}^{\text{down}}$ 分别为二元 0-1 变量 $u_{i,t}^{\text{up}}$ 、 $u_{i,t}^{\text{down}}$ 的量子比特位。

同时, 式(4)可转换为如下的惩罚项^[25]:

$$H_2 = M_1 (x_{i,t}^{\text{up}} x_{i,t}^{\text{down}}) \quad (14)$$

式中 M_1 为 H_2 中的惩罚系数。

2) 中标量与分布式资源调节总量平衡约束的转换。由于固定上/下调功率的分布式资源不一定能保证等于中标量, 因此, 允许该平衡约束存在偏差, 偏差量可由虚拟电厂内灵活调节的分布式资源补足。具体而言, 分布式储能装置、可控电源可根据需要提供该部分偏差量。在本文中, 去除偏差量也考虑计算中存在较多小数位的情况, 表示小数部分的数值需要较多量子比特位, 这将对光量子真机的比特数量会提出更高要求。在此平衡机制下, QUBO 模型的惩罚项转换为

$$H_{3,t} = M_2 [P_{z,t} - \alpha_{z,t} \sum_{i=1}^N (x_{i,t}^{\text{up}} p_i^{\text{up}} - x_{i,t}^{\text{down}} p_i^{\text{down}})]^2 \quad (15)$$

式中 M_2 为 $H_{3,t}$ 中的惩罚系数。

3) 功率调节偏差考核约束的转换。首先, 引入松弛变量 $\Delta s_{t,1}$ 将不等式约束转换为等式约束, 以式(7)右侧不等式约束为例:

$$\sum_{i=1}^N (p_{i,t}^{\text{base}} + x_{i,t}^{\text{up}} p_i^{\text{up}} - x_{i,t}^{\text{down}} p_i^{\text{down}}) + \Delta s_{t,1} = (1+b)(P_{z,t} + \sum_{i=1}^N p_{i,t}^{\text{base}}), \quad t=1, \dots, T \quad (16)$$

然后, 通过二进制表达, 采用 $d_{t,1}^{\text{max}}$ 个量子比特表征松弛变量 $\Delta s_{t,1}$:

$$\Delta s_{t,1} = \sum_{d=1}^{d_{t,1}^{\text{max}}} 2^{d-\gamma} x_{d,t,1} \quad (17)$$

式中: $x_{d,t,1}$ 为 t 时段松弛变量 $\Delta s_{t,1}$ 的第 d 个量子比特位; γ 为二进制数值控制变量。

需要说明的是, 在量子比特数足够时, 理论式(17)右侧可以表示任意实数(负数需要增加负号)。具体而言, 当 γ 取 1 时, 可表示 0 到 $2^{d_{t,1}^{\text{max}}} - 1$ 之间的任一整数。当 γ 取 2、 $d_{t,1}^{\text{max}}$ 取 3 时, 共包含 3 个量子比特位 $x_{1,t,1}$ 、 $x_{1,t,2}$ 和 $x_{1,t,3}$, 其所构成的数值组合共 8 种, 如附表 A1 所示, 可表示集合 $\{0, 0.5, 1, 2, 1.5, 2.5, 3, 3.5\}$ 中的任一数值。

结合式(16)和(17), 对应于 t 时段功率调节偏差考核约束的 QUBO 模型惩罚项可表示为

$$H_{4,t} = M_3 \left[\sum_{i=1}^N (p_{i,t}^{\text{base}} + x_{i,t}^{\text{up}} p_i^{\text{up}} - x_{i,t}^{\text{down}} p_i^{\text{down}}) + \sum_{d=1}^{d_{t,1}^{\text{max}}} 2^{d-\gamma} x_{d,t,1} - (1+b)(P_{z,t} + \sum_{i=1}^N p_{i,t}^{\text{base}}) \right]^2 \quad (18)$$

同理, 式(7)左侧不等式约束也可同样处理:

$$H_{5,t} = M_3 \left[- \sum_{i=1}^N (p_{i,t}^{\text{base}} + x_{i,t}^{\text{up}} p_i^{\text{up}} - x_{i,t}^{\text{down}} p_i^{\text{down}}) + \sum_{d=1}^{d_{t,2}^{\text{max}}} 2^{d-\gamma} x_{d,t,2} + (1-b)(P_{z,t} + \sum_{i=1}^N p_{i,t}^{\text{base}}) \right]^2 \quad (19)$$

式中: $x_{d,t,2}$ 为 t 时段松弛变量 $\Delta s_{t,2}$ 的第 d 个量子比特位; $d_{t,2}^{\text{max}}$ 为表征松弛变量 $\Delta s_{t,2}$ 的量子比特数; M_3 为 $H_{4,t}$ 、 $H_{5,t}$ 中的惩罚系数。

4) 全时段总用电量平衡约束的转换。对于第 i 个固定上/下调功率的分布式资源, 其总用电量平衡约束可转换为如下 QUBO 模型的惩罚项:

$$H_{6,i} = M_4 \left[\sum_{t=1}^T (x_{i,t}^{\text{up}} p_i^{\text{up}} - x_{i,t}^{\text{down}} p_i^{\text{down}}) \right]^2 \quad (20)$$

式中 M_4 为 $H_{6,i}$ 中的惩罚系数。

5) 分布式资源调节范围约束的转换。与前述不等式约束转化的思路相同, 通过引入松弛变量并进行二进制表达, 可分别获得式(9)左侧和右侧转换后的 QUBO 模型惩罚项:

$$H_{7,i,t} = M_5 (p_{i,t}^{\text{base}} + x_{i,t}^{\text{up}} p_i^{\text{up}} - x_{i,t}^{\text{down}} p_i^{\text{down}} + \sum_{d=1}^{d_{i,t,1}^{\text{max}}} 2^{d-\gamma} x_{d,i,t,1} - P_{i,t}^{\text{max}})^2 \quad (21)$$

$$H_{8,i,t} = M_5 (p_{i,t}^{\text{base}} + x_{i,t}^{\text{up}} p_i^{\text{up}} - x_{i,t}^{\text{down}} p_i^{\text{down}} - \sum_{d=1}^{d_{i,t,2}^{\text{max}}} 2^{d-\gamma} x_{d,i,t,2} - P_{i,t}^{\text{min}})^2 \quad (22)$$

式中: $x_{d,i,t,1}$ 、 $x_{d,i,t,2}$ 为第 i 个分布式资源 t 时段调节范围上、下限约束中表征松弛变量的第 d 个量子比特位; $d_{i,t,1}^{\text{max}}$ 、 $d_{i,t,2}^{\text{max}}$ 为表征松弛变量的量子比特数; M_5 为 $H_{7,i,t}$ 、 $H_{8,i,t}$ 中的惩罚系数。

6) 分布式资源运行成本降低约束的转换。通过引入松弛变量并进行二进制表达, 可获得式(10)转换后的 QUBO 模型惩罚项:

$$H_{9,i} = M_6 \left[\sum_{t=1}^T (p_{i,t}^{\text{base}} + x_{i,t}^{\text{up}} p_i^{\text{up}} - x_{i,t}^{\text{down}} p_i^{\text{down}}) l_{c,t} - (x_{i,t}^{\text{up}} p_i^{\text{up}} - x_{i,t}^{\text{down}} p_i^{\text{down}}) l_{z,t} k_i + \sum_{d=1}^{d_{i,t}^{\text{max}}} 2^{d-\gamma} x_{d,i,t} - \sum_{t=1}^T p_{i,t}^{\text{base}} l_{c,t} \right]^2 \quad (23)$$

式中: $x_{d,i,t}$ 为表征第 i 个分布式资源运行成本降低约束中松弛变量的第 d 个量子比特位; $d_{i,t}^{\text{max}}$ 为表征该松弛变量的量子比特数; M_6 为 $H_{9,i}$ 中的惩罚系数。通过上述转换, 可获得面向虚拟电厂解聚合优化的 QUBO 模型目标函数:

$$\min H_1 + H_2 + \sum_{t=1}^T (H_{3,t} + H_{4,t} + H_{5,t}) + \sum_{i=1}^N H_{6,i} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (H_{7,i,t} + H_{8,i,t}) + \sum_{i=1}^N H_{9,i} \quad (24)$$

在给定虚拟电厂中标数据、分布式资源调节参数后, 通过提取 QUBO 模型中的 Q 矩阵并输入专用量子计算机即可实现量子计算求解。

3 基于光量子计算机的虚拟电厂分布式资源解聚合优化

3.1 光量子计算机概述

玻色量子公司开发的相干伊辛机(coherent

Ising machine, CIM)是一款专用光量子计算机, 具有常温光量子编码操控、全联接等方面的技术优势。该光量子计算机是一种混合量子计算系统, 包含光学和电气 2 个部分系统。其中, 光学系统主要负责量子比特的制备与存储, 电气系统主要负责量子比特的控制与计算。

具体而言, 光学系统主要由泵浦脉冲光源、相敏放大(phase sensitive amplification, PSA)、和光纤环路组成。该光量子计算机使用飞秒光纤激光器产生激光脉冲, 并利用掺铒光纤放大器(erbium-doped fiber amplifier, EDFA)实现功率放大。进一步, 通过周期性极化铌酸锂(periodically poled Lithium Niobate, PPLN)晶体将光脉冲的频率加倍, 随后, 780 nm 的倍频光作为泵浦光在 PPLN 晶体上转换成 1560 nm 的信号光, 并在光纤环路中形成简并光学参量振荡器(degenerate optical parametric oscillators, DOPO), 从而生成具有特定相位和振幅的光脉冲, 即光量子比特。所有光量子比特都工作及存储在光纤环路中以供后续的量子计算使用。电气系统主要指量测与反馈部分, 由平衡零差探测器(Balanced homodyne detection, BHD)、可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)、上位机、强度调制器(intensity modulator, IM)、相位调制器(phase modulator, PM)组成。通过控制上位机, 将需要求解的 Ising 问题矩阵下载到 FPGA 中, FPGA 通过平衡零差探测器测量得到光纤环路中的光脉冲幅值, 从而获得光量子比特的相位和振幅信息。根据要求求解的 Ising 问题矩阵, FPGA 计算反馈信号, 并通过 IM 和 PM 调制反馈光脉冲, 利用反馈光脉冲与光纤环路内的光脉冲相互干涉, 从而引导光纤环中的光量子比特向 Ising 问题哈密顿量最低值的方向演化。演化结束后测量所得光量子比特的相位信息, 即为 Ising 问题的最终求解结果。为便于展示, 整个演化过程的信息可全部上传到上位机中并展示, 包括哈密顿量和量子比特相位的演化曲线。基于 CIM 的光量子计算机原理如图 1 所示, 基于该结构, CIM 可以实现 Ising 模型能量函数(哈密顿量)最小化问题的求解^[26]。

3.2 基于光量子计算机的 QUBO 模型计算

与经典计算机在半导体集电路上运行不同, 光量子计算机使用光脉冲作为量子比特进行计算。在简并光学参量振荡器中, 泵浦光入射到非线性光学晶体的上分出 2 束偏振方向相同的光, 其频率为

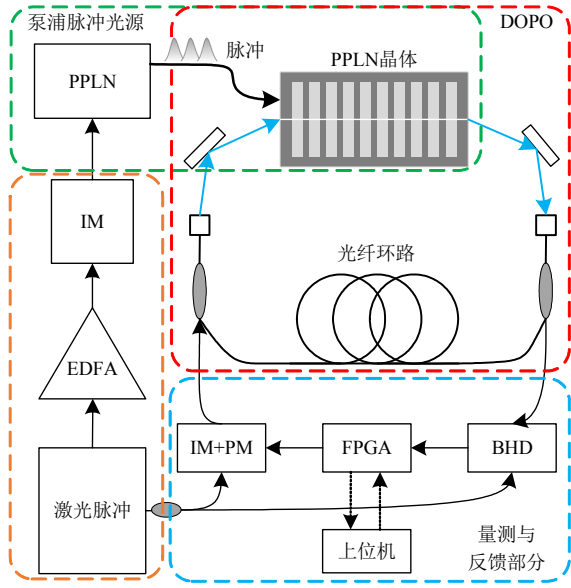


图 1 光量子计算机原理

Fig. 1 Schematic of optical quantum computer

泵浦光的一半，处于压缩态。逐步增加泵浦光的功率，超过振荡阈值时，产生的光变为相干态，光的相位分为 2 个状态(相位 0 态和 π 态)，此时可将该相位对应设置为自旋的 ± 1 ，用来解决优化问题。

借助上述原理，基于 CIM 的光量子计算机可抽象为求解 Ising 模型的专用计算机。Ising 模型是一类描述物质相变的随机过程模型，其模型中所含自旋变量 σ 取值为 ± 1 ，以最小化 Ising 模型的能量函数(即哈密顿量)为目标，并构建二元 0-1 变量与自旋变量 σ 之间的映射关系，可实现 Ising 模型与 QUBO 模型的转换^[23]。因此，基于 CIM 的光量子计算机可同样用于 QUBO 模型求解。针对具体的优化问题，可将原问题建模为 QUBO 模型并映射到 Ising 模型，进而将 Ising 问题矩阵输入 CIM，通过量子计算最小化哈密顿量并返回自旋变量 σ ，从而完成优化问题的求解。

3.3 考虑虚拟电厂运行特征的 QUBO 问题简化

为尽可能减少所用量子比特的数量，本文提出面向虚拟电厂分布式资源解聚合优化问题的冗余约束辨识和量子比特共用机制，即首先通过模型逻辑关系辨识并削减冗余约束，然后通过共用相同的量子比特表征松弛变量，减少占用的量子比特数量。

1) 冗余约束辨识。

首先，结合式(3)、(4)和(9)可计算第 i 个分布式资源在 t 时段的调节功率 $p_{i,t}$ 的上、下限值：

$$\begin{cases} P_{i,t}^{LB} \leq p_{i,t} \leq P_{i,t}^{UB} \\ P_{i,t}^{UB} = \min \{ p_i^{up}, P_{i,t}^{max} - p_{i,t}^{base} \} \\ P_{i,t}^{LB} = \max \{ -p_i^{down}, P_{i,t}^{min} - p_{i,t}^{base} \} \end{cases} \quad (25)$$

然后，将式(7)和(10)的不等式约束统一处理为如下简化形式：

$$\sum_i c_i p_{i,t} \leq b_i \quad (26)$$

式中： c_i 为处理后第 i 个约束中的系数项； b_i 为第 i 个约束的限值。

基于式(25)的限值可得简化后第 i 个约束的可达边界：

$$\begin{cases} l_i \leq \sum_i c_i p_{i,t} \leq u_i \\ u_i = \sum_{i,c_i \geq 0} c_i P_{i,t}^{UB} + \sum_{i,c_i \leq 0} c_i P_{i,t}^{LB} \\ l_i = \sum_{i,c_i \geq 0} c_i P_{i,t}^{LB} + \sum_{i,c_i \leq 0} c_i P_{i,t}^{UB} \end{cases} \quad (27)$$

结合式(26)和(27)，若第 i 个约束对应的 $u_i \leq b_i$ ，则该约束始终可以满足，即为冗余约束。冗余约束在优化问题求解时可以去除，以减少约束条件数量，从而减少所使用的量子比特数量。

2) 量子比特共用机制。

在辨识和去除冗余约束后，对于剩余的分布式资源调节范围约束，可共用同一量子比特表示式(9)左侧不等式或右侧不等式的松弛变量，简化后的 QUBO 模型惩罚项为

$$H_{7/8,i,t} = M_5 [(x_{i,t}^{up} - x_{i,t}^{down}) p_{i,t}^{base} + x_{i,t}^{up} p_i^{up} + x_{i,t}^{down} p_i^{down} + \sum_{d=1}^{d_{i,t}^{max}} 2^{d-\gamma} x_{d,i,t,1} - x_{i,t}^{up} P_{i,t}^{max} + x_{i,t}^{down} P_{i,t}^{min}]^2 \quad (28)$$

此外，由于中标时段功率调节偏差考核约束一定可满足，因此可去除中标时段惩罚项，仅保留式(18)和(19)中非中标时段的函数项 $H_{4,t}$ 和 $H_{5,t}$ ， $t \in \Gamma$ ， Γ 为非中标时段集合。综上，可将式(24)简化为

$$\begin{aligned} \min \quad & H_1 + H_2 + \sum_{t=1}^T H_{3,t} + \sum_{t \in \Gamma} (H_{4,t} + H_{5,t}) + \\ & \sum_{i=1}^N H_{6,i} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N H_{7/8,i,t} + \sum_{i=1}^N H_{9,i} \end{aligned} \quad (29)$$

通过上述量子比特数量简化过程可减少 $N T d_{i,t,2}^{max} + Z(d_{i,t,1}^{max} + d_{i,t,2}^{max})$ 个量子比特的使用(假定 $d_{i,t,1}^{max} \geq d_{i,t,2}^{max}$ ； Z 为中标时段数)，进一步降低虚拟电厂分布式资源解聚合优化问题求解对量子比特数量的依赖。

3.4 基于光量子计算机的虚拟电厂分布式资源解聚合优化流程

基于上述模型转换方法与光量子计算机运行原理，本文进一步给出基于光量子计算机的虚拟电

厂分布式资源解聚合优化流程，如图2所示。

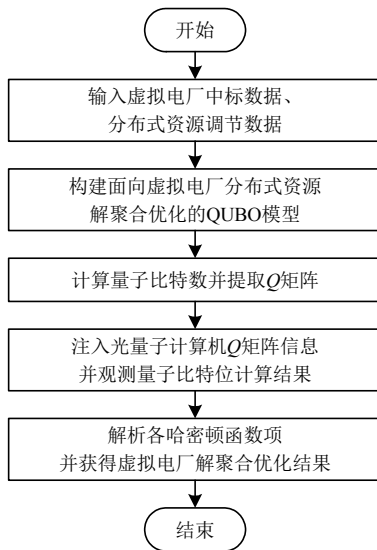


图2 基于光量子计算机的虚拟电厂分布式资源解聚合优化流程

Fig. 2 Flow for disaggregation optimization of distributed resources in virtual power plants based on the optical quantum computer

4 算例仿真

4.1 算例系统

本文利用光量子计算机求解虚拟电厂内4个分布式资源在8个运行时段内的解聚合优化问题。其中，虚拟电厂运营商中标电量、中标电价、以及电力市场分时电价数据如表1所示；所有分布式资源假定均具有固定的上调或者下调功率，均为5 MW。该部分参数设置能够保证中标量与分布式资源调节总量平衡，暂不需要调用灵活可调的分布式资源用以弥补偏差量。4个分布式资源响应调节所得收益占总市场中标收益的比例 $k_i (i=1, 2, 3, 4)$ 分别为0.4, 0.6, 0.5, 0.4。4个分布式资源在各时段的基线功率、允许输出功率的最大值和最小值数据如附表B1—B3所示。

表1 中标电量、中标电价和分时电价数据

Table 1 Data of clearing electricity quantities, clearing electricity prices, and time-of-use electricity prices

时段	中标电量/(MW·h)	中标电价/(元/(MW·h))	分时电价/(元/(MW·h))
1	-5	4 000	780
2	0	0	780
3	0	0	780
4	5	1 500	780
5	0	0	1 290
6	10	2 600	1 690
7	5	1 800	1 290
8	0	0	1 690

4.2 计算结果对比

进一步，利用本文所提方法将虚拟电厂分布式资源解聚合优化问题转化为 QUBO 问题，采用光量子真机求解，并分别与以下4种方法所得结果对比：1) Cplex 求解器(版本 12.10)：收敛容差(gap 值)为0.001；2) Gurobi 求解器(版本 10.0)：收敛容差(gap 值)为0.001；3) 模拟退火算法：初始温度为20000，降温系数为0.99，截止温度为0.001；4) 禁忌(Tabu)搜索算法^[27]：最大迭代次数1000，每次禁忌操作时受到影响的变量数为3；5) 最速下降法：初始值设为0。其中，前2种方法用于求解原 MILP 问题；后3种方法用于求解 QUBO 问题。将电价数据做标么化处理，所构建 QUBO 问题中各惩罚项对应的惩罚系数如表2所示；式(13)目标函数中的惩罚系数 $L=2 000$ 。3种对比算法均运行于传统计算机，计算机参数为 CPU AMD Ryzen 5 3400G 3.70 GHz, RAM 16G。

表2 QUBO 模型中的惩罚系数

Table 2 Penalty coefficient in QUBO model

惩罚系数	数值	惩罚系数	数值
M_1	400	M_4	200
M_2	200	M_5	200
M_3	500	M_6	1 000

利用6种方法所得计算结果如表3所示，由计算结果可知，光量子计算机求解 QUBO 问题所得目标函数结果与最优值一致，而其计算时间仅需1.17 ms，约为 Gurobi 计算时间的1/10，且计算效率远高于 Cplex 和其他3种 QUBO 问题求解算法。需要说明的是，最速下降法求解速度相对较快，但并未获得最优解，这与初始点选择及其收敛特性有关。进一步，图3给出哈密顿量总能量值变化情况，可以看出，光量子计算机在哈密顿量总能量最低值时获得最优计算结果，且最优结果保持不变，求解稳定性良好。进一步，图4给出光量子计算机求解过程中光量子比特相位演化的过程，从图4(a)—(c)可以看

表3 6种方法的计算结果

Table 3 Computation results of six methods

求解方法	目标函数/元	计算时间/ms
光量子计算机真机	33 600	1.17
Cplex 求解器	33 600	175.30
Gurobi 求解器	33 600	14.30
模拟退火算法	33 600	7 934.84
禁忌搜索算法	33 600	1 676.62
最速下降法	31 600	13.02

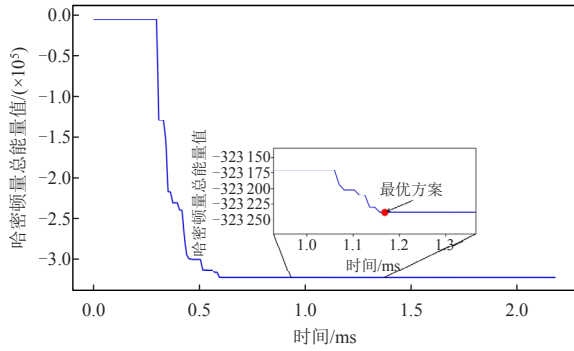


图 3 哈密顿量总能量值变化

Fig. 3 Hamiltonian total energy value variation

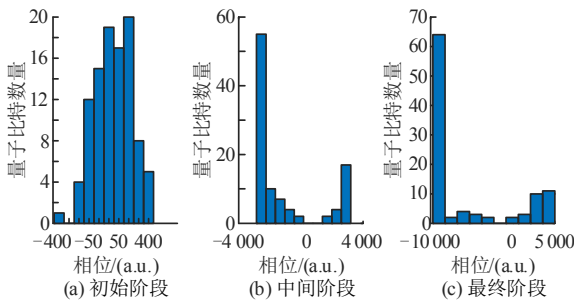


图 4 光子量子比特相位演化过程

Fig. 4 Evolution process of phase of optical quantum bits

出演化过程中量子比特逐步出现对称性破缺，即其相位逐渐向 0 值两侧变化，并最终达到稳定，相位的正负值分别对应于二元变量的“1”和“0”，从而得到优化问题决策变量的最终值。

4.3 量子比特使用分析

面向虚拟电厂分布式资源解聚合优化的 QUBO 模型所需量子比特数量如表 4 所示，分别对应模型中的决策变量和松弛变量。针对本文所给参数，实际光量子计算机计算时松弛变量采用 6 位量子比特表示(不含小数)，则 QUBO 问题求解共计需要 504 个比特。在采用量子比特共用机制后($Z=4$)，所需量子比特数减少为 252 个；再剔除冗余约束后最终所用量子比特数为 100 个。将 QUBO 模型的参数信息转换为 Ising 模型参数并输入玻色量子公司

表 4 QUBO 模型所使用的量子比特数量
Table 4 Number of qubits used in QUBO model

变量	量子比特数量
$x_{i,j}^{up}$	NT
$x_{i,j}^{down}$	NT
式(18)中的松弛变量	$Td_{i,1}^{max}$
式(19)中的松弛变量	$Td_{i,2}^{max}$
式(21)中的松弛变量	$NTd_{i,j,1}^{max}$
式(22)中的松弛变量	$NTd_{i,j,2}^{max}$
式(23)中的松弛变量	$Nd_{i,1}^{max}$
总计	$(2 + d_{i,j,1}^{max} + d_{i,j,2}^{max})NT + (d_{i,1}^{max} + d_{i,2}^{max})T + Nd_{i,1}^{max}$

构建的光量子计算机中，通过计算得到量子比特的最终状态结果如图 5 所示，其中圆周上蓝色或绿色的点表示相干后光子量子比特相位状态，蓝色表示相位为正(自旋变量 σ 取“1”)，绿色表示相位为负(自旋变量 σ 取“-1”)，上述状态对应的 4 种资源在各个时段的调用情况如图 6 所示。需要注意的是，QUBO 模型转换为 Ising 模型需要增加 1 个辅助比特，因此，图 5 中共 101 个量子比特。

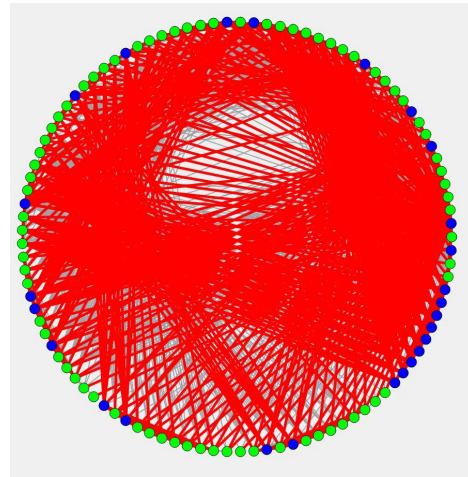


图 5 光子量子计算机最大割示意

Fig. 5 Maximum cut of the optical quantum computer

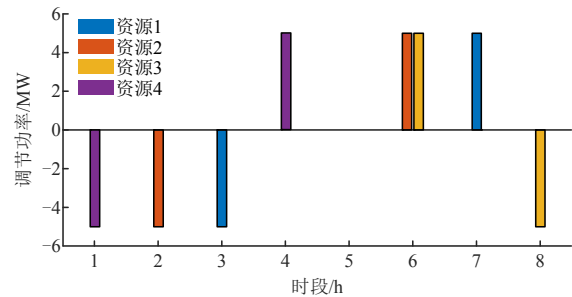


图 6 分布式资源调用情况

Fig. 6 Regulation of distributed resources

5 结论

1) 本文提出的 QUBO 模型构建方法为电力系统优化问题求解提供可行的量子计算范式，为光量子计算机在电力系统优化运行研究中的推广应用奠定模型基础。

2) 所提出的考虑虚拟电厂运行特征的冗余约束辨识方法与量子比特共用机制，显著减少 QUBO 问题求解所需的量子比特数量，可作为有限量子比特资源下提升量子计算机可用性的重要手段。

3) 针对小规模优化问题，光量子计算机真机求解效率优于 Gurobi 与 Cplex，验证光量子计算机作为专用硬件资源在电力系统优化运行领域应用的可

行性, 为未来研发更为高效、自主可控的大规模电力系统优化问题求解器开辟新思路, 如国产化硬件量子计算服务器代替国外商用软件求解器。

值得关注的是, 量子计算机的研发仍然任重道远, 但以光量子计算机为代表的专用量子计算机最先取得特定领域的应用实践, 将对助推整个行业技术的衍生发展具有重要意义。本文也正是以此为出发点开展研究测试, 并期望为电力系统与量子计算交叉融合提供可行范例。

致 谢

感谢浙江大学凌佳杰博士和北京交通大学徐辉章博士为本文研究提供的建议和意见; 感谢北京玻色量子科技有限公司技术人员提供的支持。

参考文献

- [1] 徐震, 张大波, 杨贺钧, 等. 基于 HHL 算法的量子牛顿-拉夫逊法潮流计算[J/OL]. 中国电机工程学报, 2025 [2025-02-23]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.240135>.
XU Zhen, ZHANG Dabo, YANG Hejun, et al. Quantum newton-raphson power flow computation based on HHL algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2025 [2025-02-23]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.240135>(in Chinese).
- [2] SHOR P W. Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring[C]//Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science. Santa Fe: IEEE, 1994: 124-134.
- [3] NIELSEN M A, CHUANG I L. Quantum computation and quantum information[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [4] HARROW A W, HASSIDIM A, LLOYD S. Quantum algorithm for linear systems of equations[J]. Physical Review Letters, 2009, 103(15): 150502.
- [5] 汪勇, 孟香君, 沈维萍. 量子计算在经济与金融领域中的应用[J]. 经济学动态, 2023(1): 126-143.
WANG Yong, MENG Xiangjun, SHEN Weiping. Applications of quantum computing to economics and finance[J]. Economic Perspectives, 2023(1): 126-143(in Chinese).
- [6] BAUER B, BRAVYI S, MOTTA M, et al. Quantum algorithms for quantum chemistry and quantum materials science[J]. Chemical Reviews, 2020, 120(22): 12685-12717.
- [7] ZHOU Yifan, TANG Zefan, NIKMEHR N, et al. Quantum computing in power systems[J]. iEnergy, 2022, 1(2): 170-187.
- [8] 黄一鸣, 雷航, 李晓瑜. 量子机器学习算法综述[J]. 计算机学报, 2018, 41(1): 145-163.
HUANG Yiming, LEI Hang, LI Xiaoyu. A survey on quantum machine learning[J]. Chinese Journal of Computers, 2018, 41(1): 145-163(in Chinese).
- [9] FENG Fei, ZHOU Yifan, ZHANG Peng. Quantum power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3810-3812.
- [10] 凌佳杰, 耿光超, 江全元. 基于变分量子算法的电力系统潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 28-36.
LING Jiajie, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan. Power flow calculation of power system based on variable quantum algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 28-36(in Chinese).
- [11] ESKANDARPOUR R, GOKHALE P, KHODAEI A, et al. Quantum computing for enhancing grid security [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 4135-4137.
- [12] FENG Fei, ZHANG Peng, BRAGIN M A, et al. Novel resolution of unit commitment problems through quantum surrogate Lagrangian relaxation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(3): 2460-2471.
- [13] AJAGEKAR A, YOU Fengqi. Quantum computing for energy systems optimization: challenges and opportunities [J]. Energy, 2019, 179: 76-89.
- [14] NIKMEHR N, ZHANG Peng, BRAGIN M A. Quantum distributed unit commitment: An application in microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(5): 3592-3603.
- [15] MAHROO R, KARGARIAN A. Hybrid quantum classical unit commitment[C]//2022 IEEE Texas Power and Energy Conference(TPEC). College Station: IEEE, 2022: 1-5.
- [16] ZHOU Yifan, ZHANG Peng. Noise-resilient quantum machine learning for stability assessment of power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(1): 475-487.
- [17] 谢海鹏, 钱雨琦, 付炜, 等. 电力系统中量子信息学的应用现状及展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4485-4507.
XIE Haipeng, QIAN Yuqi, FU Wei, et al. Status and prospect of quantum informatics in power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12): 4485-4507(in Chinese).
- [18] ARUTE F, ARYA K, BABBUSH R, et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor[J]. Nature, 2019, 574(7779): 505-510.
- [19] HUANG Heliang, WU Dachao, FAN Daojin, et al. Superconducting quantum computing: A review [J]. Science China Information Sciences, 2020, 63(8): 180501.
- [20] BRUZEWICZ C D, CHIAVERINI J, MCCONNELL R, et al. Trapped-ion quantum computing: Progress and

challenges[J]. Applied Physics Reviews, 2019, 6(2): 021314.

[21] INAGAKI T, HARIBARA Y, IGARASHI K, et al. A coherent Ising machine for 2000-node optimization problems[J]. Science, 2016, 354(6312): 603-606.

[22] HONJO T, SONOBE T, INABA K, et al. 100, 000-spin coherent Ising machine[J]. Science Advances, 2021, 7(40): eabh0952.

[23] MORSTYN T, Annealing-based quantum computing for combinatorial optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(2): 1093-1102.

[24] HAUKE P, KATZGRABER H G, LECHNER W, et al. Perspectives of quantum annealing : Methods and implementations[J]. Reports on Progress in Physics, 2020, 83(5): 054401.

[25] MCGEOCH C C. Theory versus practice in annealing-based quantum computing[J]. Theoretical Computer Science, 2020, 816: 169-183.

[26] WANG Zhe, MARANDI A, WEN Kai, et al. Coherent Ising machine based on degenerate optical parametric oscillators[J]. Physical Review A, 2013, 88(6): 063853.

[27] WEN Jingwei, WANG Zhenming, HUANG Zhiguo, et al. Optical experimental solution for the multiway number partitioning problem and its application to computing power scheduling[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2023, 66(9): 290313.

附录 A

表 A1 3 个量子比特位组合的数值结果

Table A1 Numerical results by the combination of three qubits

组合序号	$x_{1,d,1}$	$x_{2,d,1}$	$x_{3,d,1}$	数值结果
1	0	0	0	$2^{-1} \times 0 + 2^0 \times 0 + 2^1 \times 0 = 0$
2	1	0	0	$2^{-1} \times 0 + 2^0 \times 0 + 2^1 \times 0 = 0.5$
3	0	1	0	$2^{-1} \times 0 + 2^0 \times 0 + 2^1 \times 0 = 1$
4	0	0	1	$2^{-1} \times 0 + 2^0 \times 0 + 2^1 \times 0 = 2$
5	1	1	0	$2^{-1} \times 0 + 2^0 \times 0 + 2^1 \times 0 = 1.5$
6	1	0	1	$2^{-1} \times 0 + 2^0 \times 0 + 2^1 \times 0 = 2.5$
7	0	1	1	$2^{-1} \times 0 + 2^0 \times 0 + 2^1 \times 0 = 3$
8	1	1	1	$2^{-1} \times 0 + 2^0 \times 0 + 2^1 \times 0 = 3.5$

附录 B

表 B1 分布式资源的基准功率

Table B1 Baseline power of distributed resources

时段	资源 1	资源 2	资源 3	资源 4
1	31	158	61	89
2	23	146	58	88
3	21	133	41	59
4	21	136	46	74
5	30	101	40	40
6	42	11	72	92
7	48	101	78	94
8	32	74	52	78

表 B2 分布式资源允许输出的最大功率

Table B2 Maximum power of distributed resources

时段	资源 1	资源 2	资源 3	资源 4
1	45	171	87	133
2	42	152	59	143
3	38	147	54	78
4	36	142	57	126
5	46	108	60	75
6	46	21	86	95
7	63	102	99	149
8	53	74	61	130

表 B3 分布式资源允许输出的最小功率

Table B3 Minimum power of distributed resources

时段	资源 1	资源 2	资源 3	资源 4
1	20	146	55	82
2	12	138	56	65
3	11	130	39	50
4	10	127	41	51
5	14	93	36	34
6	12	9	69	77
7	20	97	77	84
8	7	74	42	62



郭梦婕

在线出版日期：2024-02-26。

收稿日期：2023-10-16。

作者简介：

郭梦婕(1994)，女，硕士，主要研究方向为虚拟电厂优化运行，电力市场机制，量子计算，conygmj@foxmail.com;

*通信作者：王晗(1993)，男，博士，副研究员，主要研究方向为电力系统不确定性分析、量子计算在电力系统中的应用，wanghan9894@sjtu.edu.cn;

严正(1964)，男，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为电力系统优化运行，电力系统稳定分析及智能电网，yanz@sjtu.edu.cn。

(编辑 张文鑫，张蕾)