第 50 卷 第 1 期：105-119 高电压技术 Vol.50, No.1: 105-119
2024 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20231314

新型配电网多虚拟电厂分布式资源聚合与聚合体优化运行方法

许泽凯[1]，刘　墨[1]，和敬涵[1]，司方远[2]，王小君[1]
（1. 北京交通大学电气工程学院，北京 100044;
2. 清华大学电机系电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室，北京 100084）

摘　要：随着新型电力系统建设的不断推进，配电网侧分布式资源聚合与聚合体优化运行成为支撑电网平衡能力提升的关键技术之一。为快速准确表征分布式资源聚合体的功率调节能力，首先通过顶点枚举法求解考虑电源出力不确定性的虚拟电厂可行域；进一步为解决配电网多虚拟电厂经济优化运行问题，设计了计及有功-无功的二元一致性算法，并证明所提算法的收敛性；通过基于可行域边界与二元一致性变量修正方程的修正法则，以满足功率与电压约束；最终得到多虚拟电厂分布式资源聚合与聚合体优化运行的算法流程。通过算例分析与对比，验证了所提资源聚合与聚合体优化运行的框架可行性，以及其相较于传统一致性算法的优势。通过对分布式资源有功-无功调节能力的充分利用，提升了分布式资源参与电网运行的灵活性。

关键词：虚拟电厂；二元一致性算法；资源聚合与聚合体优化运行；可行域；顶点枚举法

Distributed Resource Aggregation and Aggregate Optimization Operation Method of Multi-virtual Power Plant in New Power Distribution Network

XU Zekai[1], LIU Zhao[1], HE Jinghan[1], SI Fangyuan[2], WANG Xiaojun[1]
(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract：With the continuous advancement of the construction of the new power system, the distributed resource aggregation and aggregate optimal operation of the distribution network side have become the key technologies for the support of the balance capacity improvement of the power grid. In order to quickly and accurately characterize the power regulation ability of distributed resource aggregate, we first solve the feasible domain of virtual power plant considering the uncertainty of power output. Further, to solve the problem of economic optimal operation of multiple virtual power plants, we design a binary consistency algorithm for active power-reactive power and prove the convergence of the proposed algorithm;moreover, we correct the equation based on the feasible domain boundary and binary consistency variable to meet the power and voltage constraints,and obtain the algorithm process of multiple virtual power plant. The example analysis and comparative verification are adopted to verify the feasibility of the framework of the proposed optimization operation of resource aggregation and aggregation, and its advantages over the traditional consistency algorithm. Through the full use of the active-reactive power regulation capacity of distributed resources, the flexibility of distributed resources to participate in the power grid operation is improved.

Key words：virtual power plant; binary consistency algorithm; resource aggregation and aggregate optimized operation; feasible domain; vertex enumeration method

0　引言

随着我国电力市场化新型电力系统建设的不断推进，配电网侧的海量、异质分布式灵活性资源不断涌现[1-2]，国家能源局指出需深入挖掘电力负荷侧资源灵活性以满足新型电力系统供需匹配与灵活运行的需求[3]，分布式灵活性资源聚合与聚合体优化运行技术成为上述问题的重要解决方案之一[4-5]。

基金资助项目：国家重点研发计划(2022YFB2403402)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2022YFB2403402).

虚拟电厂(virtual power plant，VPP)将一定区域内的分布式电源、需求侧资源等多种分布式资源进行聚合形成聚合体 VPP，电网通过对 VPP 的协调控制，使其参与电网调度运行和市场交易，提升电力系统灵活调节能力[6-7]。

现有海量分布式资源的分层优化机制并不完善，在多层级优化调度时，分布式资源调节能力较弱，且一般仅考虑有功或无功[8-9]，这将损失 VPP 的部分调节能力。而技术型虚拟电厂内的分布式资源能同时产生有功-无功，整体调节潜力巨大，为进一步加强分布式资源调度能力的高效利用，有必要设计有功-无功耦合的分布式资源聚合优化运行方法[10]。

VPP 表征的灵活性资源聚合体对外功率运行特性称为虚拟电厂可行域(virtual power plant feasible region，VFR)，基于 VFR 的运行调控模式可向上级调度层提供 VPP 的调节能力边界，同时该模式也能较好保护 VPP 内部各个用户的隐私[8]。

目前，在分布式资源聚合形成 VFR 研究领域，常见的方法包括顶点枚举法[9-11]、多参数规划法[12]和数据驱动法[13]等。各类方法在不同的资源聚合体优化运行场景下具备不同的优势。本文考虑 VPP 内部网络运行约束，即 VPP 可同时发出有功-无功，并以顶点枚举法为基础求解该场景下 VFR。

电力系统分布式优化方法种类多样，例如目标级联法、并行子空间法和一致性算法等。但在资源聚合体形成可行域参与电网优化运行的研究领域，前 2 类方法通过层级间迭代与个体优化等策略实现求解，但其计算模型更适用于原始网络约束。尤其是在顶点数目较多的可行域下，前两者计算复杂度较未使用可行域下的计算复杂度并不会明显降低。一致性算法可通过无约束优化问题与各参数修正法则的结合以实现对完整优化问题求解[14]，这在一定程度上大大降低了计算复杂度，且并不会由于可行域复杂化而使得算法本身计算复杂度提升。文献[15-16]基于多主体成本增量一致性法则，设计了以成本最优为目标的一致性算法，提高了运行经济性的同时还较好解决了功率越限等问题，但二者均为仅考虑各主体有功功率的一元函数优化问题，在多元函数场景下的适用性有待进一步提升。文献[17]虽计及多类型主体不同成本函数，但本质为各主体的成本增量一致性，仍属于一元函数下的一致性算法。文献[18]同时计及储能有功荷电状态变化量一致性与光伏无功利用率一致性，设计了基于控制饱和衔接的光伏无功与储能有功两阶段一致性迭代算法，该方法可较好实现各节点电压的协调控制，但在功率协调与分配领域有待进一步提升。

基于上述研究成果与问题总结，本文的主要工作与创新点为：为快速准确表征海量分布式资源的功率调节能力，首先对分布式资源进行分类；之后基于高斯混合模型(Gaussian mixture module，GMM)建立计及不确定性的分布式电源模型，通过顶点枚举法求解确定置信度下体现有功-无功调节能力的 VFR；推导设计了解决聚合体有功-无功经济优化问题的二元一致性算法，构建了基于全功率因数范围下 VFR 边界值的功率越限调整规则以满足功率约束、基于电压灵敏度模型的二元一致性变量修正方程以满足电压约束；最后提出资源聚合与聚合体优化运行的框架流程。在算例分析环节，设计多组不同功率需求算例，并设置传统一元一致性算法以及集中式优化方法进行对照分析，验证所提分布式资源聚合和聚合体优化运行方法的可行性以及二元一致性算法的优越性。

1 基于顶点枚举法的虚拟电厂可行域求解方法

本文首先将分布式资源聚合形成 VPP 及其对应 VFR，进一步基于 VFR 求解配电网内部 n 个 VPP 协同参与电网调度的优化问题。相应示意图如图 1 所示。

根据图 1 所示内容，首先对基于分布式资源聚合体形成的 VFR 建模，并通过顶点枚举法求解全功率因数范围下的 VFR，得到公共耦合节点的对外输出有功-无功功率(P-Q)特性。该部分为本文所提资源聚合与聚合体优化运行方法提供基础支撑。

1.1 虚拟电厂内部资源与拓扑模型

分布式资源可分为储能类与电源类，储能类主要包括分布式储能和电动汽车等具有能量累积的资源；电源类包括以微型燃气轮机为代表的全控电源

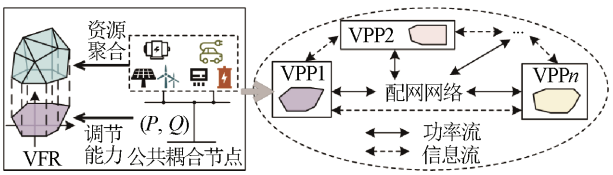


图 1 分布式资源聚合 VPP 参与优化调度示意图

Fig.1 Schematic diagram of flexible resource aggregation VPP participating in optimal scheduling

类(full control power supply type，FCP)，以及以分布式风电和分布式光伏为代表的半控电源类(half control power supply type，HCP)。电力网络拓扑的潮流分析均采用基于 DistFlow 潮流模型。

1.1.1　分布式资源统一建模

FCP 的约束主要考虑功率、容量约束和爬坡约束，即：

$$\begin{cases} P_{i,\min}^{\mathrm{F}} \le P_{i,t}^{\mathrm{F}} \le P_{i,\max}^{\mathrm{F}} \\ (P_{i,t}^{\mathrm{F}})^2 + (Q_{i,t}^{\mathrm{F}})^2 \le (S_i^{\mathrm{F}})^2 \\ P_{i,\min}^{\mathrm{FC}} \le \left| P_{i,t+1}^{\mathrm{F}} - P_{i,t}^{\mathrm{F}} \right| \le P_{i,\max}^{\mathrm{FC}} \end{cases} \tag{1}$$

式中：$P_{i,t}^{\mathrm{F}}$ 和 $Q_{i,t}^{\mathrm{F}}$ 分别为 t 时刻 FCPi 的有功、无功出力；$P_{i,\min}^{\mathrm{F}}$ 和 $P_{i,\max}^{\mathrm{F}}$ 分别为 FCPi 的最小、最大有功出力；S_i^{F} 为 FCPi 的额定容量；$P_{i,\max}^{\mathrm{FC}}$ 和 $P_{i,\min}^{\mathrm{FC}}$ 分别为 FCPi 的爬坡上、下限。

HCP 通过功率削减提升出力灵活性。本文构建考虑风光出力不确定性的 HCP 资源出力模型，并通过 GMM 将包含随机变量的机会约束转化为确定性约束，以实现 VFR 求解。模型为：

$$\begin{cases} 0 \le P_{i,t}^{\mathrm{H}} \le \tilde{P}_{i,t}^{\mathrm{H}}, & \text{(a)} \\ P_{i,t}^{\mathrm{H}} \tan\phi_{\mathrm{H},i}^{\min} \le Q_{i,t}^{\mathrm{H}} \le P_{i,t}^{\mathrm{H}} \tan\phi_{\mathrm{H},i}^{\max}, & \text{(b)} \end{cases} \tag{2}$$

式中：$P_{i,t}^{\mathrm{H}}$ 和 $Q_{i,t}^{\mathrm{H}}$ 分别为 t 时刻 HCPi 的有功、无功出力；$\tilde{P}_{i,t}^{\mathrm{H}}$ 为 t 时刻 HCPi 的最大可提供有功出力；$\phi_{\mathrm{H},i}^{\min}$ 和 $\phi_{\mathrm{H},i}^{\max}$ 分别为 HCPi 的最小、最大功率因数角。

将含随机变量的约束转化为机会约束形式，有：

$$P_{\mathrm{r}}\{P_{i,t}^{\mathrm{H}} \le \tilde{P}_{i,t}^{\mathrm{H}}\} \ge 1-\alpha_{\mathrm{H}} \tag{3}$$

式中：$P_{\mathrm{r}}\{P_{i,t}^{\mathrm{H}} \le \tilde{P}_{i,t}^{\mathrm{H}}\}$ 为事件 $\{P_{i,t}^{\mathrm{H}} \le \tilde{P}_{i,t}^{\mathrm{H}}\}$ 成立的概率；$\tilde{P}_{i,t}^{\mathrm{H}}$ 表示为 $P_{i,t}^{\mathrm{H}}$ 的随机变量；α_{H} 为对应机会约束的置信度。

将上述机会约束转化为确定性约束，即：

$$0 \le P_{i,t}^{\mathrm{H}} \le Q_u(\alpha_{\mathrm{H}} \mid \tilde{P}_{i,t}^{\mathrm{H}}) = D_{\tilde{P}_{i,t}^{\mathrm{H}}}^{-1}(\alpha_{\mathrm{H}}) \tag{4}$$

式中：$Q_u(\alpha_{\mathrm{H}} \mid \tilde{P}_{i,t}^{\mathrm{H}})$ 为分位点；$D_{\tilde{P}_{i,t}^{\mathrm{H}}}^{-1}(\alpha_{\mathrm{H}})$ 为累积分布函数(cumulative distribution function，CDF)的反函数。

进一步地，采用分段多项式近似拟合 CDF，进而求解式(4)的具体形式。

储能类资源主要包括功率约束与能量约束：

$$\begin{cases} 0 \le P_{i,t}^{\mathrm{dis}} \le M_{i,t}^{\mathrm{E}} \overline{P}_i^{\mathrm{E}}, & \text{(a)} \\ 0 \le P_{i,t}^{\mathrm{ch}} \le (1-M_{i,t}^{\mathrm{E}}) \overline{P}_i^{\mathrm{E}}, & \text{(b)} \\ E_{i,t+1} = E_{i,t} + (\eta_i^{\mathrm{E}} P_{i,t}^{\mathrm{ch}} - \dfrac{1}{\eta_i^{\mathrm{E}}} P_{i,t}^{\mathrm{dis}})\Delta t, & \text{(c)} \\ \underline{E}_i \le E_{i,t} \le \overline{E}_i, & \text{(d)} \end{cases} \tag{5}$$

式中：$P_{i,t}^{\mathrm{dis}}$ 和 $P_{i,t}^{\mathrm{ch}}$ 分别为 t 时刻储能类资源 i 的放电、充电功率；$M_{i,t}^{\mathrm{E}}$ 为 t 时刻储能类资源 i 的充放电状态，取 1 时为放电，取 0 时为充电；$\overline{P}_i^{\mathrm{E}}$ 为储能类资源 i 的最大充放电功率；$E_{i,t}$ 为 t 时刻储能类资源 i 的荷电状态；η_i^{E} 为储能类资源 i 的充放电效率；$\underline{E}_i$ 和 $\overline{E}_i$ 分别为储能类资源 i 的最小、大荷电状态。

1.1.2　网络模型

网络模型包括节点与线路功率约束、电压电流安全约束等，具体模型内容见附录 A。

1.2　虚拟电厂可行域求解

为具体化 VPP 的有功-无功调节能力，可求解 VPP 与配电网络的公共耦合点(point of common coupling，PCC)输出功率(P，Q)所在 2 维平面下的可行域。通过建立以 VPP 内部各资源模型和网络模型为约束条件，以所确定的 2 维平面中特定功率因数角 φ 下的调节能力最大化为目标函数的优化问题，求解不同 $\varphi \in [0, 2\pi]$ 下 VFR 的全部边界顶点，最终基于各顶点形成凸包得到 VFR[19]。具体流程如下文所述。

首先，确定 VFR 顶点枚举的目标函数为：

$$\max_{z} \ \boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}} z \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}} = [\sin\varphi, \cos\varphi]$ 为枚举新顶点的单位方向向量；$z = [P, Q]^{\mathrm{T}}$ 为可行域 Ω_{VFR} 内的点，$z \in \Omega_{\mathrm{VFR}}$。

为确定特定功率因数角 φ 对调节能力的约束限制，设定约束条件为：

$$Q = P\tan\varphi \tag{7}$$

进而确定优化问题 M0，即：目标函数为式(6)；约束条件为式(1)、(2b)、(4)、(5)、(7)，附录 A 中式(A1)—式(A7)。

图 2 为顶点枚举法求解顶点形成的 VFR 示意图。

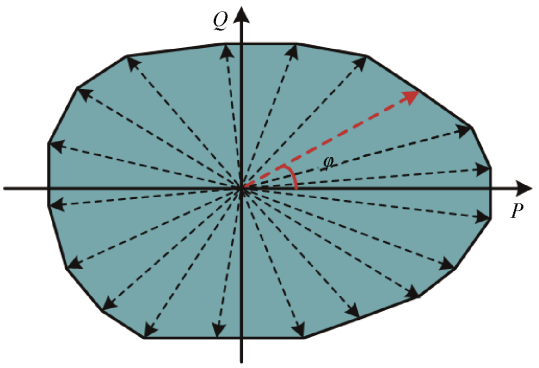


图 2　顶点枚举法示意图

Fig.2　Schematic diagram of vertex enumeration method

2 基于二元一致性算法的多虚拟电厂协同运行优化方法

多 VPP 协同优化为经济性优化。本文基于该优化问题设计了解决包含有功-无功二元一致性变量的二元一致性算法。所设计二元一致性算法与一元一致性算法的区别在于：二元一致性算法求解的优化模型包含 2 类决策变量，分别对应二元一致性算法内的二元一致性变量，当二元一致性变量均收敛时系统完成收敛。

下面将先构建多 VPP 的经济优化模型，之后详细介绍基于二元一致性算法的模型转化与求解。

2.1 优化模型构建

2.1.1 目标函数

多 VPP 的经济性优化模型目标函数为各聚合 VPP 的总成本最优，VPPi 的总成本包括有功成本 C_i^{P} 与无功成本 C_i^{Q}，即：

$$\min_{P_i,Q_i} C=\sum_{i=1}^{I}C_i=\sum_{i=1}^{I}(C_i^{\mathrm{P}}+C_i^{\mathrm{Q}}) \tag{8}$$

式中：P_i 和 Q_i 分别为 VPP 的有功、无功功率输入；I 为配电网中包含 VPP 的数量。

其中有功成本采用分段二次函数聚合成本模型[20]，为 VPP 内部各资源成本的叠加，内部资源成本函数见式(9a)—式(9c)；无功成本包括固定成本与机会成本，固定成本为基于设备计划使用年限折算后的单位时间成本，机会成本为 VPP 因提供无功服务而在有功发电上损失的部分成本。由于 VPP 内部各类发电资源在实际运行时存在相应的功率约束，无功输出达到一定程度时势必会影响到有功发电收益[7]。具体表达式为：

$$\begin{cases} C_m^{\mathrm{F}}=\alpha_m^{\mathrm{F}}(P_m^{\mathrm{F}})^2+\beta_m^{\mathrm{F}}P_m^{\mathrm{F}}+\gamma_m^{\mathrm{F}}, & \text{(a)}\\ C_n^{\mathrm{H}}=\beta_n^{\mathrm{H}}P_n^{\mathrm{H}}+\gamma_n^{\mathrm{H}}, & \text{(b)}\\ C_l^{\mathrm{E}}=\beta_l^{\mathrm{E}}P_l^{\mathrm{E}}+\gamma_l^{\mathrm{E}}, & \text{(c)}\\ C_i^{P}=\alpha_i(P_i)^2+\beta_iP_i+\gamma_i, & \text{(d)} \end{cases} \tag{9}$$

$$\begin{cases} \alpha_{i,1}(P_i)^2+\beta_{i,1}P_i+\gamma_{i,1}, & P_i\in[D_{i,1},D_{i,2}]\\ \alpha_{i,2}(P_i)^2+\beta_{i,2}P_i+\gamma_{i,2}, & P_i\in(D_{i,2},D_{i,3}]\\ \quad\vdots & \\ \alpha_{i,n-1}(P_i)^2+\beta_{i,n-1}P_i+\gamma_{i,n-1}, & P_i\in(D_{i,n-1},D_{i,n}] \end{cases} \tag{10}$$

$$C_i^{\mathrm{Q}}=\zeta_{\mathrm{Q},i}+\xi_i^{\mathrm{Q}}(P_{i,\max}-\sqrt{(S_{i,\max})^2-(Q_i)^2}) \tag{11}$$

式中：C_m^{F}、C_n^{H}、C_l^{E} 分别为 FCP、HCP 和储能类资源的成本；α_m^{F}、β_m^{F} 和 γ_m^{F} 为 FCPm 的成本系数；β_n^{H} 和 γ_n^{H} 为 HCPn 的成本系数；β_l^{E} 和 γ_l^{E} 为储能类资源 l 的成本系数；$\alpha_{i,n}$、$\beta_{i,n}$ 和 $\gamma_{i,n}$ 分别为 VPPi 输出有功在 n 区段时的二次、一次和常数项成本系数；P_m^{F}、P_n^{H} 和 P_l^{E} 分别为 FCPm、HCPn 和储能类资源 l 的有功功率；$D_{i,n}$ 为 VPPi 输出有功的边界值；$\zeta_{\mathrm{Q},i}$ 为折算后的固定成本；ξ_i^{Q} 为成本系数；$P_{i,\max}$ 和 $S_{i,\max}$ 分别为 VPPi 的有功功率和视在功率最大值。

2.1.2 约束条件

$$\begin{cases} P_{\mathrm{Pr}}=\sum_{i=1}^{I}P_i-P_{\mathrm{Loss}} & \text{(a)}\\ Q_{\mathrm{Pr}}=\sum_{i=1}^{I}Q_i-Q_{\mathrm{Loss}} & \text{(b)}\\ [P_i+\Delta P_i,Q_i+\Delta Q_i]\in\Omega_{\mathrm{VFR}},i\in[1,I] & \text{(c)}\\ U_{\min}\le U_j\le U_{\max},j\in[1,N] & \text{(d)} \end{cases} \tag{12}$$

$$P_{\mathrm{Loss}}=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\left(\frac{R_{ij}}{U_iU_j}(P_i^{\mathrm{N}}P_j^{\mathrm{N}}+Q_i^{\mathrm{N}}Q_j^{\mathrm{N}})\right) \tag{13}$$

$$Q_{\mathrm{Loss}}=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\left(\frac{X_{ij}}{U_iU_j}(P_i^{\mathrm{N}}P_j^{\mathrm{N}}+Q_i^{\mathrm{N}}Q_j^{\mathrm{N}})\right) \tag{14}$$

式中：P_{Pr} 和 Q_{Pr} 分别为系统总的有功、无功功率需求；P_{Loss} 和 Q_{Loss} 分别为系统总的有功、无功损耗；ΔP_i 和 ΔQ_i 分别为 VPP 的有功、无功功率增量；U_j 为节点 j 的电压；$U_{\min}$ 和 $U_{\max}$ 分别为节点电压的最小、最大值；R_{ij} 和 X_{ij} 分别为线路 ij 的电阻、电抗；P_i^{N} 和 Q_i^{N} 分别为节点 i 的注入有功、无功功率；N 为总节点数。

2.2 基于二元一致性算法的模型求解

主动配电网中各个 VPP 抽象为 VPP 节点进行通信网络信息交互，形成通信网络拓扑，VPP 集群协同的分布式通信结构用无向图 $\boldsymbol{G}$ 表示。图 $\boldsymbol{G}$ 的邻接矩阵 $\boldsymbol{A}$ 表征了各节点之间的关联性，$\boldsymbol{A}$ 为 0-1 矩阵，其对角线元素为 0，非对角线元素为 a_{ij}。b_i 为图 $\boldsymbol{G}$ 中节点 i 的度，则有 $\boldsymbol{B}$=diag(b_1，b_2，…，b_N)，图 $\boldsymbol{G}$ 的 Laplace 矩阵为 $\boldsymbol{L}=\boldsymbol{B}-\boldsymbol{A}=[l_{ij}]$，其中：

$$\begin{cases} l_{ii}=\sum_{i\ne j}a_{ij}\\ l_{ij}=-a_{ij} \end{cases} \tag{15}$$

本文设置 2 个一致性变量 λ 和 w，图 $\boldsymbol{G}$ 中各节点的状态变量 λ 和 w 经过迭代更新，最终达到一致。对于节点 i 来说，令 $\lambda(i,k)$和 $w(i,k)$代表第 k 次迭代的二元一致性变量，当系统内任意 2 节点 i、j 满足$|\lambda_{i,k}-\lambda_{j,k}|\to 0$ 以及$|w_{i,k}-w_{j,k}|\to 0$，即所有节点的状态变量在收敛条件范围内达到一致时系统收敛。为提取二元一致性变量，本文首先考虑以式(8)为目标函数，以式(12a)和(12b)为约束条件的优化模型，并利用拉格朗日乘子法设置 2 个拉格朗日常数即一致性变量 λ 和 w。

但上述模型并不涵盖不等式约束式(12c)和(12d)，故将会在第 2.4 节把不等式约束考虑至系统运行中。

首先可将目标函数转化为：

$$\min_{P_i,Q_i,\lambda,w} F = C+\lambda((\sum_{i=1}^{I}P_i)-P_{\text{Loss}}-P_{\text{Pr}})+ w((\sum_{i=1}^{I}Q_i)-Q_{\text{Loss}}-Q_{\text{Pr}}) \tag{16}$$

之后通过对式(16)求偏导，可得等价最优条件为：

$$\begin{cases} \dfrac{\partial F}{\partial P_i}=W_i^{\text{P}}-\lambda_i(1-L_i^{\text{PP}})-w_i(-L_i^{\text{QP}})=0, & \text{(a)} \\ \dfrac{\partial F}{\partial Q_i}=W_i^{\text{Q}}-\lambda_i(-L_i^{\text{PQ}})-w_i(1-L_i^{\text{QQ}})=0, & \text{(b)} \\ \dfrac{\partial F}{\partial \lambda_i}=\sum\limits_{i=1}^{I}P_i-P_{\text{Loss}}-P_{\text{Pr}}=0, & \text{(c)} \\ \dfrac{\partial F}{\partial w_i}=\sum\limits_{i=1}^{I}Q_i-Q_{\text{Loss}}-Q_{\text{Pr}}=0, & \text{(d)} \end{cases} \tag{17}$$

式中：W_i^{P} 和 W_i^{Q} 分别为有功、无功的成本微增率；λ_i 和 w_i 分别为 VPPi 的一致性变量；L_i^{PP}、L_i^{PQ}、L_i^{QP} 和 L_i^{QQ} 分别为节点 i 的有功网损对节点有功注入、有功网损对节点无功注入、无功网损对节点有功注入和无功网损对节点无功注入的网损微增率。其具体表达式为：

$$\begin{cases} W_i^{\text{P}}=\dfrac{\partial C_i^{\text{P}}}{\partial P_i}=2\alpha_i P_i+\beta_i \\ W_i^{\text{Q}}=\dfrac{\partial C_i^{\text{Q}}}{\partial Q_i}=\dfrac{-\xi_i^{\text{Q}}Q_i}{\sqrt{(S_{i,\max})^2-(Q_i)^2}} \end{cases} \tag{18}$$

$$\begin{cases} L_i^{\text{PP}}=\dfrac{\partial P_{\text{Loss}}}{\partial P_i^{\text{N}}}=2\sum\limits_{j=1}^{N}(\dfrac{R_{ij}P_j^{\text{N}}}{U_iU_j}) \\ L_i^{\text{PQ}}=\dfrac{\partial P_{\text{Loss}}}{\partial Q_i^{\text{N}}}=2\sum\limits_{j=1}^{N}(\dfrac{R_{ij}Q_j^{\text{N}}}{U_iU_j}) \\ L_i^{\text{QP}}=\dfrac{\partial Q_{\text{Loss}}}{\partial P_i^{\text{N}}}=2\sum\limits_{j=1}^{N}(\dfrac{X_{ij}P_j^{\text{N}}}{U_iU_j}) \\ L_i^{\text{QQ}}=\dfrac{\partial Q_{\text{Loss}}}{\partial Q_i^{\text{N}}}=2\sum\limits_{j=1}^{N}(\dfrac{X_{ij}Q_j^{\text{N}}}{U_iU_j}) \end{cases} \tag{19}$$

根据上述方程联立转化可得二元一致性变量表达式为：

$$\begin{cases} \lambda_i=\dfrac{-L_i^{\text{QP}}W_i^{\text{Q}}-(1-L_i^{\text{QQ}})W_i^{\text{P}}}{L_i^{\text{PQ}}L_i^{\text{QP}}-(1-L_i^{\text{PP}})(1-L_i^{\text{QQ}})} \\ w_i=\dfrac{-L_i^{\text{PQ}}W_i^{\text{P}}-(1-L_i^{\text{PP}})W_i^{\text{Q}}}{L_i^{\text{PQ}}L_i^{\text{QP}}-(1-L_i^{\text{PP}})(1-L_i^{\text{QQ}})} \end{cases} \tag{20}$$

二元一致性算法的更新规则表示为：

$$\begin{cases} \lambda_{i,k+1}=\sum\limits_{j=1}^{I}d_{ij}\lambda_{j,k}, i\in I_{\text{D}} \\ \lambda_{i,k+1}=\sum\limits_{j=1}^{I}d_{ij}\lambda_{j,k}+\mu_{\text{P}}\Delta P_{\text{Pr}}, i\in I_{\text{G}} \\ w_{i,k+1}=\sum\limits_{j=1}^{I}d_{ij}w_{j,k}, i\in I_{\text{D}} \\ w_{i,k+1}=\sum\limits_{j=1}^{I}d_{ij}w_{j,k}+\mu_{\text{Q}}\Delta Q_{\text{Pr}}, i\in I_{\text{G}} \end{cases} \tag{21}$$

式中：$\lambda_{i,k+1}$ 和 $w_{i,k+1}$ 为 VPPi 第 k+1 次迭代后的二元一致性变量；I_{D} 为自治节点；I_{G} 为主导节点；μ_{P} 和 μ_{Q} 分别为有功、无功功率调节系数；d_{ij} 为状态转移矩阵系数，由通信网络拓扑结构决定；ΔP_{Pr} 和 ΔQ_{Pr} 分别为有功、无功功率偏差。d_{ij}、ΔP_{Pr} 和 ΔQ_{Pr} 的表达式分别为：

$$d_{ij}=\frac{|l_{ij,k}|}{\sum\limits_{j=1}^{N}|l_{ij,k}|} \tag{22}$$

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{Pr}}=\sum\limits_{i=1}^{I}P_i-P_{\text{Loss}}-P_{\text{Pr}} \\ \Delta Q_{\text{Pr}}=\sum\limits_{i=1}^{I}Q_i-Q_{\text{Loss}}-Q_{\text{Pr}} \end{cases} \tag{23}$$

式中：$l_{ij,k}$ 为第 k 次迭代的 l_{ij}。

最后可根据式(17)和式(23)得到各 VPP 节点功率更新规则为：

$$\begin{cases} P_{i,k}=\dfrac{1}{2W_k^{\text{P}}}(\lambda_k(1-L_k^{\text{PP}})+w_kL_k^{\text{QP}}+W_k^{\text{Q}}) \\ Q_{i,k}= \\ \dfrac{w_k\varpi_k^{\text{QQ}}+\lambda_kL_k^{\text{PQ}}}{\xi_k^{\text{Q}}}\sqrt{\dfrac{(S_{k,\max}\xi_k^{\text{Q}})^2}{(w_k\varpi_k^{\text{QQ}}+\lambda_kL_k^{\text{PQ}})^2+(\xi_k^{\text{Q}})^2}} \end{cases} \tag{24}$$

式中：$P_{i,k}$ 和 $Q_{i,k}$ 分别为 VPPi 第 k 次迭代的输出有功、无功功率；$\varpi_k^{\text{QQ}}=1-L_k^{\text{QQ}}$。

2.3　收敛性证明

本文设计二元一致性算法的收敛性证明包括以下几个步骤：首先列写目标函数作为二元可微凸函数的性质表征式，之后通过李雅普诺夫多元函数[21]构造多元求和函数，进而结合凸函数性质表征式得到收敛关系，最终完成收敛性证明。具体证明流程如下文所述。

本文所设计二元一致性算法最终可实现：

$$\begin{cases} C_{1,k}^{\text{P}}=C_{2,k}^{\text{P}}=\cdots=C_{I,k}^{\text{P}}, \sum\limits_{i=1}^{I}P_{i,k}=\sum\limits_{i=1}^{I}P_{i,k+1} \\ C_{1,k}^{\text{Q}}=C_{2,k}^{\text{Q}}=\cdots=C_{I,k}^{\text{Q}}, \sum\limits_{i=1}^{I}Q_{i,k}=\sum\limits_{i=1}^{I}Q_{i,k+1} \end{cases} \tag{25}$$

$$\begin{cases} C_{i,k}^{\mathrm{P}} = \dfrac{\partial C_{i,k}}{\partial P_{i,k}} \\ C_{i,k}^{\mathrm{Q}} = \dfrac{\partial C_{i,k}}{\partial Q_{i,k}} \end{cases} \tag{26}$$

①目标函数 C 为二元可微凸函数，其在函数可行域 V_{FR} 内有如下性质：

$$\begin{cases} C_{i,k+1} - C_{i,k} \geq C_{i,k}^{\mathrm{P}} \Delta P_{i,k+1} + C_{i,k}^{\mathrm{Q}} \Delta Q_{i,k+1} \\ C_{i,k+1} - C_{i,k} \leq C_{i,k+1}^{\mathrm{P}} \Delta P_{i,k+1} + C_{i,k+1}^{\mathrm{Q}} \Delta Q_{i,k+1} \end{cases} \tag{27}$$

$$\begin{cases} \Delta P_{i,k+1} = P_{i,k+1} - P_{i,k} \\ \Delta Q_{i,k+1} = Q_{i,k+1} - Q_{i,k} \end{cases} \tag{28}$$

②构造李雅普诺夫函数 C^{L}，有：

$$C_k^{\mathrm{L}} = \sum_{i=1}^{I} C_{i,k} \tag{29}$$

在第 k 次迭代过程中，各自治区域内自治节点达到式(27)所示状态，即可得：

$$\begin{aligned} & C_{k+1}^{\mathrm{L}} - C_k^{\mathrm{L}} = \sum_{i=1}^{I} C_{i,k+1} - \sum_{i=1}^{I} C_{i,k} \leq \\ & \sum_{i=1}^{I} C_{i,k+1} - (C_{1,k+1} - C_{1,k+1}^{\mathrm{P}} \Delta P_{1,k+1} - C_{1,k+1}^{\mathrm{Q}} \Delta Q_{1,k+1}) - \\ & (C_{2,k+1} - C_{2,k+1}^{\mathrm{P}} \Delta P_{2,k+1} - C_{2,k+1}^{\mathrm{Q}} \Delta Q_{2,k+1}) - \cdots - \\ & (C_{I,k+1} - C_{I,k+1}^{\mathrm{P}} \Delta P_{I,k+1} - C_{I,k+1}^{\mathrm{Q}} \Delta Q_{I,k+1}) \leq \\ & \sum_{i=1}^{I} (C_{i,k+1}^{\mathrm{P}} \Delta P_{i,k+1} + C_{i,k+1}^{\mathrm{Q}} \Delta Q_{i,k+1}) = 0 \end{aligned} \tag{30}$$

式中：C_{k+1}^{L} 为第 k 次迭代的 C^{L}。

式(30)最终结果即为：$\lim(C_{k+1}^{\mathrm{L}} - C_k^{\mathrm{L}}) = 0$。至此可得证二元一致性算法的收敛性。

2.4 不等式约束处理

2.4.1 功率约束

本文通过功率修正(power correction，PC)过程以实现对功率限制约束式(12c)的处理，流程为：

当功率越限时，为了不改变越限 VPP 所表征的调节能力性质即功率因数大小，按等功率因数下的 VFR 边界值设定该 VPP 实际输出功率，并将该节点退出通信网络拓扑，更新网络拓扑矩阵。

当出现多个 VPP 功率越限时，选取越限程度最大的 VPP，对该 VPP 实施上述 PC 流程，之后重新进行一致性计算，并再次完成功率越限校核，直至所有 VPP 的运行点均在 VFR 边界内为止。

2.4.2 电压约束

本文通过二元一致性变量的修正方程以实现对越限电压的电压修正(voltage correction，VC)，进而满足电压约束限制。

为表征一致性迭代的电压越限过程中的电压变化与越限程度，需明确各节点注入功率变化对电压的影响，因此选用电压灵敏度[22]这一概念，以形成解决电压越限问题的依据。

$$\Delta U_m = \sum_{i=1}^{N} (\Delta P_i \sum_{j \in B_{i,m}} \frac{R_j}{U_j} + \Delta Q_i \sum_{j \in B_{i,m}} \frac{X_j}{U_j}) \tag{31}$$

式中：ΔU_m 为节点 m 的电压变化值；$B_{i,m}$ 为节点 i 到配电网功率流入节点所经过线路序号集合与节点 m 到配电网功率流入节点所经过线路的线路序号集合的交集。

由电压灵敏度可知，本文设定场景下的电压越限问题本质为 VPP 节点功率输出过高或过低导致无法支撑相应电压等级，进而导致功率越过规定范围出现电压越限。因此可通过调整各 VPP 节点对外输出功率特性，以解决电压越限问题。

下面以电压越上限为例，电压修正流程为：

节点电压受各 VPP 节点输出功率影响，由式(24)可知，各 VPP 节点输出功率的计算与一致性变量直接相关。故可通过增加二元一致性变量的修正方程，修正二元一致性变量的更新法则以解决电压越限问题。

当忽略电压约束进行优化计算时，若全局仅有一个 VPP 节点电压越上限，则该 VPP 节点保持在上限电压时的经济最优即为考虑电压约束的全局经济最优[23]。因此应当优先调整电压越限程度最严重的 VPP 节点的功率输出特性。

将电压越上限程度最严重的节点 m 的电压不等式约束写为等式约束：

$$U_m = U_{\max} \tag{32}$$

增加拉格朗日常数 ψ，相应的式(16)与式(17a)、(17b)所表示的拉格朗日常数计算式为：

$$\begin{aligned} \min_{P_i, Q_i, \lambda, w} \; & F = C + \lambda (\sum_{i=1}^{I} P_i - P_{\mathrm{Loss}} - P_{\mathrm{Pr}}) + \\ & w (\sum_{i=1}^{I} Q_i - Q_{\mathrm{Loss}} - Q_{\mathrm{Pr}}) + \psi (U_m - U_{\max}) \end{aligned} \tag{33}$$

$$\begin{cases} \dfrac{\partial F}{\partial P_i} = W_i^{\mathrm{P}} - \lambda_i (1 - L_i^{\mathrm{PP}}) - w_i (-L_i^{\mathrm{QP}}) - \psi_i (Y_i^{\mathrm{P}}) = 0 \\ \dfrac{\partial F}{\partial Q_i} = W_i - \lambda_i (-L_i^{\mathrm{PQ}}) - w_i (1 - L_i^{\mathrm{QQ}}) - \psi_i (Y_i^{\mathrm{Q}}) = 0 \end{cases} \tag{34}$$

式中：Y_i^{P} 和 Y_i^{Q} 的计算式为：

$$\begin{cases} Y_i^{\mathrm{P}} = \dfrac{\partial (U_m - U_{\max})}{\partial P_i} \\ Y_i^{\mathrm{Q}} = \dfrac{\partial (U_m - U_{\max})}{\partial Q_i} \end{cases} \tag{35}$$

基于式(34)可设置二元一致性变量的第 k 次迭代的修正方程为：

$$\begin{cases}\Delta\lambda_{i,k}=\dfrac{-L_{i,k}^{\mathrm{QP}}U_{i,k}^{\mathrm{Q}}-(1-L_{i,k}^{\mathrm{QQ}})U_{i,k}^{\mathrm{P}}}{L_{i,k}^{\mathrm{PQ}}L_{i,k}^{\mathrm{QP}}-(1-L_{k}^{\mathrm{PP}})(1-L_{i,k}^{\mathrm{QQ}})}\\ \Delta w_{i,k}=\dfrac{-L_{i,k}^{\mathrm{PQ}}U_{i,k}^{\mathrm{P}}-(1-L_{i,k}^{\mathrm{PP}})U_{i,k}^{\mathrm{Q}}}{L_{i,k}^{\mathrm{PQ}}L_{i,k}^{\mathrm{QP}}-(1-L_{i,k}^{\mathrm{PP}})(1-L_{i,k}^{\mathrm{QQ}})}\end{cases}\tag{36}$$

式中：$\Delta\lambda_{i,k}$ 和 $\Delta w_{i,k}$ 分别为 VPP 节点 i 第 k 次迭代的一致性变量 λ 和 w 的一致性变量修正值；$U_{i,k}^{\mathrm{P}}$ 和 $U_{i,k}^{\mathrm{Q}}$ 为基于式(35)设置的电压修正量，其表达式为：

$$\begin{cases}U_{i,k}^{\mathrm{P}}=-\kappa_{\lambda}Y_{i,k}^{\mathrm{P}}\sum\limits_{k_{\mathrm{am}}}(U_m-U_{\max})\\ U_{i,k}^{\mathrm{Q}}=-\kappa_{\mathrm{w}}Y_{i,k}^{\mathrm{Q}}\sum\limits_{k_{\mathrm{am}}}(U_m-U_{\max})\end{cases}\tag{37}$$

式中：κ_{λ} 和 κ_{w} 均为电压越限调整系数；k_{am} 为越限节点传递越限值的迭代次数。

至此，可由式(36)给出的一致性变量修正方程，通过对一致性变量的修正，调整节点功率输出，以解决节点电压越限问题。

对于节点电压越下限的情况，同样有类似式(35)和(37)的公式，为：

$$\begin{cases}Y_{i,k}^{\mathrm{P}}=\dfrac{\partial(U_m-U_{\min})}{\partial P_i}\\ Y_{i,k}^{\mathrm{Q}}=\dfrac{\partial(U_m-U_{\min})}{\partial Q_i}\end{cases}\tag{38}$$

$$\begin{cases}U_{i,k}^{\mathrm{P}}=\kappa_{\lambda}V_{i,k}^{\mathrm{P}}\sum\limits_{k_{\mathrm{bm}}}(U_m-U_{\min})\\ U_{i,k}^{\mathrm{Q}}=\kappa_{\mathrm{w}}V_{i,k}^{\mathrm{Q}}\sum\limits_{k_{\mathrm{bm}}}(U_m-U_{\min})\end{cases}\tag{39}$$

2.5　算法流程

基于上述所有问题描述、解决方案以及二元一致性变量的更新法则，可得到本文设计基于顶点枚举法的资源聚合和基于二元一致性算法的聚合体优化运行框架流程如图 3 所示。

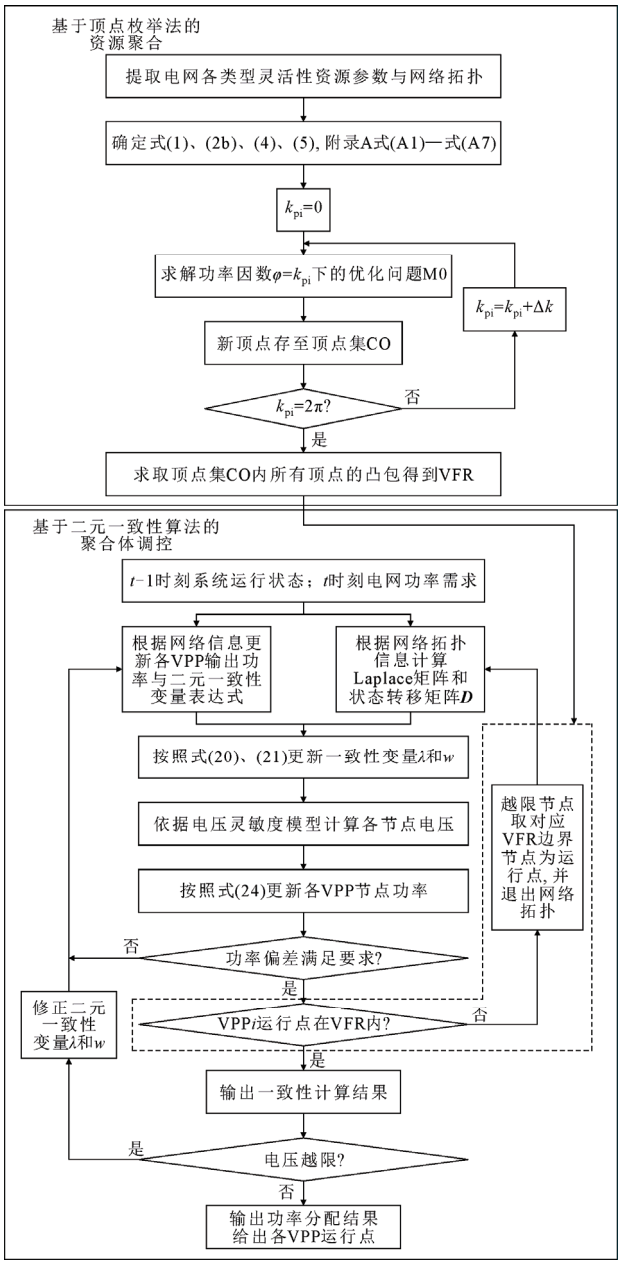


图 3　资源聚合与聚合体优化运行算法流程图

Fig.3　Flow chart of the operation algorithm for resource aggregation and aggregate optimization

3　算例分析

为验证本文算法可行性，选取包含 7 个 9 节点 VPP 的 13 节点主动配电网系统进行算例测试，所有算例测试均基于 MATLAB-2022A 平台、Intel(R) Core(TM) i5-12400 CPU 及商用求解器 Cplex-12.10.0。

针对本文所设计算例场景，做出如下假设：

1）仅考虑 VPP 的无功输出作为电压的无功支撑源，不考虑额外增加无功补偿设备。

2）二元一致性算法求解优化问题的决策变量为各 VPP 与配电网络 PCC 处的功率输出。

3.1　算例配置

本文所应用主动配电网系统的电力拓扑图与通信拓扑如图 4 所示。选取 VPP1 所在通信拓扑节

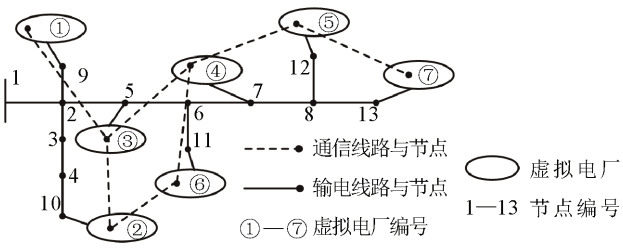


图 4　主动配电网系统电力拓扑与通信拓扑图

Fig.4　Active distribution network system power topology and communication topology

点为主导节点。完整系统参数与 VPP 内部拓扑结构见附录 B。

本文设置 3 组系统功率需求值来进行算例验证，以体现不同功率需求下，所提资源聚合与聚合体优化运行框架流程可行性，每组算例的时间间隔为 15 min，相关数据见表 1。分布式资源聚合与聚合体优化运行多时段运行示意图如图 5 所示。算例 N1 的系统初始状态见附录 C，算例 N2、N3 的系统初始状态均基于前一算例的运行结果。本文通过算例 N1、N3 分别验证算法与框架在正负功率需求下的可行性，通过算例 N2 验证功率越限处理方案与电压越限修正方程的可行性。

同时还设置集中式优化对照算例，以验证结果准确性，集中式优化对照算例为基于式(8)、式(9a)—式(9c)、式(11)、附录 A 式(A1)—式(A7)以及 VPP 内部资源约束条件的优化模型；设置传统一元一致性算法的对照算例，以验证本文所提二元一致性算法的优势所在，对照组算法流程见附录 D，一元一致性变量以及功率更新法则参照文献[16]。

设置系统相关参数为：分布式电源不确定性概率模型置信度为 0.95；顶点枚举法中的 Δk 为 $\pi/100$；功率调节系数 μ_{P} 和 μ_{Q} 为 0.25；收敛终止条件取 0.001；电压越限调整系数 κ_{λ} 和 κ_{w} 均为 0.23。

3.2 算例分析

3.2.1 算例 N1

该部分将依次分析本文所提方法与集中式优化和传统一致性算法的对照情况。

通过顶点枚举法在 08:45 后的 67.952 s 内完成下一时刻(09:00)7 个 VPP 所有 VFR 的求解，并在 09:00—09:15 时段内使用该 VFR 表征分布式资源的有功-无功调节能力。图 6 给出了二元一致性算法的 157 次迭代收敛过程以及迭代收敛后各 VPP 运行点。最终在 09:00 后的 311.587 ms 内完成聚合体优化运行求解。可见本文所提框架流程能够实现多 VPP 的有效控制，并充分利用其有功-无功调节能力，实现了电网有功-无功经济优化的问题求解，提升了电网的运行灵活性，与集中式优化结果对比见表 2。

本文所提方法计算得到的主动配电网输出有功功率偏差为 0.0520%，无功功率偏差为 0.0507%，成本偏差为 0.0042%。与集中式优化的计算误差主要来源于 VFR 边界误差、式(10)所示聚合成本模型误差以及电压修正过程引起的误差。二元一致性变量、有功-无功功率以及相应成本的迭代收敛过程如图 7 所示。在图 8 的最后一次迭代后，实线与虚线之差即为网损，其中有功网损占比为 3.7488%，无功网损占比为 5.7292%。

表 1 系统功率需求

Table 1 System power demand

算例编号	时刻	功率需求	
		P/MW	*Q*/MVar
N1	09:00	25	8.2170
N2	09:15	38	11.0833
N3	09:30	−8	−2.6290

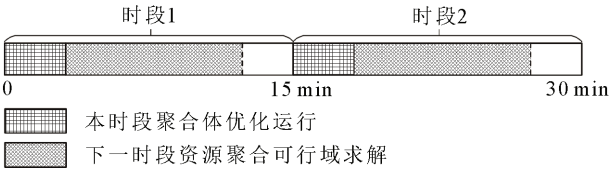


图 5 资源聚合与聚合体优化多时段运行示意图

Fig.5 Schematic diagram of multi-period operation of resource aggregation and aggregate optimization

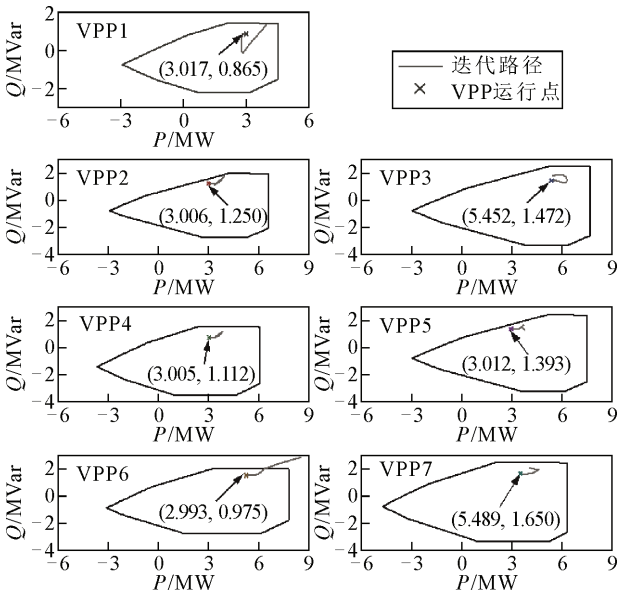


图 6 各 VPP 的 VFR、运行点以及运行点迭代路径

Fig.6 VFR, runpoint and runpoint iteration path of each VPP

表 2 二元一致性算法与集中式优化的结果对照

Table 2 Binary consistency algorithm is compared with the results of the centralized optimization

方法	*P*/MW	*Q*/MVar	成本/元
二元一致性算法	24.9870	8.2128	551.9646
集中式优化	25	8.2170	551.9877

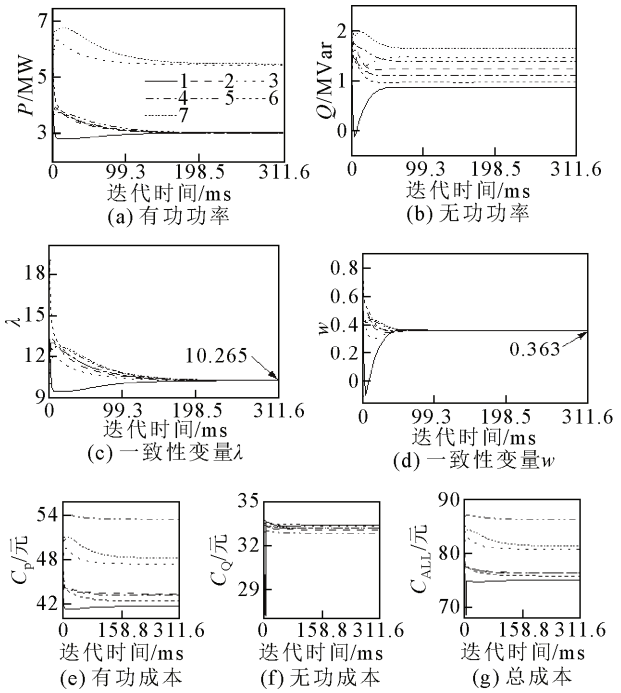


图 7　各 VPP 迭代收敛过程

Fig.7　Iterative convergence process of each VPP

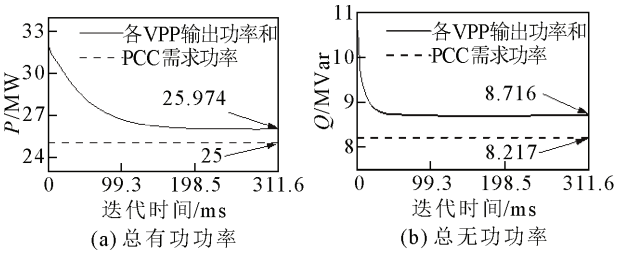


图 8　系统总输出功率迭代收敛过程

Fig.8　Iterative convergence process of the total system output power

传统一致性算法的对照组需分别进行 2 个一致性变量的计算与迭代，这使得计算时间大大增加。由于有功-无功的耦合问题，导致 2 个一致性变量收敛之间无法设置交互迭代，则最终的收敛结果可能存在局部最优，并非全局最优。由表 3 可知，本文所提二元一致性算法在计算流程简洁性、效率与精度上具有优势。

3.2.2　算例 N2

算例 N2 所有 VFR 计算均在上一时段(09:00—09:15)的 76.105 s 内完成。二元一致性变量、有功-无功功率以及相应成本的迭代收敛过程如图 9 所示。二元一致性变量经过 305.7 ms 迭代后初次收敛，但 VPP1、VPP3 和 VPP6 均出现功率越限问题，主动配电网节点 6、12 和 13 均出现电压越上限问题。

表 3　二元一致性算法与传统一致性算法的结果对照

Table 3　Results of the binary consistency algorithm are compared with the traditional consistency algorithm

方法	*P*/MW	*Q*/MVar	成本/元	计算耗时/ms
二元一致性算法	24.9870	8.2128	551.9646	311.5871
传统一致性算法	25.0141	8.2201	569.8850	508.2623

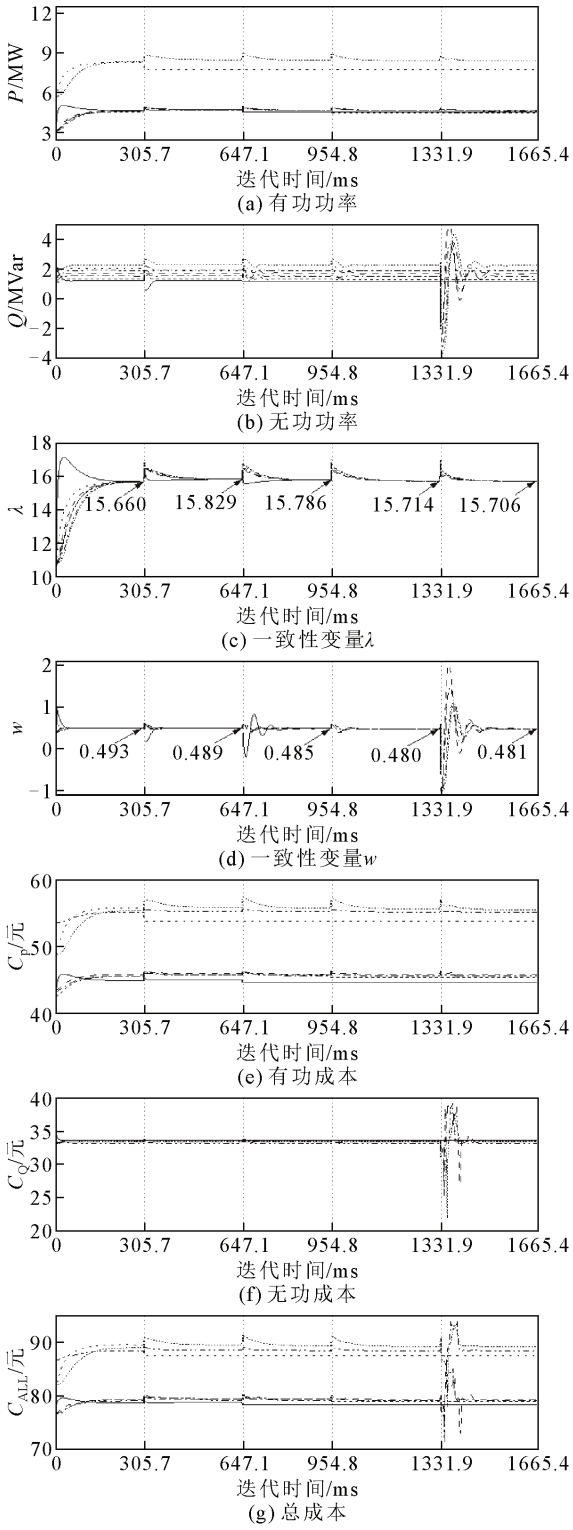


图 9　各 VPP 迭代收敛过程

Fig.9　Iterative convergence process of each VPP

对此，按照第 2.4.1 节所设计的功率越限处理原则，对功率越限幅度最大的 VPP3(5 节点)采取定功率因数角 0.24 运行，并将该节点退出通信网络拓扑。新的一轮迭代过程在总迭代过程的第 647.1 ms 迭代后得以收敛，但 VPP1 和 VPP6 仍存在功率越限。采取与上述相同的方法，依次在第 647.1、954.8 ms 迭代后对 VPP1 和 VPP6 进行功率越限调整。最终在第 1331.9 ms 迭代后完成收敛，此时系统内所有 VPP 均未出现功率越限。功率运行点调整过程见图 10。

在经过 954.8 ms 迭代后，电压仍存在越上限问题。通过第 2.4.2 节所述二元一致性变量修正方程，对越限程度最大的 VPP7(13 节点)采用二元一致性变量进行修正，最终在第 1665.4 ms 迭代后达到收敛。电压修正过程中的电压变化见图 11。综上，本文通过充分利用分布式资源的有功-无功调节能力，实现了各节点的电压支撑，提升了分布式资源参与电网运行的灵活性。与集中式优化对照结果见表 4。

由表 4 可知，本文所提方法计算的主动配电网输出有功功率的偏差为 0.8367%，无功功率偏差为 0.8367%，成本偏差为 0.1513%。有功网损占比为 4.5477%，无功网损占比为 7.7660%。

3.2.3 算例 N3

算例 N3 所有 VFR 计算均在上一时段(09:15—09:30)的 64.1290 s 内完成。二元一致性变量经过 355.3 ms 迭代后最终达到收敛，可见本文所提框架流程可有效解决负功率需求下的资源聚合与聚合体优化运行问题。通过与集中式优化对比可知，主动配电网输出有功功率的偏差为 0.5922%，无功功率偏差为 0.5922%。有功网损占比为 4.5986%，无功网损占比为 7.7789%。相关参数迭代收敛过程与各 VPP 运行点等内容见附录 E。

4 结论

1）本文针对分布式资源聚合与聚合体优化运行问题，提出了考虑两类决策变量的二元一致性算法，相较于传统一致性算法具有计算流程简洁、效率与精度高的优势。

2）设计了基于可行域边界值的功率越限调整规则以满足功率约束、基于电压灵敏度模型的二元一致性变量修正方程以满足电压约束，实现了一致性算法对多类型约束的满足。

3）构建了资源聚合和聚合体优化运行的框架流程，充分利用了分布式资源的有功-无功调节能

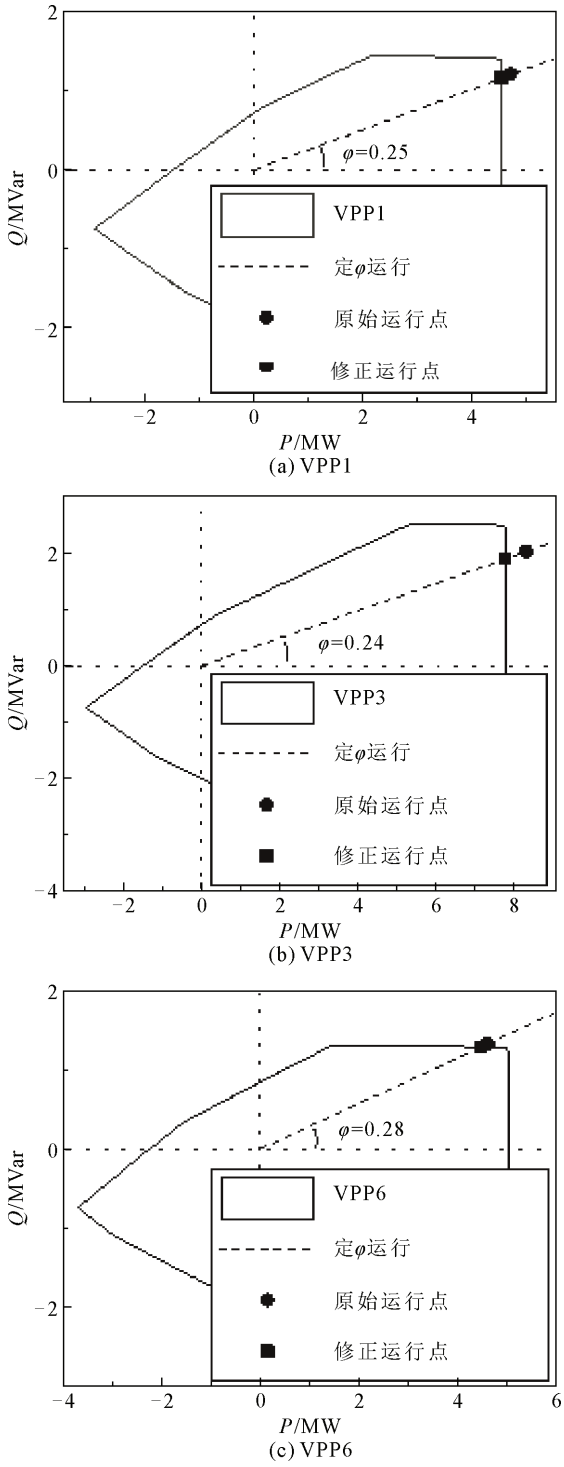


图 10 VPP 运行点修正过程

Fig.10 VPP operating point correction process

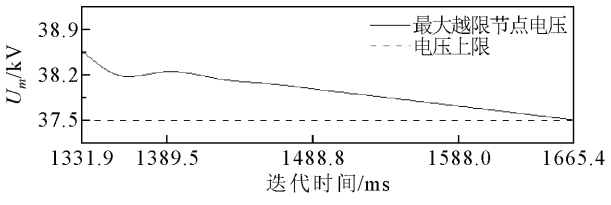


图 11 最大越限节点电压修正过程

Fig.11 Correction process of maximum off-limit node voltage

表 4　本文所提方法与集中式优化的对照

Table 4　Comparison between the proposed method and the centralized optimization

组别	*P*/MW	*Q*/MVar	成本/元
本文所提方法	37.6820	10.9906	580.1343
集中式优化	38.0000	11.0833	581.0132

力，提升了其参与电网运行的灵活性。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献　References

[1] 程韧俐，周保荣，史　军，等. 面向区域统一电力市场的超大城市虚拟电厂关键技术研究综述[J]. 南方电网技术，2023，17(4)：90-100，131.
CHENG Renli, ZHOU Baorong, SHI Jun, et al. Review of key technologies for mega-city virtual power plants upon regional unified power market[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(4): 90-100, 131.

[2] 刘鑫蕊，罗雨晴，侯　敏，等. 阶梯式碳交易的城市多能系统能量互补优化调度策略[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2275-2286.
LIU Xinrui, LUO Yuqing, HOU Min, et al. Energy complementation optimal scheduling strategy of urban multi-energy system with stepped carbon trading[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2275-2286.

[3] 国家能源局. 关于加强新型电力系统稳定工作的指导意见(征求意见稿)[EB/OL]. (2023-04-20)[2023-04-24]. https：//www. nea. gov. cn/1310713405_16822973939071n. doc.
National Energy Administration. Guiding opinions on strengthening the stability of new power systems (draft for comments)[EB/OL]. (2023-04-20)[2023-04-24]. https://www.nea.gov.cn/1310713405_16822973939071n. doc.

[4] 康重庆，陈启鑫，苏　剑，等. 新型电力系统规模化灵活资源虚拟电厂科学问题与研究框架[J]. 电力系统自动化，2022，46(18)：3-14.
KANG Chongqing, CHEN Qixin, SU Jian, et al. Scientific problems and research framework of virtual power plant with enormous flexible distributed energy resources in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 3-14.

[5] 王剑波，李建林，周喜超，等. 基于全景理论的分散式储能系统集群优化调度策略[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2742-2750.
WANG Jianbo, LI Jianlin, ZHOU Xichao, et al. Optimal scheduling strategy of decentralized energy storage system based on panoramic theory[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2742-2750.

[6] 唐文虎，申悦晴，钱　瞳，等. 双碳目标下城市楼宇群能源系统灵活性量化分析与调控技术研究现状与展望[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3423-3436.
TANG Wenhu, SHEN Yueqing, QIAN Tong, et al. Research review and prospects of quantitative analysis and regulation technique for flexible resources in urban energy system embedded with building clusters under dual carbon target[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3423-3436.

[7] 刘浩文，刘　东，陈张宇，等. 多级协同虚拟电厂环境下的无功辅助服务优化出清[J]. 电网技术，2021，45(7)：2533-2541.
LIU Haowen, LIU Dong, CHEN Zhangyu, et al. Optimal reactive power service clearing based on multilevel cooperative VPP[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2533-2541.

[8] ZHANG T C, WANG J X, WANG H, et al. On the coordination of transmission-distribution grids: a dynamic feasible region method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(2): 1857-1868.

[9] TAN Z F, ZHONG H W, WANG X Y, et al. An efficient method for estimating capability curve of virtual power plant[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(3): 780-788.

[10] 陈会来，张海波，王兆霖. 不同类型虚拟电厂市场及调度特性参数聚合算法研究综述[J]. 中国电机工程学报，2023，43(1)：15-27.
CHEN Huilai, ZHANG Haibo, WANG Zhaolin. A review of market and scheduling characteristic parameter aggregation algorithm of different types of virtual power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 15-27.

[11] 许泽凯，和敬涵，刘　婴，等. 基于耦合约束解耦的虚拟电厂动态可行域求解方法[J/OL]. 中国电机工程学报，2023：1-13 [2023-07-06]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM. 20230608. 1559.014. html.
XU Zekai, HE Jinghan, LIU Zhao, et al. Solution method of virtual power plant dynamic feasible region based on decoupling of coupling constraints[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2023: 1-13[2023-07-06]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20230608.1559.014.html.

[12] 姜　华，杨知方，林　伟，等. 计及分布式新能源不确定性的虚拟电厂调度边界概率分布刻画方法[J]. 中国电机工程学报，2022，42(15)：5565-5575.
JIANG Hua, YANG Zhifang, LIN Wei, et al. Probability distribution of dispatch region for a virtual power plant considering distributed renewable uncertainties[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5565-5575.

[13] 陈新和，裴　玮，邓　卫，等. 数据驱动的虚拟电厂调度特性封装方法[J]. 中国电机工程学报，2021，41(14)：4816-4828.
CHEN Xinhe, PEI Wei, DENG Wei, et al. Data-driven virtual power plant dispatching characteristic packing method[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4816-4828.

[14] 刘科研，盛万兴，赵鹏杰，等. 基于一致性算法的跨台区光伏分布式控制策略[J]. 高电压技术，2021，47(12)：4431-4439.
LIU Keyan, SHENG Wanxing, ZHAO Pengjie, et al. Distributed control strategy of photovoltaic cross-district based on consistency algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4431-4439.

[15] 蒲天骄，刘　威，陈乃仕，等. 基于一致性算法的主动配电网分布式优化调度[J]. 中国电机工程学报，2017，37(6)：1579-1589.
PU Tianjiao, LIU Wei, CHEN Naishi, et al. Distributed optimal dispatching of active distribution network based on consensus algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1579-1589.

[16] 贺　悝，谭庄熙，李欣然，等. 考虑荷电状态一致性的分布式储能电站一次调频控制策略[J/OL]. 高电压技术，2023：1-13 [2023-07-14]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve. 20221884.
HE Li, TAN Zhuangxi, LI Xinran, et al. Control strategy of primary frequency regulation for distributed energy storage stations considering SOC consensus[J/OL]. High Voltage Engineering, 2023: 1-13 [2023-07-14]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve. 20221884.

[17] 黄　彪，朱自伟，钟少云，等. 基于一致性算法的主动配电网源-荷-储分布式协调优化调度[J]. 智慧电力，2019，47(8)：91-98.
HUANG Biao, ZHU Ziwei, ZHONG Shaoyun, et al. Distributed coordinated optimal dispatch of source-load-storage in ADN based on consensus algorithm[J]. Smart Power, 2019, 47(8): 91-98.

[18] 姜　飞，林政阳，何桂雄，等. 基于动态一致性算法的光伏-储能分布式协调电压控制[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版)，2021，54(12)：1299-1308.

JIANG Fei, LIN Zhenyang, HE Guixiong, et al. Coordinated voltage control of distributed photovoltaic-energy-storage systems based on a dynamic consensus algorithm[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2021, 54(12): 1299-1308.

[19] WANG S Y, WU W C, CHEN Q Z, et al. Stochastic flexibility evaluation for virtual power plant by aggregating distributed energy resources[J/OL]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022[2023-11-24]. https: //doi. org/10.17775/CSEEJPES. 2021.07410.

[20] QU M, DING T, WEI W, et al. An analytical method for generation unit aggregation in virtual power plants[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 5466-5469.

[21] CAI N N, MITRA J. A multi-level control architecture for master-slave organized microgrids with power electronic interfaces[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 109: 8-19.

[22] 刘 琪，王守相，吉兴全. 主动配电网宽适应性潮流灵敏度分析模型[J]. 电力系统自动化，2020，44(13)：81-88.
LIU Qi, WANG Shouxiang, JI Xingquan. Power flow sensitivity analysis model with wide adaptability for active distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(13): 81-88.

[23] 王 勇，陈 明，张 明，等. 基于等网损微增率的主动配电网分布式无功优化方法[J]. 电网技术，2017，41(12)：3780-3788.
WANG Yong, CHEN Ming, ZHANG Ming, et al. Distributed reactive power optimization for active distribution network based on equal incremental rate of network loss[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 3780-3788.



许泽凯
2000—，男，硕士生
研究方向为灵活性资源聚合、输配协同优化等
E-mail:21121517@bjtu.edu.cn

XU Zekai



刘 婴(通信作者)
1991—，男，博士，副教授，硕导
研究方向为电力系统优化运行、电力系统暂态稳定分析与控制等
E-mail:liuzhao1@bjtu.edu.cn

LIU Zhao
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author



和敬涵
1964—，女，博士，教授，博导
研究方向为智能电网、交直流混联输/配电网保护与控制、轨道交通电气化、电力系统优化运行等
E-mail:jhhe@bjtu.edu.cn

HE Jinghan
Ph.D., Professor

收稿日期 2023-07-24 修回日期 2023-09-06 编辑 程子丰

附录 A

VPP 内部网络拓扑约束表示形式如下：

$$\begin{aligned} P_{j,t}^{\mathrm{N}} &= \sum_{l=1}^{L_{\mathrm{F}}} P_{j,l,t}^{\mathrm{F}} - \sum_{l=1}^{L_{\mathrm{H}}} P_{j,l,t}^{\mathrm{H}} + \sum_{l=1}^{L_{\mathrm{E}}} (P_{j,l,t}^{\mathrm{dis}} - P_{j,l,t}^{\mathrm{ch}}) \\ &= \sum_{m:j\to m} P_{jm,t}^{\mathrm{LN}} - \sum_{i:i\to j} (P_{ij,t}^{\mathrm{LN}} - r_{ij} I_{ij,t}), \forall j \in \mathbb{N} \end{aligned} \tag{A1}$$

$$\begin{aligned} Q_{j,t}^{\mathrm{N}} &= \sum_{l=1}^{L_{\mathrm{F}}} Q_{j,l,t}^{\mathrm{F}} - \sum_{l=1}^{L_{\mathrm{H}}} Q_{j,l,t}^{\mathrm{H}} \\ &= \sum_{m:j\to m} Q_{jm,t}^{\mathrm{LN}} - \sum_{i:i\to j} (Q_{ij,t}^{\mathrm{LN}} - x_{ij} I_{ij,t}), \forall j \in \mathbb{N} \end{aligned} \tag{A2}$$

$$v_{j,t} = v_{i,t} - 2(r_{ij} P_{ij,t}^{\mathrm{LN}} + x_{ij} Q_{ij,t}^{\mathrm{LN}}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij} \tag{A3}$$

$$\underline{I}_{ij} \le I_{ij,t} \le \bar{I}_{ij} \tag{A4}$$

$$\underline{v}_i \le v_{i,t} \le \bar{v}_i \tag{A5}$$

$$\begin{cases} P_t = -\sum_{ij\in\Lambda_O^{\mathrm{LN}}} P_{ij,t}^{\mathrm{LN}} \\ Q_t = -\sum_{ij\in\Lambda_O^{\mathrm{LN}}} Q_{ij,t}^{\mathrm{LN}} \end{cases} \tag{A6}$$

$$\left\| \begin{matrix} 2P_{ij,t}^{\mathrm{LN}} \\ 2Q_{ij,t}^{\mathrm{LN}} \\ I_{ij,t} - v_{i,t} \end{matrix} \right\| \le I_{ij,t} + v_{i,t} \tag{A7}$$

式中：$P_{i,t}^{\mathrm{N}}$ 和 $Q_{i,t}^{\mathrm{N}}$ 分别为 t 时刻节点 i 的有功、无功功率；$P_{ij,t}^{\mathrm{LN}}$ 和 $Q_{ij,t}^{\mathrm{LN}}$ 分别为 t 时刻线路 ij 的有功、无功功率；r_{ij} 和 x_{ij} 分别为线路 ij 的电阻和电抗；$I_{ij,t}$ 为线路 ij 的电流平方值；$v_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的电压的平方值；$\bar{v}_i$ 和 $\underline{v}_i$ 分别为电压平方的上下限值；P_t 和 Q_t 分别为 t 时刻 VPP 在 PCC 的输出有功、无功功率。

附录 B

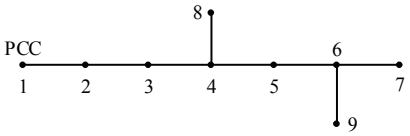


图 B1　9 节点 VPP 内部网络拓扑

Fig.B1　9-node VPP internal network topology

表 B1　VPP 内部网络拓扑线路参数

Table B1　VPP internal network topology line parameters

节点 i	节点 j	r	x
1	2	0.022	0.0116
2	3	0.0547	0.0282
3	4	0.3212	0.1654
4	5	0.0949	0.0488
4	8	0.574	0.2959
5	6	0.1292	0.066
6	7	0.0871	0.045
6	9	0.5329	0.2744

表 B2　VPP 内资源配置

Table B2　Resource configuration in VPP

VPP	全控类电源 /位置(功率)	半控类电源 /位置(功率)	储能类资源 /位置(功率/容量)
1	9(2 MW)	2(2 MW),5(1 MW)	7(2 MW/4 MWh)
2	3(3 MW),9(2 MW)	8(2 MW)	5(2 MW/4 MWh)
3	3(3 MW),9(2 MW)	8(2 MW)	2(2 MW/4 MWh)
4	2(3 MW)	5(1 MW),9(2 MW)	3(3 MW/6 MWh)
5	2(2 MW),3(3 MW)	7(2 MW),9(1 MW)	5(2 MW/4 MWh)
6	9(3 MW)	2(2 MW)	2(2 MW/4 MWh) 7(1 MW/2 MWh)
7	3(3 MW),9(2 MW)	7(2 MW)	5(3 MW/9 MWh)

表 B3　各 VPP 成本系数

Table B3　Each VPP cost factor

VPP	P_{down}	P_{up}	α	β	γ	ζ	ξ
1	—	−1.6587	0.2080	1.8180	36.5000	33.6245	2.1910
	−1.6587	−0.6106	0.0095	1.1597	35.9540		
	−0.6106	0.8990	0.2080	1.4020	36.0280		
	0.8990	2.9952	0.0095	1.7588	35.8676		
	2.9952	4.7115	0.2080	0.5700	37.6480		
	4.7115	5.2532	0.1108	1.4861	35.4898		
	5.2532	—	0.2370	0.1600	38.9730		
2	—	−0.1010	0.2080	1.818	34.7000	29.9500	2.1830
	−0.1010	1.9952	0.0095	1.7779	34.6980		
	1.9952	3.7115	0.2080	0.9860	35.4880		
	3.7115	4.5063	0.0755	1.9696	33.6626		
	4.5063	8.0000	0.1185	1.5820	34.5360		
	8.0000	—	0.2370	−0.3140	42.1200		
3	—	−1.6587	0.2080	1.8180	35.9000	32.0724	2.1700
	−1.6587	0.4375	0.0095	1.1597	35.3540		
	0.4375	3.7115	0.2080	0.9860	35.3920		
	3.7115	4.5063	0.0755	1.9696	33.5666		
	4.5063	8.0000	0.1185	1.5820	34.4400		
	8.0000	—	0.2370	−0.3140	42.0240		
4	—	−1.6587	0.2080	1.8180	36.5000	32.1540	2.1990
	−1.6587	−0.6106	0.0095	1.1597	35.9540		
	−0.6106	0.8990	0.2080	1.4020	36.0280		
	0.8990	2.9952	0.0095	1.7588	35.8676		
	2.9952	4.7115	0.2080	0.5700	37.6480		
	4.7115	7.1308	0.1108	1.4861	35.4898		
	7.1308	—	0.2370	−0.3140	41.9080		
5	—	−1.6587	0.2080	1.8180	44.6000	30.9704	2.1950
	−1.6587	−0.6106	0.0095	1.1597	44.0540		
	−0.6106	0.8990	0.2080	1.4020	44.1280		
	0.8990	2.9952	0.0095	1.7588	43.9676		
	2.9952	4.7115	0.2080	0.5700	45.7480		
	4.7115	5.5063	0.0755	1.8186	42.8065		
	5.5063	9.0000	0.1185	1.3450	44.1105		
	9.0000	—	0.2370	−0.7880	53.7090		
6	—	−2.0000	0.2080	2.2340	36.8160	34.1231	2.1400
	−2.0000	−0.2019	0.1040	1.8180	36.4000		
	−0.2019	1.9904	0.0091	1.7797	36.3961		
	1.9904	4.0000	0.1040	1.4020	36.7720		
	4.0000	4.7115	0.2080	0.5700	38.4360		
	4.7115	5.2532	0.1108	1.4861	36.2778		
	5.2532	—	0.2370	0.1600	39.7610		

7	—	−1.6587	0.2080	1.8180	35.9000	29.3700	2.2100
	−1.6587	0.4375	0.0095	1.1597	35.3540		
	0.4375	3.7115	0.2080	0.9860	35.3920		
	3.7115	7.2616	0.0755	1.9696	33.5666		
	7.2616	9.0000	0.1185	1.3450	35.8345		
	9.0000	—	0.2370	-0.7880	45.4330		

表 B4　13 节点主动配电网线路参数

Table B4　Line parameters of 13-node active distribution network

节点 i	节点 j	r	x
1	2	0.3664	0.1807
2	5	0.0547	0.0282
2	9	0.5416	0.2789
2	3	0.1930	0.0990
3	4	0.7431	0.3827
4	10	1.3110	0.6752
5	6	0.0598	0.0308
6	11	0.2905	0.1496
6	7	0.0547	0.0282
7	8	0.6750	0.3481
8	12	0.0547	0.0282
8	13	0.3942	0.2030

附录 C

表 C1　算例 N1 系统初始值

Table C1　Calculation example N1 system initial value

编号	初始值/(MW, MVA)	编号	初始值/(MW, MVA)
VPP1	(3.8000,1.2490)	VPP5	(3.7000,1.2161)
VPP2	(3.2000,1.0518)	VPP6	(5.4000,1.7749)
VPP3	(5.3000,1.7420)	VPP7	(5.9000,1.9392)
VPP4	(3.3000,1.0846)		

附录 D

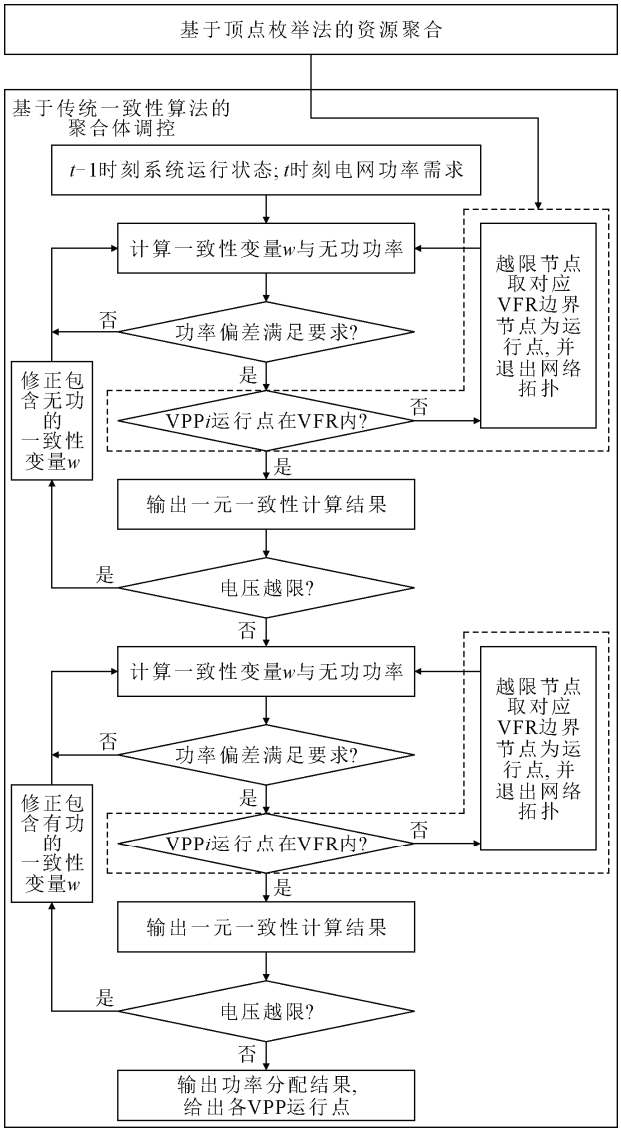


图 D1　基于一元一致性算法的聚合体优化运行算法流程图

Fig.D1　Flow chart of the aggregate optimization operation algorithm based on the unary consistency algorithm

附录 E

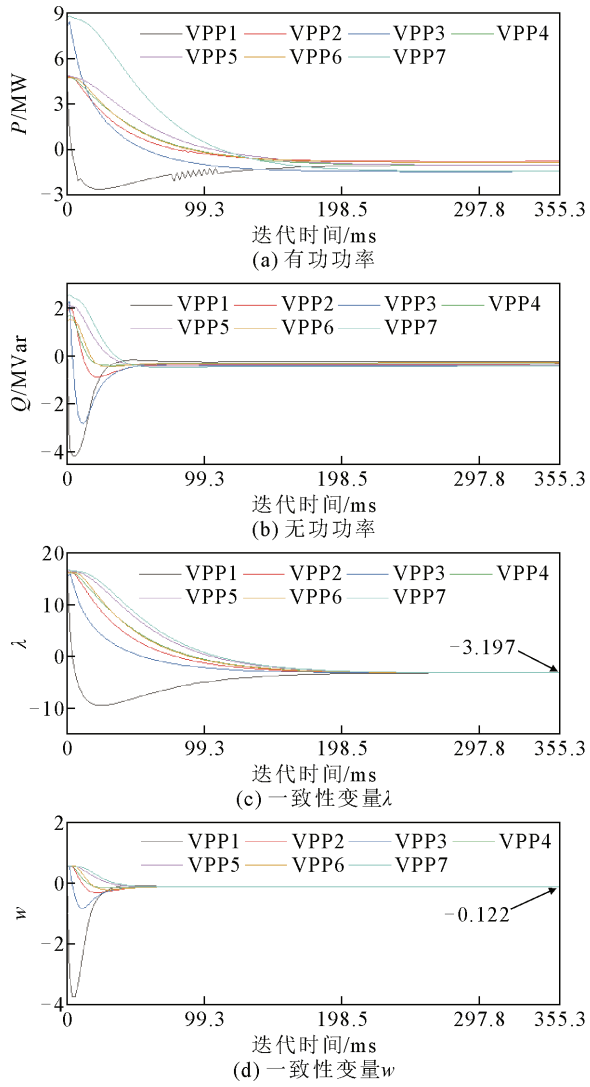


图 E1　各 VPP 迭代收敛过程

Fig.E1　Iterative convergence process of each VPP

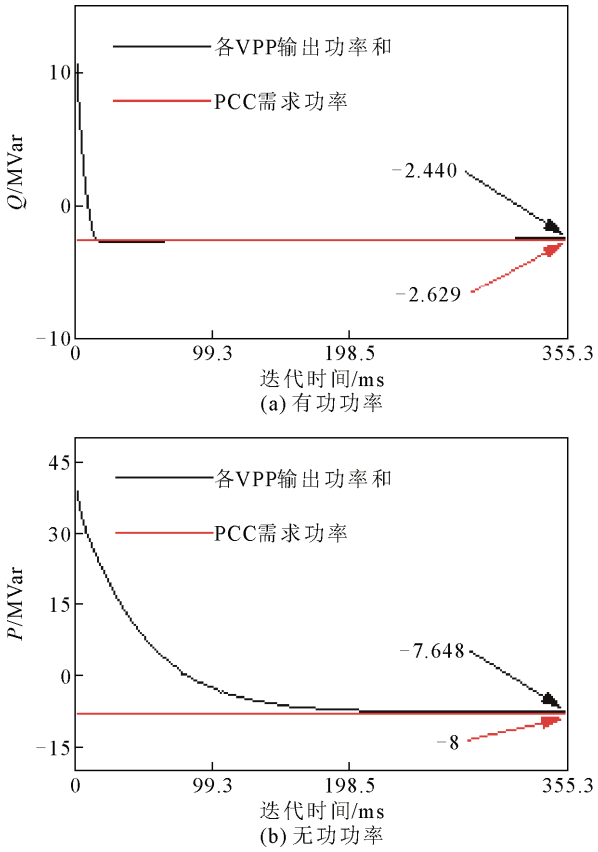


图 E2　各 VPP 输出功率和的收敛过程

Fig.E2　Convergence process of the output power sum of each VPP

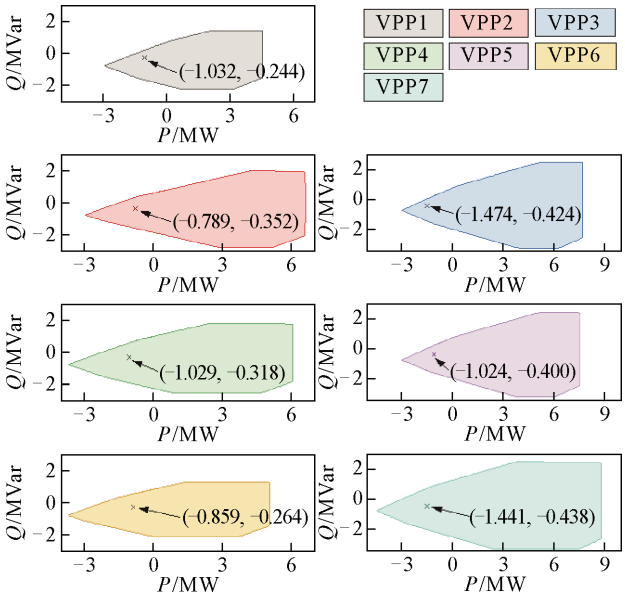


图 E3　各 VPP 的 VFR 与运行点

Fig.E3　VFR and operating point of each VPP