DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)08-0156-05

结合GRN和TGTransformer的配电网分层分区电力电量平衡方法

李庆波，赵 昂，田寿涛，张冰哲

（国网新疆电力有限公司经济技术研究院，新疆 乌鲁木齐 830000）

摘 要：为促进配电网电力电量平衡，提出结合门控残差网络（gated residual network，GRN）和多头注意力机制（TGTransformer）的配电网分层分区电力电量平衡方法。以满足配电网分层电力电量平衡控制为目标，建立包含决策层、协调层和设备层的协调管理框架，根据应用社区发现边划分原理生成数个配电网分区。针对所采集到的历史数据进行预处理，结合GRN（门控残差网络）和多头注意力机制，构建结合GRN和TGTransformer的负荷预测模型，将预处理后的数据输入其中，得到配电网分区未来电力电量负荷。最后，以满足用电负荷需求为前提，采用柔性计算的方式调节电力机组及储能装置输出，实现配电网电力电量供需平衡。实验表明，方法应用后，对比配电网电力输出值与实际用电需求负荷，二者之间的差值总是低于130 MW，满足了电量平衡控制要求，证实了方法的有效性。

关键词：多元负荷预测；门控残差；多头交流自注意力；分层分区；电量平衡；柔性计算

中图分类号：TP18 **文献标识码：**A **文章编号：**1003-7241（2025）08-0156-05

Hierarchical and Partitioned Power and Electricity Balance Method for Distribution Networks Based on GRN and TGTransformer

LI Qingbo, ZHAO Ang, TIAN Shoutao, ZHANG Bingzhe

(Economic Research Institute, State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830000, China)

Abstract: In order to promote the power and electricity balance of distribution network, a hierarchical and partitioned power and electricity balance method based on gated residual network (GRN) and TGTransformer is proposed. In order to meet the hierarchical power and electricity balance control of distribution network, a coordination management framework including decision-making layer, coordination layer and equipment layer is established, and several distribution network partitions are generated according to the principle of community discovery edge partition. The collected historical data are preprocessed. Combined with GRN and multi head attention mechanism, a load forecasting model combining GRN and TGTransformer is constructed. The preprocessed data are input into it to obtain the future power load of distribution network partition. Finally, on the premise of meeting the demand of power load, the output of power units and energy storage devices is adjusted by flexible calculation to achieve the balance of power supply and demand in distribution network. Experiments show that: after the application of the method, the difference between the power output value of distribution network and the actual power demand load is always less than 130 MW, which meets the requirements of power balance control, and verifies the effectiveness of the method.

Keywords: multivariate load forecasting; gate control residual; multiple communication self attention; layered partitioning; electricity balance; flexible computing

0 引言

为了满足碳减排要求，配电网开始不断接入新能源发电装置，形成以新能源为主体的新型电力系统[1]。在风电、光伏等大量新能源发电装置发挥作用后，引起了波动性、低可控性等问题，极大影响了配电网运行的可靠性[2]。为了应对配电网规划带来的不确定性，人们开始重视对电力电量供需平衡关系的研究，在满足配电网供电需求的同时，提升电力资源的利用效率。因此，多种类型的配电网电力电量平衡方法涌现出来。

文献[3]将配电网的电源装机和负荷需求结合起来，明确不同时间段电力系统每个电源的可靠电力支撑。进行大量的电力电量平衡模拟分析，以最小弃风、弃光量为目标，建立电力电量平衡控制模型，得到最优供需平衡方案。实验结果表明，该方法平衡处理后无法满足电力负荷要求。文献[4]从新能源配电网历史运行数据入手，明确电力电量平衡的风险特性。再结合配电网所在区域的市场机制、源网荷发展态势，给出一种可以高效消纳新能源的电力电量平衡方法。但是，该方法实施成本较高。文献[5]以包含大量新能源发电装置的配电网为研究对象，提出一种基于柔性计算的电力电量平衡方法。采用

*基金项目：国家电网和浙江电力公司重大科技专项（SGCC-MPLG027-2012）

收稿日期：2023-11-27

柔性参数的形式，展示当前配电网的源网荷储相关数据，通过柔性不等式描述电力电量平衡条件，实现电力电量平衡控制。算例验证结果显示，该方法灵活性较差。

以加强配电网电力电量平衡效果为目标，本研究给出一种结合GRN和TGTransformer的平衡方法。在门控残差网络和多头注意力机制的共同作用下，得到精准的配电网分区负荷预测结果，再结合柔性计算模式实现电力电量平衡。

1 设计结合GRN和TGTransformer的配电网分层分区电力电量平衡方法

1.1 建立配电网分层分区方案

配电网的电力电量平衡，需要电力系统众多子模块的合作才能实现。为了取得更优的电力电量平衡效果，建立包括决策层、协调层和设备层三个主要层次结构的协调控制框架，高效执行电力电量平衡操作。其中，决策层负责辅助多个子模块之间进行配电数据交互，并将对应的平衡控制指令下达到目标区域。协调层在接收到指令后启动内部调节方案，对区域内负荷节点开关下发精准命令，而设备层只需要按照命令执行对应的动作，最终满足配电网分层电力电量平衡目标。

考虑到配电网覆盖范围很大，且内部拓扑结构较为复杂，为了简化电力电量平衡工作，提出应用社区发现边划分原理，对配电网进行划分，得到多个配电网分区，再对每个分区分别进行平衡处理[6]。分区过程中，需要针对任意两个存在关联的节点进行电力距离计算，以此来体现节点之间的电气耦合关系强弱程度。

$$d_{ab}=\frac{|\Delta U_a|}{|\Delta U_b|}=\frac{|U_a|}{|I_a|}/\frac{|U_b|}{|I_b|}\quad a,b\in\varepsilon \tag{1}$$

式中，a、b表示两个配电网节点，ε表示网络节点集合，d表示电力距离，U表示电压相量，I表示注入电流相量，ΔU表示电压相量的幅值。

明确配电网节点之间的电气距离后，引入基于社区发现理论的边划分策略，对所有网络节点进行划分，并结合模块度概念优化分区结果。对于一个配电网来说，可以构建一个多维关联矩阵，如式(2)所示。

$$\boldsymbol{B}_{ac}=\boldsymbol{B}_{cb}=\boldsymbol{d}_{ab},c\in\delta \tag{2}$$

式中，$\boldsymbol{B}$表示关联矩阵，c表示一条馈线，δ表示配电网中的馈线集合。

并定义每个节点的度为

$$\begin{cases}K_a=\sum_{c=1}^{\delta}\boldsymbol{B}_{ac}\\K_b=\sum_{c=1}^{\delta}\boldsymbol{B}_{cb}\end{cases} \tag{3}$$

式中，K表示节点的度。

结合多维关联矩阵和网络节点的度，可以构建基于边的邻接矩阵，该矩阵也可以看作一个由加权无向网络构成的社区，其模块度值可以表示为

$$\phi=\frac{1}{2n}\sum_{q=1}^{Q}\sum_{a,b\in\varepsilon}^{\varepsilon}(\boldsymbol{B}_{ab}-\frac{K_aK_b}{2n}) \tag{4}$$

式中，ϕ表示模块度值，n表示网络边的加权和，A表示目标社区，Q表示社区数量。

通常情况下，模块度值计算结果越大，代表当前社区之间存在紧密的联系[7]。此外，虽然每个社区都可以看作独立存在的，但社区内的顶点会不断移动，形成新的社区，具体的移动过程如图1所示。

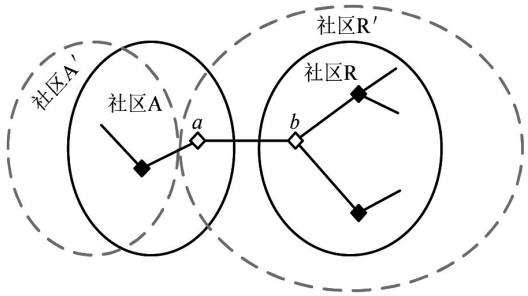


图1 社区内目标顶点向相邻社区移动示意图

在社区内的顶点移动后，计算网络模块度的变化量，直到模块度计算结果取值最大时停止迭代计算，当前的每个社区即可代表一个对应的配电网分区。

1.2 配电网分区电力电量数据预处理

获取每个配电网分区的历史电力电量数据，可以作为后续分区负荷预测的基础，这也是电力电量平衡控制的依据。考虑实时采集的分区数据会包含大量干扰信息，为了避免其影响负荷预测结果，运用拉依达准则处理原始数据，判断数据的异常状态[8]。

$$|x_i-\bar{x}|=|l_i|\geq 3\theta \tag{5}$$

式中，i表示数据编号，i表示输入数据，$\bar{x}$表示数据平均值，ι、θ分别表示剩余误差和标准差。倘若数据运算结果满足式(5)代表当前电力电量数据属于异常数据，需要将其从数据集中删除。

随后，应用式(6)对异常处理后的数据进行归一化处理，解决数据量纲不同的问题。

$$x_i'=\frac{x_i-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}} \tag{6}$$

式中，x'表示归一化后的数据，$x_{\max}$、$x_{\min}$表示最大和最小输入数据值。

最后，考虑到可以应用到配电网分区负荷预测过程中的数据种类很多，但为了避免复杂的数据干扰预测精度，采用Pearson相关系数[9-10]，表示不同数据之间的联系，从预处理后的数据中筛选出所需数据。

$$\rho_{x,\varsigma}=\frac{\psi(\boldsymbol{X},\boldsymbol{Y})}{\theta_X\theta_Y} \tag{7}$$

式中，ς表示另一个数据，ρ表示Pearson相关系数，$\boldsymbol{X}$，$\boldsymbol{Y}$分别表示x，ς对应的特征向量，ψ表示协方差。

当Pearson相关系数计算值更大时，代表当前两个输入数据之间存在较强的关联性，从众多数据中选择相关系数绝对值超过阈值的数据，在充分体现多元负荷之间关联性的情况下，进行配电网多元负荷联合预测。

1.3 构建结合GRN和TGTransformer的负荷预测模型

应用预处理后的配电网分区电力电量数据进行负荷预测时，构建包含一个输入层，数个TGTransformer编码成和一个输出层的负荷预测模型。该模型中添加了GRN，在实现特征处理的基础上，得到高精度的多元负荷联合预测结果，最终形成的模型结构如图2所示。

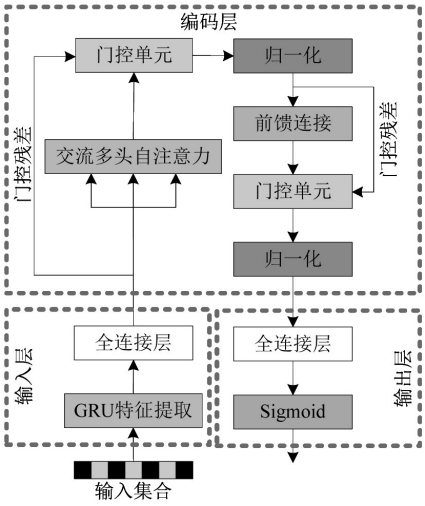


图2 结合GRN和TGTransformer模型结构

如图2所示，在输入层中加入GRN特征提取模块，提取输入电力电量数据包含的高维度特征，再将其导入编码层弥补传统Transformer结构的不足之处。输入层的计算公式为

$$X=\varpi F(x)+\boldsymbol{v} \tag{8}$$

式中，ϖ表示参数矩阵，$\boldsymbol{v}$表示偏置向量，F表示门控循环计算函数。

而门控残差网络的核心，是多头自注意力机制和门控残差结构[11]。其中，多头自注意力结构中，各个头的相互交流计算公式为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\mu}'(\boldsymbol{X})&=\overline{\boldsymbol{\tau}}\left[\mu_1,\cdots,\mu_m\right]\\&=\overline{\boldsymbol{\tau}}\left[L_1\boldsymbol{H}_1,\cdots,L_m\boldsymbol{H}_m\right]\\&=\overline{\boldsymbol{\tau}}\left[\boldsymbol{\tau}\left[\mathrm{S}(j_1(O_1,\boldsymbol{\sigma}_1))\right]\boldsymbol{H}_1,\cdots,\boldsymbol{\tau}\left[\mathrm{S}(j_m(O_m,\boldsymbol{\sigma}_m))\right]\boldsymbol{H}_m\right]\end{aligned} \tag{9}$$

式中，μ'表示多头自注意力交流计算结果，$\overline{\boldsymbol{\tau}}$、$\boldsymbol{\tau}$表示交流参数矩阵，$\mu$表示单个自注意力头计算结果，$m$表示自注意力头数量，$L$表示自注意力权重，$\boldsymbol{H}$表示值向量，S表示激活函数softmax，$j$表示键值对，$O$表示查询向量，$\boldsymbol{\sigma}$表示键向量。

而基于门控残差网络的残差连接结构应用后，可以计算出多个输入向量的非线性变换叠加结果，得到更优的模型符合预测输出结果。添加门控残差单元后，模型多头自注意力层的计算公式为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\mu}''&=\tilde{\boldsymbol{\mu}}'\otimes(1-\mathrm{S}(\partial\boldsymbol{X}+\boldsymbol{G}\boldsymbol{\mu}'))+\mathrm{S}(\partial\boldsymbol{X}+\boldsymbol{G}\boldsymbol{\mu}')\otimes\boldsymbol{\mu}'\\&=\tanh(\partial\boldsymbol{X}+\mathrm{S}(\partial\boldsymbol{X}+G\boldsymbol{\mu}')\otimes\boldsymbol{G}\boldsymbol{\mu}')\otimes\\&\quad(1-\mathrm{S}(\partial\boldsymbol{X}+\boldsymbol{G}\boldsymbol{\mu}'))+S(\partial\boldsymbol{X}+\boldsymbol{G}\boldsymbol{\mu}')\otimes\boldsymbol{\mu}'\end{aligned} \tag{10}$$

式中，$\boldsymbol{\mu}''$表示残差运算后最终输出的多头自注意力层运算结果，$\tilde{\boldsymbol{\mu}}'$表示多头自注意力层运算结果新的记忆表达，$\partial$、$\boldsymbol{G}$表示更新门和重置门的参数矩阵，⊗表示Hadamard乘积。

编码成输出结果经过全连接层的汇总和sigmoid压缩函数的再次计算，最终输出配电网分区电力电量负荷预测结果。

1.4 实现电力电量供需平衡控制

在明确配电网分区的电力电量负荷预测值的情况下，以电力系统稳定运行模式为基础，应用柔性计算的方式，控制电力电量供需平衡[12]。考虑到配电网的负荷需求是不断改变的，以满足配电网分区供电负荷需求为目标，确保无效电量输出值最低，对配电网分区输出电量进行柔性互补，具体计算公式为

$$\kappa=f(t) \tag{11}$$

式中，κ表示电力电量柔性互补计算值，t表示时刻，f表示负荷参数。

构建一个电力系统运行模型，将上述计算公式代入其中，得到式(12)。

$$\begin{cases}(l\sum_{p=1}^{P}p)\times t-\eta-C=f(t)\\C_{\min}\leqslant C\leqslant C_{\max}\end{cases} \tag{12}$$

式中，l表示爬坡速率，p表示发电机组，P表示配电网中发电机组数量，η表示发电机组运行消耗，C表示储能装置容量，$C_{\min}$、$C_{\max}$表示储能容量最大和最小值。

考虑配电网中发电机组的爬坡速率，针对机组输出电量进行控制，可以设置其调节目标如式(13)所示。

$$l(t)=\frac{f(t)-C_{\max}+\eta}{\sum_{p=1}^{P}pt} \tag{13}$$

依托于式(13)计算结果，确定最优爬坡速率设置结果。确保配电网每个分区的发电机组和储能机组配合后，发电总量超过负荷需求，满足配电网用户的用电需

求，最终保证电力系统的电力电量平衡。

2 实验

2.1 实验准备

以包含69个节点的配电网作为研究对象，将所提的基于GRN-TGTransformer的电力电量平衡方法应用到配电网运行过程中，实现配电网分层分区电力电量平衡控制，以此来验证上文研究方法的有效性。在实验准备阶段，采用基于社区发现边划分原理的分区方法，对整个配电网结构进行划分，得到4个非重叠配电网分区，如图3所示。

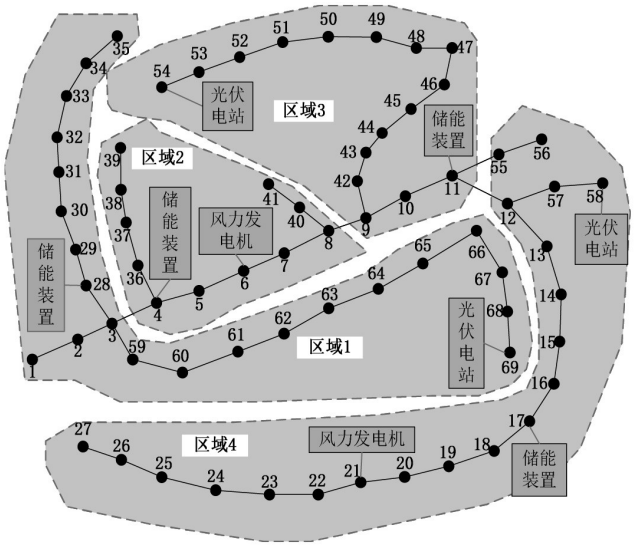


图3 配电网分区示意图

如图3所示，4个配电网分区中都包含一个储能装置，分别与节点11、17、28和4相连接。同时，区域1和区域3中包含一个光伏电站，区域2中包含一个风力发电机，区域4则是包含一个光伏电站和一个风力发电机。以该配电网中风电、光伏发电装置的历史运行数据为参考，推算出风电出力标幺值、光伏出力标幺值，并绘制图4和图5所示的变化曲线。

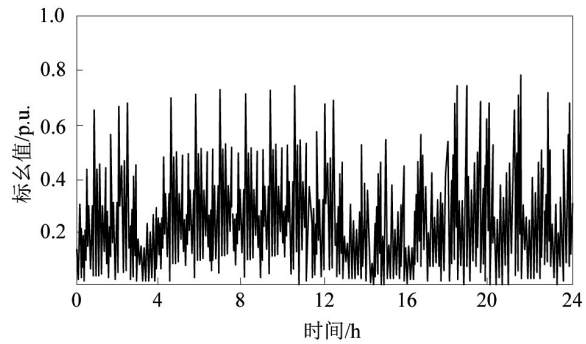


图4 风电出力标幺值曲线

在上述实验环境下，运用所提方法对每个分区的电力电量进行平衡控制。并选取文献[3]和文献[4]所示的平衡方法作为对照组，同样实现配电网的电力电量平衡，对比3种方法应用效果，可以更加直观地表现出新研究平衡方法的优越性能。

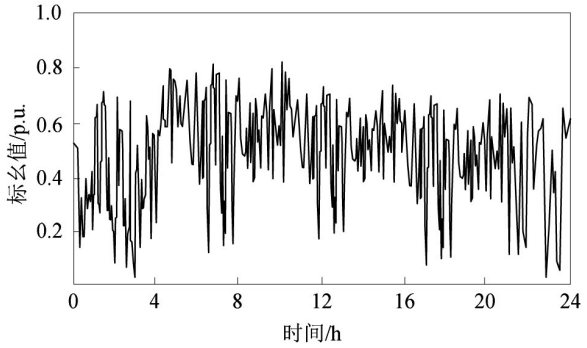


图5 光伏出力标幺值曲线

2.2 负荷预测

配电网的供电负荷预测，是电力电量平衡控制的前提。本研究采用结合GRN和TGTransformer模型实现配电网分区的多元负荷预测，该模型所需的参数设置结果如表1所示。

表1 模型参数

项目	参数取值
隐藏层维度	521
全连接层维度	521
编码层层数	3
多头自注意力层维度	521
自注意力头数量	8
前馈连接层维度	2 048
输出层全连接层维度	521
批次大小	24
训练轮次	185
学习率	1×10^{-5}
损失函数	Huber

以配电网分区1为例，按照上述参数完成模型调整后，对配电网历史电力电量相关数据进行学习，最终得到配电网负荷预测结果如图6所示。

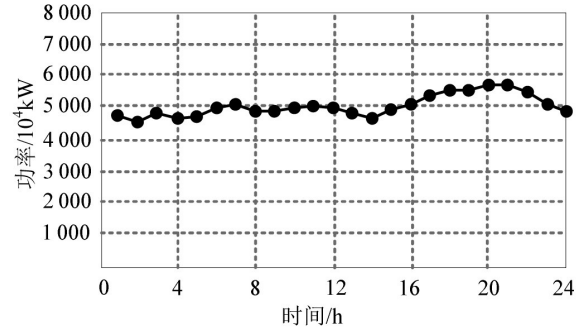


图6 配电网负荷预测曲线

从图6可以看出，区域1配电网结构的用电负荷在4 500×10^4 kW到5 700×10^4 kW之间，将其应用到后续电力电量平衡过程中。

2.3 电力电量平衡结果分析

依托于柔性计算方法实现电力电量平衡分析后，观察区域1的电力电量平衡结果，得到图7。

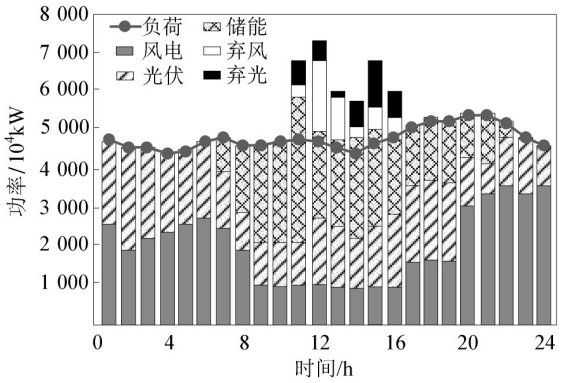


图7 电力电量平衡结果

从图7可以看出，所提电力电量平衡方法应用后，实际输出电量满足了用电负荷需求，保证了配电网的稳定运行，证明了结合GRN和TGTransformer的方法是可行的。

分别运算3种方法进行7天的测试，统计不同方法应用后输出电量与实际负荷之间差值，绘制图8所示的对比结果。

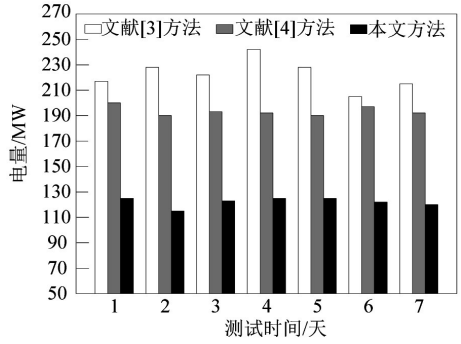


图8 不同方法应用后输出电量与实际负荷之间差值

根据图8可知，结合GRN和TGTransformer的新方法应用后，电力系统输出电量与实际负荷之间差值总是低于130 MW，而另外两种方法的差值分布区间分别为200-250 MW、190-200 MW。从对比结果可以看出，新方法的应用，可以取得更优的电力电量平衡效果，促进电力资源的利用率。

3 结束语

配电网的发展要求越来越高的稳定性和可靠性，这种情况下电力电量平衡方法的研究，成为电力系统调度管理的关键组成部分。对此，本研究给出一种结合GRN和TGTransformer模型为基础的新方法，实现高质量的电力电量平衡管理。

参考文献：

[1] 刘映尚，马骞，王子强，等. 新型电力系统电力电量平衡调度问题的思考[J]. 中国电机工程学报，2023，43(5)：1694-1706.

[2] 高红均，郭明浩，刘挺坚，等. 新型电力系统电力电量平衡分析研究综述[J]. 高电压技术，2023，49(7)：2683-2696.

[3] 庞锋，项华伟，吴迪，等. 基于电力支撑的新型电力系统电力电量平衡[J]. 水力发电学报，2023，42(9)：88-100.

[4] 任景，高敏，程松，等. 面向新能源不确定性的西北电力电量平衡机制[J]. 中国电力，2023，56(9)：66-78.

[5] 王梓珺，王承民，谢宁. 基于柔性计算的高比例新能源环境下的电力电量平衡[J]. 智慧电力，2021，49(8)：15-22.

[6] 禹海峰，黄婧杰，朱思睿，等. 预挂牌月平衡机制下机组偏差电量月内滚动调度方法[J]. 电力工程技术，2022，41(4)：91-99.

[7] 马永翔，李凡. 基于弹性负荷跟踪电量平衡的交易机制与模式研究[J]. 智慧电力，2021，49(11)：89-96.

[8] 陈典，陆润钊，张健，等. 实用化水火风光系统时序电力电量平衡方法[J]. 水力发电学报，2023，42(5)：25- 34.

[9] 陈兵，徐瑞，徐春雷，等. 规模化储能分区聚合有功调度控制技术研究[J]. 电力工程技术，2021，40(3)：35-41.

[10] 许彦平，黄越辉，李湃，等. 计及优先级及电力平衡的新能源中长期交易电量分解方法[J]. 电力系统自动化，2021，45(17)：117-125.

[11] 高晨元，田建艳，姬政雄，等. 基于门控循环单元残差连接网络与多任务学习的园区综合能源系统多元负荷预测[J]. 电网技术，2025，49(5)：1771-1780.

[12] 陈栋. 多间歇能源消纳下主动电网调度数据动态生成方法[J]. 自动化技术与应用，2023，42(9)：176-179，182.

作者简介：李庆波(1985—)，男，本科，副高级工程师，研究方向：电网规划。