冲击负荷的超短期区间预测方法及其应用

黎嘉明，邸鹏宇，樊　玮，董　超，邱丹骅，孟子杰

（广东电网有限责任公司电力调度控制中心，广东 广州 510600）

摘要：广东电网中部分 220 kV 站点负荷冲击特性强，存在短时大幅波动且预测困难的特点，严重影响了实时市场出清过程中断面安全校核的准确性，进而影响了出清结果执行过程中的安全性。提出了一种适用于冲击负荷站点的超短期区间负荷预测方法，该方法采用区间信息覆盖冲击负荷波动范围，且具备过滤极短时尖峰、降低预测区间结果保守度的能力，基于广东电网实测数据的算例分析，表明该方法对冲击负荷预测效果较好，可以有效提高实时市场出清对关联断面的调控效果。

关键词：冲击负荷；超短期预测；区间预测；电力市场

Ultra-short term interval forecast of impact load and its application

LI Jiaming, DI Pengyu, FAN Wei, DONG Chao, QIU Danhua, MENG Zijie

（Guangdong Power Grid Dispatch Center, Guangzhou 510600, China）

Abstract: Impact load exists in several Guangdong 220 kV power stations with frequent and large-range variations, which enforce obstacles in precise load forecast. It severely compromise the reliability of security constraint evaluations in real-time electric market clearing. Hence, it deteriorates the security of power system operation. The paper proposed an ultra-short term interval forecast method for impact load, which covers the load variations by an online-optimized interval filtering extreme. The numerical simulation results in Guangdong power gird show that the proposed method provides valid forecast results for impact load and efficiently enhance the quality of security constraint evaluations in real-time electric market clearing.

Key words: impact load; ultra-short-term forecast; interval forecast; electric market

0　引言

近年来随着粤港澳大湾区经济的快速发展，广东省部分地市出现了越来越多的高铁牵引站、钢材加工基地。其用电负荷呈现出规律性差、短时间内大幅快速波动的冲击负荷[1-2]特征。

然而随着电力现货市场改革的推进，南方（以广东起步）电力现货市场[3]出清将全面替代过去由调度机构人工安排的发电计划，在满足电网安全约束的条件下，以发电成本最低为发电计划的安排目标，该最优结果往往在部分系统稳定断面压极限运行时达到。

在电力现货实时市场出清过程中，系统稳定断面的负荷率校核基于超短期母线负荷预测[4]数据，母线负荷预测的质量就决定了出清计算对断面负荷率评估的准确性。而对于冲击负荷所在站点，由于冲击负荷难以准确预测，超短期母线负荷预测偏差往往很大，从而导致实时市场出清时其强关联稳定断面负荷率计算失准。因此若实时市场出清结果中此类断面压达到极限，实际执行时可能发生频繁、大幅过载，严重威胁电网运行安全。即此时实时市场出清结果是无法安全执行的，迫使调度员对断面强关联的机组出力执行人

工干预，对机组收益产生一定影响（被人工干预的机组无法定价）。

为解决此问题，本文提出了一种针对冲击负荷的超短期区间特征预测方法，并提出将冲击负荷预测特征信息纳入到实时市场出清安全校核中补充方案，确保出清结果能够充分校核冲击负荷变化对稳定断面负荷率的影响，使出清计划安全可执行，避免调度员频繁地人工干预。

1 冲击负荷超短期预测方案及其应用

1.1 冲击负荷超短期预测的基本思路

考虑到冲击负荷所在站点的实测负荷数据可能掺杂多种负荷组成，因此可能兼有短时冲击性成分和长时间尺度的规律性变化成分，需分别进行处理。

针对负荷的规律性成分，可对实测负荷数据以低通滤波类算法进行提取，该部分成分可以采用工程上已经应用成熟的历史相似日曲线方法执行超短期滚动预测。

实测负荷数据减扣规律性成分后的剩余部分即为负荷的冲击性成分。针对这一成分，由于负荷频繁快速变化（具体取决于负荷侧冲击性设备的状态变化情况），随机性极高，逐时刻精确预测其具体取值并不现实，应滚动评估其近期取值的上下限作为其基本特征，即评估形成冲击性成分的波动区间。

此外也应意识到，采用区间方式覆盖冲击性负荷的所有极值并对全区间加以预控是相当保守的思路，对临近可调机组的调节能力也是一种过度浪费，考虑电力系统中设备实际具有反时限的过载能力，因此所提的预测方法在评估负荷波动上下限时应当允许忽略部分仅持续极短时间的偶发性尖峰，使得负荷波动区间的评估结果更为合理，在经济性与运行安全性中进行折中。

综合以上两个成分，可将冲击负荷刻画为以规律性成分作为“基值”，以一定区间围绕“基值”频繁波动的形式。

1.2 冲击负荷超短期预测的实施方案

1）依托SCADA系统获取并记录冲击负荷站点的母线负荷实测数据p_t^D（时间分辨率取为1 min）。

2）对已有的实测功率数据进行滑动平均值计算[5]（滑动平均窗口长度取为30 min），记录为冲击负荷的规律性成分$\overline{p}_t^D$。

3）平移历史相似日（通常工作日选择前一日，周末及节假日选择上一同类型节假日）的冲击负荷规律性成分日曲线$\overline{p}_t^{D-1}$，确保当前时刻实测负荷的60 min滑动平均值与平移曲线中同一时刻点的数值重合（即采用相似日曲线平移预测方法），可得到冲击负荷规律性成分的超短期预测值F_t^D。

4）以实测功率数据p_t^D减扣规律性成分$\overline{p}_t^D$后可得到冲击负荷的冲击性成分$\widetilde{p}_t^D$，针对最近3 h的冲击性成分数据$\widetilde{p}_{t-2,t}^D$，采用以下二分法步骤评估其上限$U_{t-2,t}^D$及下限$L_{t-2,t}^D$：

a）设置短时尖峰过滤时长门槛值为T，最大尖峰越限限幅为V（为了避免上下限区间取值过于保守导致断面控制代价过高，评估冲击性成分上下限时将忽略持续时间短于T且越出当前区间V以内的负荷尖峰，因此实际运行中仍可能出现极短时长、极低概率的稳定断面过载，但调度规程通常可以接受）。

b）设置负荷数据最低覆盖率为α（即保证至少比例为α的冲击性负荷数据能够被上下限区间范围可靠覆盖）。

c）设置二分法[6]夹逼允许误差为ε（夹逼范围小于ε时终止计算）。

d）初始化上限参数$U^{DU}=\max\left\{\widetilde{p}_{t-2,t}^D\right\}+3\varepsilon$，$U^{DL}=\min\left\{\widetilde{p}_{t-2,t}^D\right\}-3\varepsilon$，$U_{t-2,t}^D=\left(U^{DU}+U^{DL}\right)/2$。

e）剔除原序列$\widetilde{p}_{t-2,t}^D$中数值小于$U_{t-2,t}^D$的所有数据点，检查是否存在连续个T数据点未被剔除或剩余数据点的最大值超出$U_{t-2,t}^D$限值V以上，并检查未被剔除的剩余数据量占原序列$\widetilde{p}_{t-2,t}^D$总数据量的比例是否超过（$1-\alpha$）/2。

f）若上一步的任一检查结果为“是”，更新$U^{DL}=U_{t-2,t}^D$，否则更新$U^{DU}=U_{t-2,t}^D$。

g）如果$U^{DU}-U^{DL}\leqslant\varepsilon$，则结束上限评估，

记录此时的上限结果$U^D_{t-2,t}$并继续进入下一步，否则取$U^D_{t-2,t}=\left(U^{DU}_{t-2,t}+U^{DL}_{t-2,t}\right)/2$，返回步骤e）继续执行。

h）初始化下限参数$L^{DU}=\max\left\{\tilde{p}^D_{t-2,t}\right\}+3\varepsilon$，$L^{DL}=\min\left\{\tilde{p}^D_{t-2,t}\right\}-3\varepsilon$，$L^D_{t-2,t}=\left(L^{DU}+L^{DL}\right)/2$。

i）剔除原序列$\tilde{p}^D_{t-2,t}$中数值大于$L^D_{t-2,t}$的所有数据点，检查是否存在连续个T数据点未被剔除或剩余数据点的最大值低于$L^D_{t-2,t}$限值V以上，并检查未被剔除的剩余数据量占原序列$\tilde{p}^D_{t-2,t}$总数据量的比例是否超过（$1-\alpha$）/2。

j）若上一步的任一检查结果为“是”，更新$L^{DU}=L^D_{t-2,t}$，否则更新$L^{DL}=L^D_{t-2,t}$。

k）如果$L^{DU}-L^{DL}\leqslant\varepsilon$，则结束下限评估，记录此时的下限结果$L^D_{t-2,t}$并结束全流程，否则取$L^D_{t-2,t}=\left(L^{DU}+L^{DL}\right)/2$，返回步骤i）继续执行。

通过以上步骤得到的规律性成分预测序列F^D_t、冲击性成分的上限$U^D_{t-2,t}$及下限$L^D_{t-2,t}$即为冲击性负荷的超短期预测输出结果。

1.3 冲击负荷超短期预测结果的应用方案

在系统平衡机制上，冲击负荷的规律性成分属于相对稳定而持续的负荷需求，应当由三次调频（即经济调度或实时市场出清）统筹安排可调机组的出力基点予以平衡。

而冲击负荷的冲击性成分具有波动时间较短、变化速率较快的特点，实践中难以精细化预测捕捉，应当交由一次调频、二次调频的自动闭环控制[7]以及全网的负荷频率效应进行消纳，仅针对其波动过程对稳定断面的影响进行提前评估即可。

综上所述，冲击负荷的超短期预测结果建议采用如下应用方案：

1）规律性成分预测序列F^D_t应作为冲击负荷所在节点的超短期母线负荷预测结果纳入经济调度/实时市场出清的电力平衡约束中进行统筹优化。

2）冲击性成分预测上下限$U^D_{t-2,t}$、$L^D_{t-2,t}$则应叠加在序列F^D_t上，纳入稳定断面校核约束中，对于与冲击负荷强关联的断面，应当同时要求冲击负荷取值为$F^D_t+U^D_{t-2,t}$以及$F^D_t+L^D_{t-2,t}$时断面均不过载，从而冲击负荷在上下限区间内任意波动取值时，稳定断面均是可控的（断面持续越限时间不大于T，且越限概率不超过$1-\alpha$）。

2 实际算例分析

广东电网当前存在明显冲击负荷特性的站点，包括梅州地区的220 kV丰顺站、广州地区的220 kV联众站和湛江地区的220 kV宝能站（3个站点均存在钢厂），本节以本文提出的方法对3个站在2021年6月29日的负荷及其强关联断面进行算例分析。

2.1 预测参数取值

考虑到南方电网调度规程要求断面连续过载时长不超过15 min，预测方案中的短时尖峰过滤时长门槛值T取值为10 min，最大尖峰越限限幅取值为60 MW，负荷数据最低覆盖率α取值为80%，二分法夹逼允许误差取为1 MW。

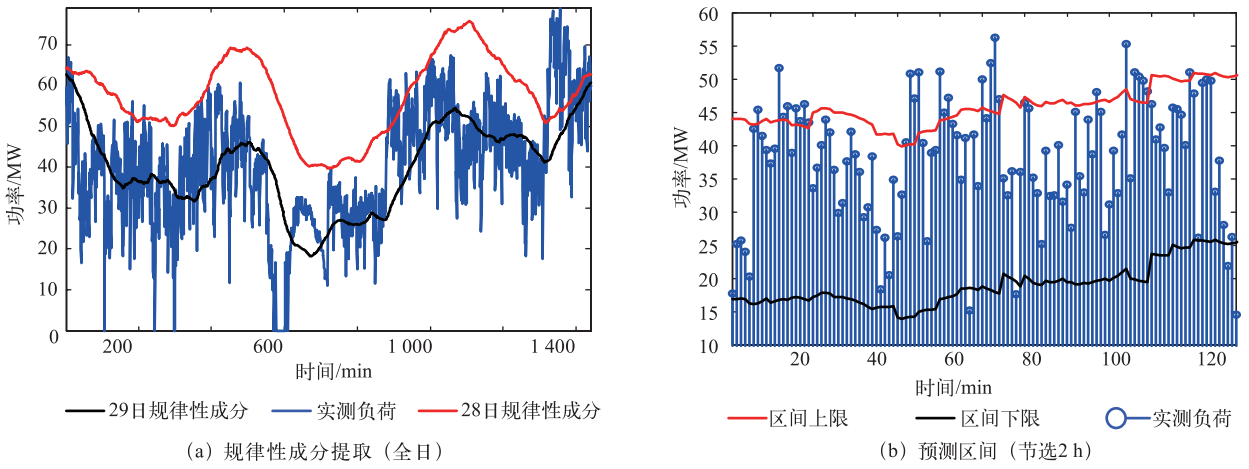
2.2 预测结果合理性

图1～图3及表1给出了2021年6月29日（周一）3个站点的实测负荷情况以及本文所提超短期预测方案的预测效果（相似日选择6月28日周一），可得到如下结论：

1）冲击负荷站点的负荷实测数据（蓝线）全日均有短时、大幅度的波动，采用本文方法进行滑动平均提取后，能够有效提取其中的负荷基线（黑线，规律性成分），其中丰顺站、联众站的负荷基线均与相似日曲线形状相似性较高。

2）本文方法最终给出的超短期预测区间（黑线/红线）可以有效包裹绝大部分的冲击负荷数据点，仅剩部分极短时的尖峰数据点排除在外以降低区间取值的保守度。

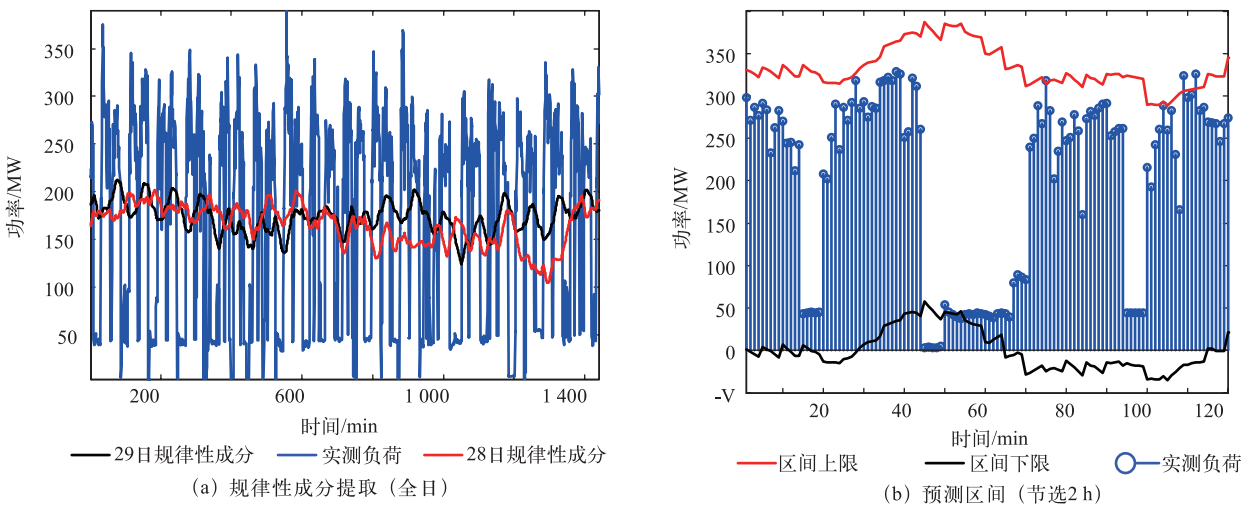
3）由表1数据可见，实施本文超短期预测算法后，剩余的仍超出预测区间的冲击负荷数据点的越限时段比例、最大越限时长及越限幅度基本符合预测算法参数设置预期（但对于从负荷平缓时段突然过渡到负荷大幅突变的衔接时段，本文预测方法仅基于历史数据统计外推，预测区间存在调整不及时的问题，因此部分数据略超出算法控制值，例如丰顺站、宝能站的区间覆盖比例



（a）规律性成分提取（全日）　（b）预测区间（节选2 h）

图 1　丰顺站预测情况

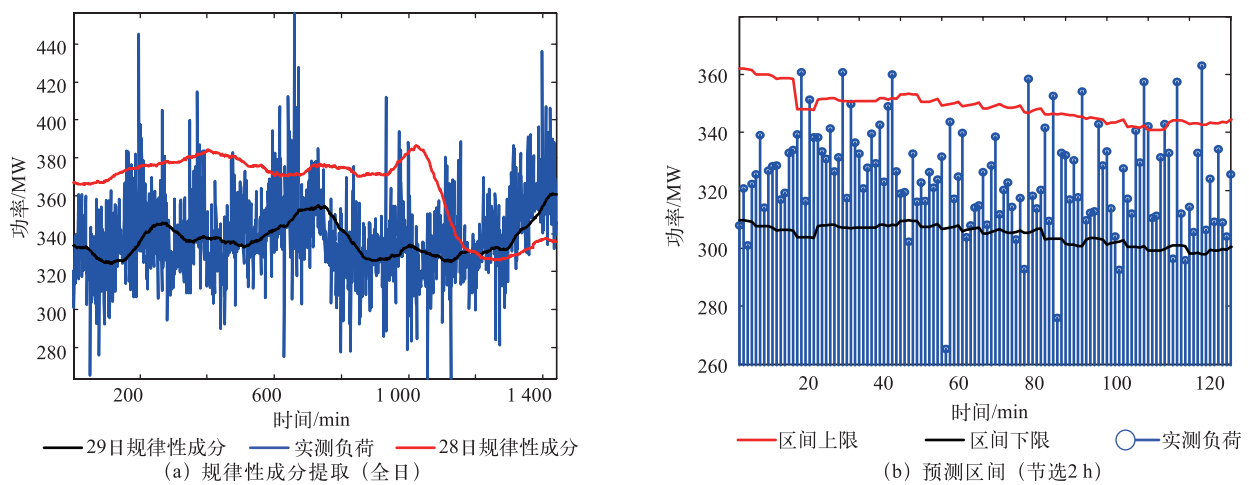
Fig. 1 The load forecast result of Fengshun station



（a）规律性成分提取（全日）　（b）预测区间（节选2 h）

图 2　联众站预测情况

Fig. 2 The load forecast result of Lianzhong station



（a）规律性成分提取（全日）　（b）预测区间（节选2 h）

图 3　宝能站预测情况

Fig. 3 The load forecast result of Baoneng station

略低于控制值80%，联众站的最大越限时长、最大越限幅值略超出控制值的10 min、60 MW）。

表 1　超出超短期预测区间的负荷数据情况

Tab. 1 Load data exceeding the forecast intervals

厂站	区间覆盖比例（%）	最长越限时间 / min（95% 置信度）	最大越限幅度 / MW（95% 置信度）
丰顺站	76.58	9	20.3
联众站	83.29	12	60.8
宝能站	78.63	3	47.6

2.3　实时市场出清中的应用效果

与联众站、宝能站和丰顺站负荷水平强相关的断面分别是增城站主变电站、霞迈甲乙和岐丰甲乙断面，本节以2021年6月29日的实测数据及本文超短期区间预测结果进行实时市场模拟出清执行，对应分析断面越限情况，并与当前未采用区间预测的出清结果执行情况进行对比（假定调度员不进行任何人工干预），结果如表2所示。

由表2数据可见，对于3个站点的强关联稳定断面，应用本文所提预测方法后，其断面最大越限时长及最大越限幅度均有显著下降，且剩余的断面越限时长均低于15 min，无须再执行调度人工干预进行断面辅助控制，可见本文所提方法有效提高了实时市场出清对冲击负荷强关联断面的调控效果，同时将有效减少调度员人工干预市场出清结果的次数。

表 2　模拟市场出清结果执行后关联断面越限情况

Tab. 2 Violations of stability constraints in simulation with real-time market clearing results

断面	应用本文方法		当前情况（假定不实施调度干预）	
	最长越限时间 /min	最大越限幅度 /MW	最长越限时间 /min	最大越限幅度 /MW
增城主变	12	60.8	60	230.51
霞迈甲乙	3	19.04	180	99.12
岐丰甲乙	9	10.96	60	15.91

3　结束语

针对冲击负荷预测困难、影响实时市场出清执行过程中关联断面负荷率调控的问题，本文提出了一种适用于冲击负荷站点的超短期区间负荷预测方法，该方法采用区间信息覆盖冲击负荷波动范围，且通过控制参数可以过滤部分极端的短时尖峰，降低预测区间结果的保守度，基于广东电网实测数据的算例分析表明，该方法对冲击负荷预测效果较好，可以有效提高实时市场出清对关联断面的调控效果，避免不必要的调度员人工干预。**EA**

参考文献

[1] 商佳宜，王坚俊，应康，等．冲击负荷对地区电网电能质量的影响研究[J]．能源工程，2017(4)：18-22．

[2] 吴迪，关焕新，黄政，等．基于灰色聚类理论的非线性冲击负荷分类评估[J]．沈阳工程学院学报(自然科学版)，2020，16(3)：55-58，77．

[3] 马辉，陈雨果，陈晔，等．南方(以广东起步)电力现货市场机制设计[J]．南方电网技术，2018，12(12)：42-48．

[4] 范士雄，刘幸蔚，於益军，等．基于多源数据和模型融合的超短期母线负荷预测方法[J]．电网技术，2021，45(1)：243-250．

[5] 章竹耀，郭晓丽，张新松，等．基于滑动平均和模型预测控制的风储平抑策略[J]．控制工程，2019，26(1)：114-119．

[6] 张幸，余松森，尹璐琳，等．基于二分法的变步长扰动观测MPPT算法[J]．电源技术，2018，42(4)：536-539．

[7] 吴文传，张伯明，孙宏斌．电力系统调度自动化[M]．北京：清华大学出版社，2011．

作者简介

黎嘉明

黎嘉明（1989—），男，博士，工程师，研究方向为电力系统调度运行、电力市场、大规模新能源并网优化控制技术。

(收稿日期：2021-07-03)