联网型高耗能电解铝工业电网源荷协调平抑风电功率波动控制策略

丁 鑫,徐 箭,孙元章,廖思阳
(武汉大学 电气与自动化学院,湖北 武汉 430072)

摘要:对于含有大规模新能源接入的联网型高耗能工业电网,新能源功率波动势必产生联络线功率波动以及额外备用容量费用,不利于工业电网经济运行。通过对工业电网内部火电机组与电解铝负荷联合控制进行建模,提出源荷协调平抑风电功率控制策略。基于模型预测控制方法,将电解铝负荷和火电机组调节范围以及响应速率作为约束条件,以平抑风电功率波动为控制目标,优化电解铝负荷和火电机组的有功功率调节量,减少由风电功率波动引起的联络线备用容量。以云南文山地区某个工业电网为例进行仿真,结果表明所提的源荷协调控制策略可以有效实现对工业电网内部风电功率波动的平抑,限制与大电网联络线上的有功功率交换。

关键词:新能源消纳;平抑功率波动;电解铝负荷;模型预测控制;协调优化控制;风电
中图分类号:TM 73 **文献标志码**:A DOI:10.16081/j.epae.202207015

0 引言

为了应对能源危机和全球气候变暖给人类社会带来的影响,以光伏发电和风力发电为代表的新能源发电近几十年来在全球范围内得到快速发展[1]。我国于2020年9月在联合国大会提出“二氧化碳排放力争2030年前达到峰值、力争2060年前实现碳中和”的目标,这将为全球实现能源可持续发展做出重要贡献。根据国家能源局数据统计,截至2021年底,我国风电和光伏项目累计总装机容量分别为328.5 GW和306.5 GW,其中,风电和光伏在2021年新增装机容量分别为4.757×10^8 kW和5.297×10^8 kW,呈现高速发展的趋势。然而,由于我国新能源资源集中地区(东北、华北、西北等地区)与负荷集中地区(华东、华中、华南等地区)呈逆向分布,且风电和光伏出力具有随机性和波动性,电力系统对大规模接入的新能源消纳能力不足,造成弃风弃光现象严重[2-3]。新能源资源集中地区的本地消纳空间有限,缺乏常规机组调峰能力,电网外送能力不够,是新能源消纳困难的主要原因[4]。因此,随着未来新能源装机容量的进一步增加,如何提高我国电网调节能力和本地负荷消纳能力以应对大规模新能源的间歇性出力,是缓解消纳困境和实现“双碳”目标亟需解决的关键问题。

国家发展改革委办公厅于2015年发布《国家发展改革委办公厅关于开展可再生能源就近消纳试点的通知》文件[5],积极推行试点,鼓励探索新能源就近消纳方案。电解铝产业因为用电量巨大,具备消纳大规模新能源的可行性,并且由于用电成本高昂,电解铝企业对使用价格更为便宜的新能源发电具有强烈的积极性[6]。电解铝负荷具有容量大、集中性高、响应速度快等特点,并且作为蓄热型负荷,短时间内降低有功功率对生产影响小,因此考虑使其参与电网调节具备可行性[7]。目前已有很多文献在电网调度层面上分析电解铝负荷参与电力系统调控的可行性。文献[8]分析了电解铝负荷具有功率平稳的特性,可以为电力系统提供稳定可观的备用容量,具备为美国电网提供辅助服务的潜力。文献[9]将电解铝负荷在内的多种工业负荷定义为功率集中型负荷,并经分析指出功率集中型负荷在电网调度运行中具备较大的调控潜力。

在正常运行情况下,电解铝生产为恒定功率负荷,其控制系统是为保持恒定功率而设计的。如果需要实现电解铝负荷有功功率快速调节,满足电网功率需求,则需要对其控制系统进行改进。例如,文献[10]考虑通过调整电解铝负荷的变压器分接头和饱和电抗器SR(Saturated Reactor)实现短时间尺度下控制电解槽值直流电流大小,从而改变负荷有功功率,该控制方法通过比例-积分(PI)控制器实现,并未对电解铝负荷的功率外特性进行建模和分析。目前已有很多文献研究了电解铝负荷的功率外特性模型,并提出相应的控制方法用于工业孤立电网中。文献[11]针对一个实际的含高比例风电的电解铝工业孤立电网,通过向控制系统引入系统频率偏差作为反馈信号,调节电解铝负荷SR等效电感值来实现负荷有功功率快速调节,从而平抑风电功率波动,但

收稿日期:2022-03-13;**修回日期**:2022-06-12
在线出版日期:2022-07-22
基金项目:国家自然科学基金联合基金资助项目(U2066601)
Project supported by the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China(U2066601)

并没有实现孤立电网频率的精准控制。文献[12]提出引入孤立电网频率和不平衡功率设计控制策略，控制发电机励磁控制系统降低发电机端电压，从而降低电解铝负荷交流母线侧电压，实现负荷有功功率调节，为系统提供调频容量。文献[13]进一步提出协调控制发电机励磁系统和电解铝负荷SR，扩大电解铝负荷有功功率调节范围，为系统提供更多的调频容量。对于孤立工业电网，由于缺少足够的调频容量，大规模的风电功率波动引起系统频率波动，将影响工业电网的安全稳定运行，因此上述文献中的电解铝负荷调控方法针对的是孤立电网的频率控制问题。

对于联网型的电解铝工业电网，由于大电网提供了足够的频率支撑，频率问题得以解决。然而，工业电网中大规模新能源的接入，其功率波动会引起联络线上的功率波动，给大电网的安全运行带来压力，同时对工业电网产生联络线备用容量费用，不利于企业经济运行。文献[14]通过引入联络线功率偏差作为电解铝负荷稳流控制的外环开环控制，实现工业电网平抑风电功率，但是该方法仅通过设置控制环节的增益参数，平抑效果不够精细化。文献[15]设计了一种基于调节器理论的工业电网负荷侧控制联络线波动广域控制策略，用于跟踪时变的功率波动信号，然而该方法的效果取决于短时间尺度的风电功率预测精度。模型预测控制MPC(Model Predictive Control)通过滚动优化的方法，在考虑系统中风电功率波动趋势的情况下对当前控制器进行优化，具有较好的动态控制效果[16]。文献[17]基于MPC，提出采用聚合温控负荷平抑新能源功率波动，具有良好的跟踪效果。

围绕以上分析，本文提出基于MPC的电解铝工业电网平抑风电功率波动的控制策略，通过电解铝负荷与机组的联合控制，以平抑联络线功率波动为目标，实现对工业电网内部风电功率波动的抑制，提高对风电的消纳能力；以云南文山地区的电解铝工业电网作为研究对象，对所提的控制策略进行分析和验证。

1 联网型电解铝工业电网联络线功率波动

电解铝生产是典型的高耗能工业负荷。我国的电解铝生产的供电模式分为网供电和自备电2种。网供电模式下，电解铝负荷由大电网直接供电。由于电力成本在高耗能电解铝工业总成本中占较大比例，电解铝工业电网结构逐步转向自备电模式以减少用电成本，即电解铝工业电网内部通过在当地自建火电机组以及接入可再生能源发电(如风电、光伏发电等)向电解铝负荷进行供电。根据是否与外部大电网相联，自备电模式下的电解铝工业电网结构分为孤网型和联网型。孤网型电解铝工业电网主要分布于资源丰富的偏远地区，由于缺乏大电网的功率支撑，大规模风电功率的随机波动性将严重威胁孤网型电解铝工业电网的安全稳定运行。与孤网型电解铝工业电网不同，联网型电解铝工业电网通过联络线与大电网相联，借助大电网的功率支撑保证电解铝工业电网的安全稳定运行。

联网型高耗能电解铝工业电网的结构模式如图1所示。图中：区域1为电解铝工业电网，含有自备火电机组、风电场、高耗能电解铝负荷以及其他类型负荷；区域2为外部大电网，其容量远大于工业电网的容量；区域1、2通过联络线连接，当工业电网内部供电不足时，大电网通过联络线提供功率支撑；由于区域2大电网容量远大于区域1工业电网的容量，可认为两者系统频率偏差Δf相同。

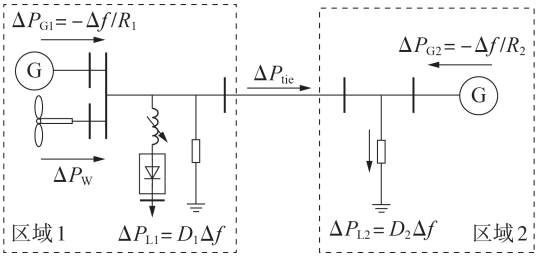

图1 联网型高耗能电解铝工业电网结构

Fig.1 Structure of grid-connected high energy consuming electrolytic aluminum industrial power grid

区域1、2的负荷功率的频率特性可以用线性表达式表示，即：

$$\Delta P_{L1}=D_1\Delta f,\ \Delta P_{L2}=D_2\Delta f \tag{1}$$

式中：ΔP_{L1}、ΔP_{L2}分别为区域1、2系统负荷自身功率调节量；D_1、D_2分别为区域1、2中的负荷阻尼系数。值得注意的是，电解铝负荷是电压型负荷[12]，几乎不受频率变化影响。因此，工业电网负荷阻尼系数D_1数值远小于D_2。

当电解铝工业电网内部出现风电功率波动ΔP_w时，若内部火电机组和负荷没有额外控制策略，则风电功率波动由以下三部分补偿：区域1电解铝工业电网火电机组一次调频功率补偿ΔP_{G1}；区域1系统负荷自身功率调节ΔP_{L1}；联络线功率补偿ΔP_{tie}。负荷-频率控制LFC(Load-Frequency Control)模型用于描述互联系统的频率波动、联络线交换功率偏差量等关系。基于LFC模型，区域1电解铝工业电网功率平衡表达式为：

$$\Delta P_w=\Delta P_{G1}-\Delta P_{L1}-\Delta P_{tie}=-\left(1/R_1+D_1\right)\Delta f-\Delta P_{tie} \tag{2}$$

同理，区域2大电网的功率平衡表达式为：

$$0=\Delta P_{G2}-\Delta P_{L2}+\Delta P_{tie}=-\left(1/R_2+D_2\right)\Delta f+\Delta P_{tie} \tag{3}$$

式中：R_1、R_2分别为区域1电解铝工业电网和区域2大电网中火电机组一次调频的下垂系数；ΔP_{G2}和

ΔP_{L2}分别为区域2大电网火电机组一次调频功率变化和负荷功率变化。

联立式(2)和式(3)，得到：

$$\Delta f=\frac{-\Delta P_{w}}{\left(1/R_1+D_1\right)+\left(1/R_2+D_2\right)} \tag{4}$$

$$\Delta P_{tie}=\frac{-\Delta P_{w}\left(1/R_2+D_2\right)}{\left(1/R_1+D_1\right)+\left(1/R_2+D_2\right)} \tag{5}$$

由于大电网的容量远大于所连接的电解铝工业电网，则有$1/R_2$远大于$1/R_1$，且电解铝工业负荷对频率变化不敏感，所以D_2远大于D_1。因此，式(4)和式(5)可简化为：

$$\Delta f\approx\frac{-\Delta P_{w}}{1/R_2+D_2} \tag{6}$$

$$\Delta P_{tie}=\left(1/R_2+D_2\right)\Delta f\approx-\Delta P_{w} \tag{7}$$

根据式(6)和式(7)，当大电网容量远大于电解铝工业电网时，风电功率波动不会引起较大的频率波动。当电解铝工业电网不采用额外的控制策略时，大电网通过联络线向电解铝工业电网提供容量补偿，从而平抑风电功率波动。因此风电功率波动会引起联络线的功率波动。随着类似的工业电网接入大电网中，大规模新能源的波动不仅加剧了大电网的调节压力，同时联络线的功率波动不利于工业电网的经济运行。因此，考虑平抑工业电网内部风电功率波动具有重要意义。

2　电解铝工业电网平抑风电功率波动控制模型

2.1　电解铝负荷及其控制模型

现代电解铝生产将冰晶石为主的氟化盐作为熔剂，氧化铝作为熔质溶解在电解槽中，从而组成电解质。电解质中通入数百千安培的直流电流，在950~970 ℃的高温下，电解质溶液中的氧化铝与阳极碳素体发生化学反应生成铝单质[18]。一旦开始生产，电解槽需要保持高温，使得铝单质为熔融状态。电解铝负荷具有很大的热惯性，电解槽中断供电在几分钟至3 h的范围内，不会造成冰晶石固化。实践证明，在做好电解槽保温的前提下，全系列电解铝停电2 h对电解槽的生产工艺影响不大[19]。因此，通过调控电解铝负荷有功功率实现短期内平抑风电功率波动具有可行性。

电解铝负荷的电气元件包括交流母线、整流系统、直流母线和电解槽。其中，整流系统包括有载调压变压器、整流变压器、SR和二极管组成的整流桥，见附录A图A1[20]。通过有载调压变压器，使交流侧高压值降低。整流变压器分别采用Y型连接和△型连接，通过移相，经过SR和二极管后组成一个12脉波整流电路，交流电被整流为直流电。最终，直流电汇集至直流母线，向电解槽供电。为了消除生产过程中产生的阳极效应，SR与整流桥串联，保证安全平稳的生产过程。SR的工作原理和具体模型见文献[20]。文献[21]推导了电解铝负荷等效电路，见附录A图A2。图中：V_{AH}、V_{AL}分别为交流母线的高压侧电压和低压侧电压；K为有载调压器的变比；整流变压器主要发挥对交流电移相的作用，在等效电路中省略；V_{SR}、L_{SR}分别为SR的压降、等效电感；$V_{L\text{-}L}$为整流桥交流侧电压；V_d、I_d分别为电解槽的直流电压和直流电流；E_d、R_d分别为电解槽内的反向电动势、等效电阻，其电解质成分、电解槽温度和电极极距等相关，可以通过测试数据辨识得到，短时间内认为是不变的。文献[21]推导了电解铝负荷有功功率P_{AL}的表达式为：

$$P_{AL}=V_dI_d=\frac{V_d\left(V_d-E_d\right)}{R_d} \tag{8}$$

电解槽直流电压V_d的表达式为：

$$V_d=1.35\left(\frac{V_{AH}}{K}-V_{SR}\right) \tag{9}$$

式(8)和式(9)表明电解铝有功功率P_{AL}与V_{AH}、K和V_{SR}有关。通过调节交流母线侧电压、有载调压器分接头或SR压降均可以调节电解铝有功功率。文献[13]所提通过发电机励磁系统控制负荷的电压的方法不适用于本文的联网型电解铝工业电网，而调节调压器分接头时间较长且调节粗略，不适用于平抑风电功率波动的控制场景。因此，通过控制SR压降V_{SR}，可以实现电解铝负荷有功功率的快速精准响应。在实际生产中，V_{SR}的调节是通过SR稳流系统实现的，以保证电解槽直流电流I_d的稳定，其稳流控制系统模型见附录A图A3。图中：K_P、K_I为PI控制器参数；K_{SR}、T_{SR}分别为SR内部控制系统的比例系数和时间常数。电流传感器测量得到电解槽直流电流I_d，其与直流电流参考值I_{dref}之间的偏差量ΔI_d经过PI控制器后得到控制电流偏差量ΔI_{dcon}，输入SR的控制电路中，调节其磁饱和度以改变SR的电感值，进而调节SR的压降V_{SR}，其响应时间为数百毫秒[18]。最终，电解铝负荷有功功率得以调节，直流电流I_d可以跟踪给定的直流电流参考值I_{dref}。本文中，需要改进已有的稳流控制系统，满足电解铝负荷有功功率调节需求。

根据式(8)和式(9)，可以推导出电解铝的有功功率调节量ΔP_{AL}与直流电流增量ΔI_d、SR压降增量ΔV_{SR}的关系表达式分别如式(10)和式(11)所示，推导过程见附录B的B1部分。

$$\Delta P_{AL}=R_d\left(\Delta I_d\right)^2+R_d\left(2I_{d0}+E_d\right)\Delta I_d \tag{10}$$

$$\Delta P_{AL}=\left[1.822\,5\left(\Delta V_{SR}\right)^2+\left(1.35E_d-2.7V_{d0}\right)\Delta V_{SR}\right]/R_d \tag{11}$$

式中：E_d和R_d被认为是固定值；I_{d0}、V_{d0}分别为直流电流、电压初始值。SR的压降范围为20~70 V，通常情况维持在35 V左右。由式(8)和式(9)可知，通过调

节SR压降V_{SR}在其允许工作范围内，可以在数秒内实现电解铝负荷有功功率P_{AL}分别上调5%的额定功率和下调10%的额定功率，下文将其作为负荷控制的功率调节约束。

文献[21]对一个容量为330 MW的实际电解铝负荷进行测算，取反向电动势E_d=354.6 V，等效电阻R_d=2.016 mΩ，直流电压初始值V_{d0}=1.012 kV，直流电流初始值I_{d0}=326.1 kA，将上述参数代入式(10)和式(11)，可以得到：

$$\Delta P_{AL}=0.002\,016(\Delta I_d)^2+1\,315.6\Delta I_d$$
$$\Delta P_{AL}=904(\Delta V_{SR})^2-1.118\times10^6\Delta V_{SR}$$

可以看出，平方项$(\Delta I_d)^2$、$(\Delta V_{SR})^2$对ΔP_{AL}影响甚小，ΔP_{AL}与ΔI_d、ΔV_{SR}近似呈线性关系。因此，对式(10)和式(11)进行简化，得到：

$$\begin{cases}\Delta P_{AL}\approx R_d(2I_{d0}+E_d)\Delta I_d=K_{P\text{-}I}\Delta I_d\\ \Delta P_{AL}\approx(1.35E_d-2.7V_{d0})\Delta V_{SR}/R_d=K_{P\text{-}V}\Delta V_{SR}\end{cases}\tag{12}$$

式中：$K_{P\text{-}I}$、$K_{P\text{-}V}$分别为ΔP_{AL}与ΔI_d、ΔV_{SR}的比例系数，根据I_{d0}、V_{d0}、E_d和R_d计算得到，其中I_{d0}与V_{d0}可以通过测量获取，E_d与R_d可以根据现场数据参数辨识得到[22]。根据式(12)，通过设定电解铝负荷有功功率参考值P_{ALref}，改进SR稳流控制模型，可以实现电解铝负荷有功功率调节，如图2所示。图中：T_{ES}为电解槽动态过程时间常数；$\Delta V_{SR\,max}$和$\Delta V_{SR\,min}$分别为SR压降增量上、下限。基于此，可以推导出电解铝负荷有功功率控制模型如式(13)所示，推导过程见附录B的B2部分。

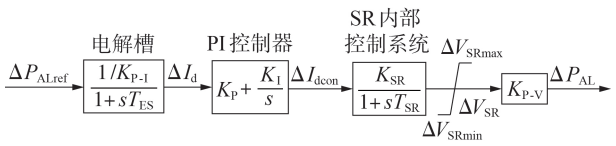

图2 电解铝负荷有功功率控制模型

Fig.2 Active power control model of electrolytic aluminum load

$$\begin{cases}\Delta\dot I_d=-\dfrac{1}{T_{ES}}\Delta I_d+\dfrac{1}{T_{ES}K_{P\text{-}I}}\Delta P_{ALref}\\ \Delta\dot I_{dcon}=\left(K_I-\dfrac{K_P}{T_{ES}}\right)\Delta I_d+\dfrac{K_P}{T_{ES}K_{P\text{-}I}}\Delta P_{ALref}\\ \Delta\dot P_{AL}=\dfrac{K_{P\text{-}V}K_{SR}}{T_{SR}}\Delta I_{dcon}-\dfrac{1}{T_{SR}}\Delta P_{AL}\end{cases}\tag{13}$$

电解铝负荷有功功率控制模型传递函数为：

$$\Delta P_{AL}(s)=\frac{K_{P\text{-}V}K_{SR}(K_I+sK_P)}{sK_{P\text{-}I}(1+sT_{ES})(1+sT_{SR})}\Delta P_{ALref}(s)=G_{AL}(s)\Delta P_{ALref}(s)\tag{14}$$

2.2 电解铝工业电网平抑风电波动控制模型

电解铝工业电网的LFC模型如图3所示。图中：下标i和j分别表示第i台火电机组和第j个电解铝负荷；火电机组模型包括调速器、汽轮机以及限幅环节；M_1为电解铝工业电网的惯性常数；R_{1i}为机组下垂系数；T_{Gi}和T_{Ti}分别为调速器和汽轮机的时间常数；ΔX_{Gi}和ΔP_{Gi}分别为汽门开度增量和机械功率增量；$\Delta X_{Gi\max}$和$\Delta X_{Gi\min}$分别为汽门开度增量上限和下限；$\Delta P_{Gi\max}$和$\Delta P_{Gi\min}$分别为机械功率增量上限和下限；ΔP_{Grefi}为火电机组的控制增量；ΔP_{ALrefj}和ΔP_{ALj}分别为电解铝负荷控制增量和有功功率增量；$\Delta P_{ALj\max}$和$\Delta P_{ALj\min}$分别为电解铝有功功率增量上限和下限；2.1节已对电解铝负荷模型进行了推导，其有功功率控制模型如式(13)和式(14)所示。

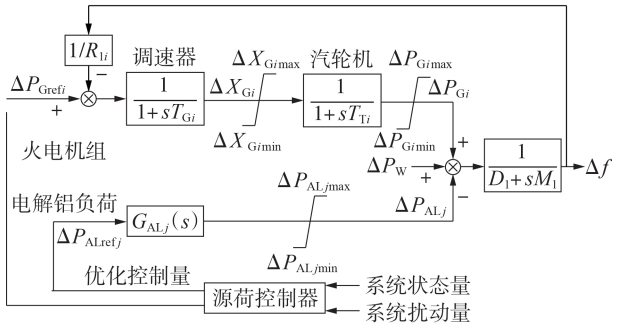

图3 电解铝工业电网LFC模型

Fig.3 LFC model of electrolytic aluminum industrial power grid

2.1节中已指出电解铝负荷可在数秒内实现上调5%的额定功率和下调10%的额定功率。通常情况下，火电机组的爬坡速率为每分钟2%~5%，即每分钟机组功率调节额定容量的2%~5%，具体可调节量由装机容量决定。因此，火电机组调节速率较慢但可调容量较大，而电解铝负荷调节速率较快，可调容量相对较小。本文优先利用电解铝负荷的快速响应能力平抑电解铝工业电网内部快速的风电功率波动。电解铝负荷调节量由源荷控制器优化得到，当负荷调节量不足以平抑风电功率波动时，火电机组参与调节，共同平抑风电功率波动。

本文控制目标是设计源荷控制器，通过引入系统状态量以及扰动量，经过控制器后，得到优化的控制量用于调节火电机组和电解铝负荷有功功率控制增量ΔP_{Grefi}和ΔP_{ALrefj}。本文的控制策略是挖掘高耗能电解铝负荷调控能力，与电解铝工业电网内部火电机组二次调频协同运行，共同平抑风电功率波动ΔP_w。本节主要分析电解铝工业电网内部火电机组和电解铝负荷的控制模型，源荷控制器设计方法将在第3节详细介绍。

根据第1节对联网型电解铝工业电网联络线功率波动特性分析，在大电网容量远大于电解铝工业电网的情况下，当电解铝工业电网没有额外的控制策略时，联络线功率波动ΔP_{tie}近似与风电功率波动幅值相等、相位相反，如式(7)所示。本文通过控制

电解铝工业电网中的火电机组和电解铝负荷，实现工业电网内部风电功率波动平抑，减少联络线上功率波动。假设系统中有 m 台火电机组、n 个电解铝负荷，以第 i 台火电机组和第 j 个电解铝负荷为例，基于LFC模型，电解铝工业电网平抑风电功率波动的控制模型如式(15)所示。

$$\begin{cases}\Delta\dot{f}=-\dfrac{D_1}{M_1}\Delta f+\dfrac{1}{M_1}\Delta P_{Gi}-\dfrac{1}{M_1}\Delta P_{ALj}+\dfrac{1}{M_1}\Delta P_w\\ \Delta\dot{P}_{Gi}=-\dfrac{1}{T_{Ti}}\Delta P_{Gi}+\dfrac{1}{T_{Ti}}\Delta X_{Gi}\\ \Delta\dot{X}_{Gi}=-\dfrac{1}{R_{1i}T_{Gi}}\Delta f-\dfrac{1}{T_{Gi}}\Delta X_{Gi}+\dfrac{1}{T_{Gi}}\Delta P_{Grefi}\\ \Delta\dot{I}_{dj}=-\dfrac{1}{T_{ESj}}\Delta I_{dj}+\dfrac{1}{T_{ESj}K_{P\text{-}Ij}}\Delta P_{ALrefj}\\ \Delta\dot{I}_{dconj}=\left(K_{Ij}-\dfrac{K_{Pj}}{T_{ESj}}\right)\Delta I_{dj}+\dfrac{K_{Pj}}{T_{ESj}K_{P\text{-}Ij}}\Delta P_{ALrefj}\\ \Delta\dot{P}_{ALj}=\dfrac{K_{P\text{-}Vj}K_{SRj}}{T_{SRj}}\Delta I_{dconj}-\dfrac{1}{T_{SRj}}\Delta P_{ALj}\\ \Delta P_{con}=\sum_{i=1}^{m}\Delta P_{Gi}-\sum_{j=1}^{n}\Delta P_{ALj}\end{cases}\tag{15}$$

式中：K_{Pj}、K_{Ij}为第 j 个电解铝负荷SR稳流系统PI控制器参数；T_{ESj}为第 j 个电解铝负荷电解槽动态过程时间常数；K_{SRj}、T_{SRj}分别为第 j 个电解铝负荷SR内部控制系统比例系数和时间常数；$K_{P\text{-}Vj}$、$K_{P\text{-}Ij}$分别为ΔP_{ALj}与ΔV_{SRj}、ΔI_{dj}的比例关系系数；T_{Gi}、T_{Ti}分别为第 i 台火电机组调速器、汽轮机时间常数。

式(15)可以写为如下形式：

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}+\boldsymbol{P}\boldsymbol{d}\\ \boldsymbol{y}=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}\end{cases}\tag{16}$$

$$\begin{cases}\boldsymbol{x}=\left[\Delta f,\Delta\boldsymbol{P}_{Gi},\Delta\boldsymbol{X}_{Gi},\Delta\boldsymbol{I}_{dj},\Delta\boldsymbol{I}_{dconj},\Delta\boldsymbol{P}_{ALj}\right]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{u}=\left[\Delta\boldsymbol{P}_{Grefi},\Delta\boldsymbol{P}_{ALrefj}\right]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{d}=\left[\Delta P_w\right],\ \boldsymbol{y}=\left[\Delta P_{con}\right]\end{cases}\tag{17}$$

式中：$\boldsymbol{x}$为控制系统状态变量；$\boldsymbol{u}$为控制系统控制变量，包括机组二次调频出力偏差量和电解铝负荷有功功率控制参考值偏差量；$\boldsymbol{y}$为控制系统输出变量，为火电机组出力调节量与电解铝有功功率调节量之和；$\boldsymbol{d}$为扰动量，风电功率波动作为可观测扰动输入控制系统中；矩阵$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{C}$和$\boldsymbol{P}$可以根据式(15)得到。

3　基于MPC的源荷控制器设计

MPC是一种基于模型的闭环优化控制策略，其基本思想是在当前控制时刻k，利用系统预测模型得到预测时域N_P内系统动态预测值，选取某个性能指标作为优化目标，求解优化问题，得到k时刻的最优控制序列，将该控制序列的第1个控制量用于系统中，对下一个控制时刻$k+1$进行滚动优化计算，并利用预测误差进行反馈校正，如此重复循环。本节提出基于MPC的电解铝工业电网平抑风电功率波动控制策略。

由于式(15)和式(16)所示的电解铝工业电网平抑风电功率波动的控制模型是连续系统模型，而MPC中采用的预测模型为离散系统模型。因此，需要先将式(16)离散化(离散系统的采样周期为T_s)，得到控制模型离散形式如下：

$$\begin{cases}\boldsymbol{x}(k+1)=\boldsymbol{A}_d\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{B}_d\boldsymbol{u}(k)+\boldsymbol{P}_d\boldsymbol{d}(k)\\ \boldsymbol{y}(k+1)=\boldsymbol{C}_d\boldsymbol{x}(k)\end{cases}\tag{18}$$

$$\boldsymbol{A}_d=\mathrm{e}^{\boldsymbol{A}T_s},\ \ \boldsymbol{B}_d=\int_0^{T_s}\mathrm{e}^{\boldsymbol{A}T_s}\mathrm{d}t\boldsymbol{B}$$

$$\boldsymbol{P}_d=\int_0^{T_s}\mathrm{e}^{\boldsymbol{A}T_s}\mathrm{d}t\boldsymbol{P},\ \ \boldsymbol{C}_d=\boldsymbol{C}$$

式中：$\boldsymbol{A}_d$、$\boldsymbol{B}_d$、$\boldsymbol{C}_d$和$\boldsymbol{P}_d$为离散化的控制系统矩阵。

由第1节分析可知，当大电网容量远大于工业电网容量时，如果不采取任何控制措施，联络线功率波动ΔP_{tie}在幅值上近似等于工业电网内部风电功率波动ΔP_w。通过协调控制工业电网内部火电机组与电解铝负荷，实现平抑风电功率波动，从而限制联络线功率波动。因此MPC模型中的参考值$\boldsymbol{r}(k)$为风电功率波动ΔP_w，表示火电机组和电解铝负荷功率调节应实现对风电功率波动跟踪，其误差信号为：

$$\boldsymbol{e}(k)=\boldsymbol{y}(k)-\boldsymbol{r}(k)\tag{19}$$

因此，得到MPC优化问题如下：

$$\begin{cases}\min\limits_{U} J\left(\boldsymbol{U},\boldsymbol{x}(k)\right)=\sum\limits_{i=1}^{N_P}\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(k+i)\boldsymbol{Q}\,\boldsymbol{e}(k+i)+\\ \qquad\qquad\sum\limits_{i=0}^{N_u-1}\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}(k+i)\boldsymbol{R}\,\boldsymbol{u}(k+i)\\ \text{s.t.}\ \begin{cases}\boldsymbol{x}(k+i+1|k)=\boldsymbol{A}_d\boldsymbol{x}(k+i|k)+\boldsymbol{B}_d\boldsymbol{u}(k+i|k)+\\ \qquad\qquad\boldsymbol{P}_d\boldsymbol{d}(k+i|k)\quad i\geqslant 0\\ \boldsymbol{x}(k|k)=\boldsymbol{x}_k\\ \boldsymbol{y}(k+i|k)=\boldsymbol{C}_d\boldsymbol{x}(k+i|k)\quad i\geqslant 0\\ \boldsymbol{x}_{\min}\leqslant\boldsymbol{x}(k+i|k)\leqslant\boldsymbol{x}_{\max}\quad i=0,1,\cdots,N_P-1\\ \Delta\boldsymbol{x}_{\min}\leqslant\Delta\boldsymbol{x}(k+i|k)\leqslant\Delta\boldsymbol{x}_{\max}\quad i=0,1,\cdots,N_P-1\\ \boldsymbol{u}_{\min}\leqslant\boldsymbol{u}(k+i|k)\leqslant\boldsymbol{u}_{\max}\quad i=0,1,\cdots,N_u-1\\ \Delta\boldsymbol{u}_{\min}\leqslant\Delta\boldsymbol{u}(k+i|k)\leqslant\Delta\boldsymbol{u}_{\max}\quad i=0,1,\cdots,N_u-1\\ \boldsymbol{y}_{\min}\leqslant\boldsymbol{y}(k+i|k)\leqslant\boldsymbol{y}_{\max}\quad i=0,1,\cdots,N_P\end{cases}\end{cases}\tag{20}$$

式中：$\boldsymbol{U}=\left[\boldsymbol{u}(k),\cdots,\boldsymbol{u}\left(k+N_u-1\right)\right]^{\mathrm{T}}$为最优控制量，$\boldsymbol{Q}$和$\boldsymbol{R}$为代价函数$J\left(\boldsymbol{U},\boldsymbol{x}(k)\right)$的权重系数矩阵；$\boldsymbol{x}(k+t|k)$和$\boldsymbol{y}(k+t|k)$分别为在$k+t$时刻的预测状态量和输出量；$N_P$和$N_u$分别为预测步长和控制步长。约束条件包括火电机组二次调频出力上下限、调频速率

限制、电解铝负荷调节能力上下限。

式(20)中关于火电机组和电解铝负荷控制量部分的表达式可以写为：

$$\boldsymbol{U}=\sum_{i=0}^{N_u-1}\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}(k+i)\boldsymbol{R}\boldsymbol{u}(k+i)=\sum_{i=0}^{N_u-1}\boldsymbol{u}_{\mathrm{G}}^{\mathrm{T}}(k+i)\boldsymbol{R}_{\mathrm{G}}\boldsymbol{u}_{\mathrm{G}}(k+i)+\sum_{i=0}^{N_u-1}\boldsymbol{u}_{\mathrm{AL}}^{\mathrm{T}}(k+i)\boldsymbol{R}_{\mathrm{AL}}\boldsymbol{u}_{\mathrm{AL}}(k+i) \tag{21}$$

式中：$\boldsymbol{u}_{\mathrm{G}}$和$\boldsymbol{u}_{\mathrm{AL}}$分别为火电机组和电解铝负荷的控制向量；$\boldsymbol{R}_{\mathrm{G}}$和$\boldsymbol{R}_{\mathrm{AL}}$分别为火电机组和电解铝负荷的控制量权重矩阵。为了方便分析，假设系统中火电机组和电解铝负荷数量都为1个，则式(21)可以简化为：

$$\boldsymbol{U}=\sum_{i=0}^{N_u-1}R_{\mathrm{G}}u_{\mathrm{G}}^2(k+i)+\sum_{i=0}^{N_u-1}R_{\mathrm{AL}}u_{\mathrm{AL}}^2(k+i) \tag{22}$$

式中：R_{G}和R_{AL}分别为单台火电机组和单个电解铝负荷的权重系数，其决定了在控制时域内两者的调节量占比，两者的比值关系如式(23)所示。

$$\left|u_{\mathrm{AL}}/u_{\mathrm{G}}\right|=\sqrt{R_{\mathrm{G}}/R_{\mathrm{AL}}} \tag{23}$$

由式(23)可以看出，当$R_{\mathrm{G}}/R_{\mathrm{AL}}$越大，则电解铝负荷调节量占比越高。同理，当系统内有多台火电机组和多个电解铝负荷时，其调节量占比仍然由控制量权重矩阵$\boldsymbol{R}_{\mathrm{G}}$和$\boldsymbol{R}_{\mathrm{AL}}$的系数决定。由于电解铝负荷具有快速响应特性，当电解铝负荷调节量占比较高时，源荷控制器对快速风电功率波动的平抑效果较好。

在k时刻下的状态变量$\boldsymbol{x}(k|k)$初始值为$\boldsymbol{x}_k$，扰动变量$\boldsymbol{d}(k|k)$初始值为$\boldsymbol{d}_k$，令：

$$\begin{cases}\boldsymbol{X}(k)=\left[\boldsymbol{x}(k|k),\boldsymbol{x}(k+1|k),\cdots,\boldsymbol{x}(k+N_{\mathrm{P}}-1|k)\right]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{U}(k)=\left[\boldsymbol{u}(k|k),\boldsymbol{u}(k+1|k),\cdots,\boldsymbol{u}(k+N_{\mathrm{u}}-1|k)\right]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{E}(k)=\left[\boldsymbol{e}(k|k),\boldsymbol{e}(k+1|k),\cdots,\boldsymbol{e}(k+N_{\mathrm{P}}-1|k)\right]^{\mathrm{T}}\end{cases} \tag{24}$$

式中：$\boldsymbol{X}(k)$、$\boldsymbol{E}(k)$和$\boldsymbol{U}(k)$分别为k时刻下预测步长N_{P}内的状态量序列、误差量序列以及控制步长N_{u}内的最优控制序列。根据式(18)对$\boldsymbol{X}(k)$、$\boldsymbol{E}(k)$中的元素进行推导，可以得到k时刻下$\boldsymbol{X}(k)$和$\boldsymbol{E}(k)$的表达式为：

$$\begin{cases}\boldsymbol{X}(k)=\bar{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{x}_k+\bar{\boldsymbol{B}}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{U}(k)+\bar{\boldsymbol{P}}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{d}_k\\ \boldsymbol{E}(k)=\boldsymbol{M}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{x}_k+\boldsymbol{N}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{U}(k)+\boldsymbol{L}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{d}_k\end{cases} \tag{25}$$

式中：$\bar{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{d}}$、$\bar{\boldsymbol{B}}_{\mathrm{d}}$、$\bar{\boldsymbol{P}}_{\mathrm{d}}$、$\boldsymbol{M}_{\mathrm{d}}$、$\boldsymbol{N}_{\mathrm{d}}$和$\boldsymbol{L}_{\mathrm{d}}$为参数矩阵，可以根据$\boldsymbol{A}_{\mathrm{d}}$、$\boldsymbol{B}_{\mathrm{d}}$、$\boldsymbol{C}_{\mathrm{d}}$和$\boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}$计算得到。式(25)中$\boldsymbol{X}(k)$和$\boldsymbol{E}(k)$由$k$时刻下态变量初始值$\boldsymbol{x}_k$、扰动变量初始值$\boldsymbol{d}_k$以及最优控制序列$\boldsymbol{U}(k)$组成。

将式(25)代入式(20)中的代价函数$J(\boldsymbol{U},\boldsymbol{x}(k))$后可得：

$$J(\boldsymbol{U},\boldsymbol{x}(k))=\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}(k)\bar{\boldsymbol{R}}\boldsymbol{U}(k)+2(\boldsymbol{x}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}_1+\boldsymbol{d}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}_2)\boldsymbol{U}(k)+2\boldsymbol{x}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}_3\boldsymbol{d}_k+\boldsymbol{x}_k^{\mathrm{T}}\bar{\boldsymbol{Q}}\boldsymbol{x}_k+\boldsymbol{d}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{N}\boldsymbol{d}_k \tag{26}$$

式中：矩阵$\bar{\boldsymbol{Q}}$、$\bar{\boldsymbol{R}}$、$\boldsymbol{N}$、$\boldsymbol{G}_1$、$\boldsymbol{G}_2$和$\boldsymbol{G}_3$根据式(25)中的参数矩阵以及权重系数矩阵$\boldsymbol{Q}$和$\boldsymbol{R}$计算得到。将式(26)中的代价函数代入到式(20)，MPC优化问题转变为一个二次规划问题，便于求解计算。

通过求解二次规划问题，可以获得优化控制量$\boldsymbol{U}(k)$，将每次优化得到的$\boldsymbol{u}(k|k)$作为控制量控制。在$k+1$时刻，通过获得系统状态变量$\boldsymbol{x}(k+1|k+1)$和扰动变量$\boldsymbol{d}(k+1|k+1)$，重复进行二次规划优化，实现滚动优化控制。

4 算例分析

本文以云南文山地区某个含风电的联网型电解铝工业电网作为研究对象，其电网结构图见附录C图C1。电解铝工业电网内部包含本地火电机组G_1—G_5，其中G_1—G_3的装机容量均为600 MW，G_4、G_5的装机容量均为400 MW。除了本地机组，电网内部风电场装机总容量为1 000 MW。该工业电网内有3处电解铝厂，每个电解铝负荷有功功率为800 MW。其他母线节点负荷有功功率见附录C表C1。火电机组与电解铝负荷控制系统中的参数见附录C表C2。工业电网通过联络线与外部大电网相连，当工业电网内部有功不足时，大电网提供频率支撑，确保工业电网安全稳定运行。本节对工业电网平抑风电功率波动的控制策略进行仿真和分析。

在$t=0$时刻，工业电网内部机组出力如附录C表C3所示，可以实现电网内部有功功率自给，与大电网无联络线功率交换。本节采用一段10 min的风电功率波动，采样间隔为1 s，功率差最大值约为190 MW，如图4所示。根据第2节的分析，当大电网的容量远大于工业电网，工业电网内部出现风电功率波动时，如果不采用控制策略，则联络线的功率波动与风电功率波动幅值相等、相位相反。

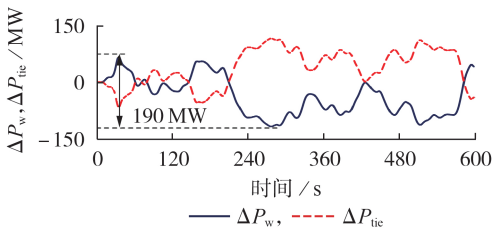

图4 无控制策略时风电功率波动与联络线功率波动

Fig.4 Wind power fluctuation and tie-line power fluctuation without control strategy

4.1 基于MPC控制器平抑风电功率波动效果

由于电解铝负荷有功功率调节响应快，但为了保证生产，可调容量较小，而火电机组调节速率较慢但可调容量较大，通过MPC控制权重系数，可以优

先调节电解铝负荷应对风电功率快速波动，协助火电机组平抑风电功率波动。设置电解铝负荷权重系数为20，火电机组的权重系数为50，基于MPC控制器的平抑功率波动效果如图5所示。由图可见，电解铝负荷与火电机组共同参与平抑风电功率波动时，电解铝负荷的调节速率优于火电机组，通过源荷协调控制，联络线功率波动限制在±5 MW范围内。

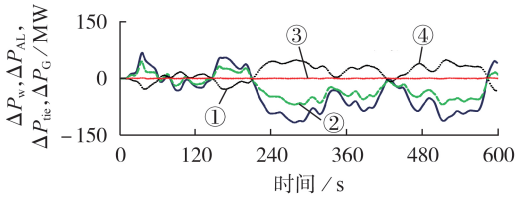

图5　基于MPC的风电功率波动平抑效果

Fig.5　Wind power fluctuation smoothing effect based on MPC

4.2　不同权重系数下MPC控制效果对比

由第3节分析可知，MPC控制器中的负荷权重系数将影响平抑功率波动效果。将电解铝负荷权重系数设置为20、50和100，即在控制时域内对电解铝负荷参与调节量设置不同占比，如式(23)所示。图6为不同权重系数下的电解铝负荷有功功率和联络线功率波动曲线。

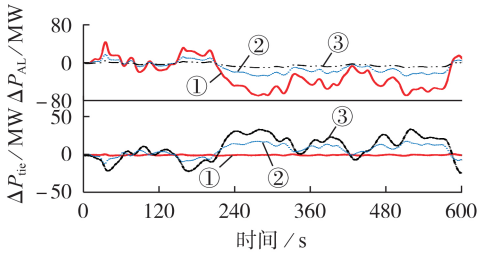

图6　不同权重系数下电解铝负荷有功功率与联络线功率波动曲线

Fig.6　Active power fluctuation curves of electrolytic aluminum load and tie-line under different weight coefficients

根据式(22)，电解铝负荷权重系数越大，电解铝负荷调节量占比越小，控制器平抑风电功率波动效果越差，联络线功率变化越大。由于电解铝负荷具有快速响应能力，可以跟踪风电功率波动，当电解铝负荷权重系数较小时，表明负荷调节量占比较高，则源荷控制器整体平抑风电功率波动效果较好，联络线功率波动更小。

在本算例中，对比电解铝负荷权重系数为20、100的2组测试结果：当负荷权重系数设置为20时，MPC控制器平抑功率波动效果更佳，此时联络线功率波动限制在±5 MW范围内；当负荷权重系数为100时，电解铝负荷有功功率调节较少，调节量在±40 MW范围内。由于缺少负荷的快速响应，火电机组的调节速率不足以平抑风电功率快速变化，导致联络线功率变化频繁，波动范围达到±40 MW。

4.3　不同控制方法的控制效果对比

在出现风电功率波动的情况下，比较火电机组自动发电控制AGC(Automatic Generation Control)(无负荷控制器)、PI控制器和MPC控制器这3种控制方法的效果。PI控制器通过引入区域控制误差ACE(Area Control Error)信号，控制火电机组出力和电解铝负荷功率，协调机组与负荷平抑风电功率波动。MPC控制器采用4.1节中的权重系数设置。不同控制方法对风电功率波动平抑效果对比如图7所示。

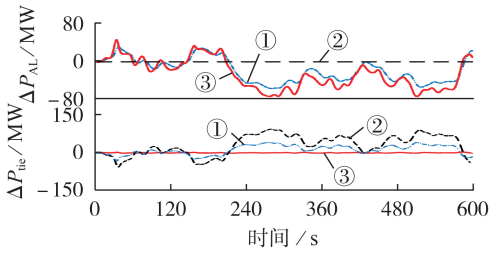

图7　不同控制方法下电解铝负荷与联络线功率波动曲线

Fig.7　Active power fluctuation curves of electrolytic aluminum load and tie-line with different control methods

当电解铝负荷不参与控制时，仅采用传统火电机组AGC平抑风电功率波动，由于机组调节速率受限，难以跟踪风电的快速功率波动，导致联络线功率波动剧烈，最大波动率接近100 MW。PI控制器通过引入ACE信号，作为火电机组和电解铝负荷的控制量信号，在平抑风电功率方面有一定作用，联络线功率波动限制在±50 MW范围内，但是无法充分发挥电解铝负荷快速响应的特性。与AGC、PI控制器相比，在MPC控制器的作用下，电解铝负荷可以实现对风电功率波动的快速跟踪，协调火电机组实现对功率波动的平抑，限制工业电网与大电网的功率交换，实现工业电网内部风电功率就地消纳，减少大电网平抑风电功率波动的负担。

5　结论

本文研究了含风电的联网型工业电网平抑功率波动的控制问题，建立了高耗能电解铝负荷与火电机组源荷协调控制模型，用于平抑因风电功率波动造成的联络线功率波动。基于MPC控制器，对火电机组和电解铝负荷的有功功率控制量进行滚动优化求解，从而实现对风电功率波动的跟踪平抑。以云南文山地区某联网型的电解铝工业电网为例，选

取一段风电功率波动剧烈的时间段，对火电机组和电解铝负荷的有功功率进行优化控制，得到以下结论。

1）电解铝负荷具有参与系统快速调节的潜力，相比火电机组，响应速率更快，适用于跟踪剧烈的风电功率波动。

2）本文所提出的基于MPC的源荷协调控制策略在设置不同权重系数的情况下，对平抑风电功率波动有不同的效果；通过设置合适的权重系数，协调电解铝负荷有功功率与火电机组有功出力，可以将联络线上功率波动限制在±5 MW以内。

3）与PI控制器相比，基于MPC的控制方法面对风电功率波动具有更好的抗干扰性，可实现对风电功率波动跟踪平抑。

本文提出的控制策略适用于区域电网平抑风电/光伏等新能源功率波动，提高区域互联稳定性和电网快速调节能力。随着源网荷协调控制技术和控制要求不断发展和完善，未来可结合多种类型的电源和可控制负荷参与系统控制的复杂场景开展进一步研究。

附录见本刊网络版（http://www.epae.cn）。

参考文献：

[1] 郭尊，李庚银，周明，等. 面向风电消纳的电-气联合系统分散协调鲁棒优化调度模型[J]. 中国电机工程学报，2020，40(20)：6442-6454.
GUO Zun，LI Gengyin，ZHOU Ming，et al. A decentralized and robust optimal scheduling model of integrated electricity-gas system for wind power accommodation[J]. Proceedings of the CSEE，2020，40(20)：6442-6454.

[2] 张敏，王建学，王秀丽，等. 面向新能源消纳的调峰辅助服务市场双边交易机制与模型[J]. 电力自动化设备，2021，41(1)：84-91.
ZHANG Min，WANG Jianxue，WANG Xiuli，et al. Bilateral trading mechanism and model of peak regulation auxiliary service market for renewable energy accommodation[J]. Electric Power Automation Equipment，2021，41(1)：84-91.

[3] 邱伟强，王茂春，林振智，等. “双碳”目标下面向新能源消纳场景的共享储能综合评价[J]. 电力自动化设备，2021，41(10)：244-255.
QIU Weiqiang，WANG Maochun，LIN Zhenzhi，et al. Comprehensive evaluation of shared energy storage towards new energy accommodation scenario under targets of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Electric Power Automation Equipment，2021，41(10)：244-255.

[4] 舒印彪，张智刚，郭剑波，等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报，2017，37(1)：1-8.
SHU Yinbiao，ZHANG Zhigang，GUO Jianbo，et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE，2017，37(1)：1-8.

[5] AKRAMI A，DOOSTIZADEH M，AMINIFAR F. Power system flexibility：an overview of emergence to evolution[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy，2019，7(5)：987-1007.

[6] 王勇，仲维洋，佟永吉，等. 电解铝企业参与弃风消纳可行性与经济性分析[J]. 轻金属，2021(1)：58-62.
WANG Yong，ZHONG Weiyang，TONG Yongji，et al. Feasibility and economic analysis of aluminum enterprises participating in wind curtailment accommodation[J]. Light Metals，2021(1)：58-62.

[7] BAO Yi，XU Jian，LIAO Siyang. Field verification of frequency control by energy-intensive loads for isolated power systems with high penetration of wind power[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2018，33(6)：6098-6108.

[8] TODD D，CAUFIELD M，HELMS B，et al. Providing reliability services through demand response：a preliminary evaluation of the demand response capabilities of Alcoa Inc[R]. Oak Ridge，USA：Oak Ridge National Laboratory，2009.

[9] PAULUS M，BORGGREFE F. The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany[J]. Applied Energy，2011，88(2)：432-441.

[10] 刘皓明，黄海萍，高元，等. 考虑有载调压变压器的电解铝稳流控制及其能效分析[J]. 电力需求侧管理，2013，15(3)：34-37，52.
LIU Haoming，HUANG Haiping，GAO Yuan，et al. Current stabilization control strategy and energy efficiency analysis in an aluminum smelter considering OLTC[J]. Power Demand Side Management，2013，15(3)：34-37，52.

[11] JIANG Hao，LIN Jin，SONG Yonghua，et al. Demand side frequency control scheme in an isolated wind power system for industrial aluminum smelting production[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2014，29(2)：844-853.

[12] CUI Ting，LIN Wei，SUN Yuanzhang，et al. Excitation voltage control for emergency frequency regulation of island power systems with voltage-dependent loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2016，31(2)：1204-1217.

[13] LIAO Siyang，XU Jian，SUN Yuanzhang. Load damping characteristic control method in an isolated power system with industrial voltage-sensitive load[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2016，31(2)：1118-1128.

[14] LIAO Siyang，XU Jian，SUN Yuanzhang，et al. Control of energy-intensive load for power smoothing in wind power plants[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2018，33(6)：6142-6154.

[15] ZHANG Chen，LIN Wei，KE Deping，et al. Smoothing tie-line power fluctuations for industrial microgrids by demand side control：an output regulation approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2019，34(5)：3716-3728.

[16] LEI Mingyu，YANG Zilong，WANG Yibo，et al. An MPC-based ESS control method for PV power smoothing applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2018，33(3)：2136-2144.

[17] 余洋，权丽，贾雨龙，等. 平抑新能源功率波动的聚合温控负荷改进模型预测控制[J]. 电力自动化设备，2021，41(3)：92-99.
YU Yang，QUAN Li，JIA Yulong，et al. Improved model predictive control of aggregated thermostatically controlled load for power fluctuation suppression of new energy[J]. Electric Power Automation Equipment，2021，41(3)：92-99.

[18] 刘皓明，孟侠，高元，等. 电解铝整流系统建模与稳流协调控制策略[J]. 中国电力，2015，48(1)：121-126.
LIU Haoming，MENG Xia，GAO Yuan，et al. Modeling and current stabilization coordinated control strategy of rectifier system in an aluminum smelter[J]. Electric Power，2015，48(1)：121-126.

[19] 王醒钟，成庚，崔新芳. 全系列工业电解槽长时间停电的对策及状态特征[J]. 有色冶金节能，1998(3)：16-19.
WANG Xingzhong，CHENG Geng，CUI Xinfang. Countermeasure and state characteristic of long time power cut on whole

series industrial cells[J]. Energy Saving of Non-ferrous Metallurgy,1998(3):16-19.
[20] 沈阳铝镁设计研究院电力室. 硅整流所电力设计[M]. 北京:冶金工业出版社,1983:456-520.
[21] XU Jian, LIAO Siyang, SUN Yuanzhang, et al. An isolated industrial power system driven by wind-coal power for aluminum productions:a case study of frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2015,30(1):471-483.
[22] 廖思阳. 高耗能负荷参与高渗透率风电孤立电网频率控制方法研究[D]. 武汉:武汉大学,2016.
LIAO Siyang. Research on participation of energy intensive load in frequency regulation in isolated power system with high penetration of wind power[D]. Wuhan:Wuhan University, 2016.

作者简介:

丁　鑫

丁　鑫(1993—),男,博士研究生,主要研究方向为电力系统运行与控制、工业负荷控制(**E-mail**:dingxin2016@whu.edu.cn);
徐　箭(1980—),男,教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统稳定与控制(**E-mail**:xujian@whu.edu.cn);
孙元章(1953—),男,教授,博士,主要研究方向为电力系统稳定与控制(**E-mail**:yzsun@mail.tsinghua.edu.cn);
廖思阳(1989—),男,教授,博士,主要研究方向为电力系统稳定与控制(**E-mail**:liaosiyang@whu.edu.cn)。

(**编辑**　任思思)

Source-load coordinated control strategy for smoothing wind power fluctuation in grid-connected high energy consuming electrolytic aluminum industrial power grid

DING Xin, XU Jian, SUN Yuanzhang, LIAO Siyang
(School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: For the grid-connected high energy consuming industrial power grid accessed with large-scale new energy, the fluctuation of new energy power will lead to tie-line power fluctuation and extra reserve capacity charge, which is not economical for the industrial power grid operation. By modeling the coordinated control method of the thermal generators and the electrolytic aluminum loads in industrial power grid, a source-load coordinated control strategy is proposed to smooth wind power fluctuation. Based on the model predictive control method, taking the regulating range and response rate of the thermal power units and electrolytic aluminum loads as constraints, and the wind power fluctuation smoothing as the control objective, the active power regulation of thermal power units and the power consumption of electrolytic aluminum loads are optimized to decrease the reserve power of tie-line caused by the wind power fluctuation. Taking a grid-connected industrial power grid in Wenshan, Yunnan as an example, the simulative results verify the effectiveness of the proposed source-load coordinated control strategy in smoothing wind power fluctuation and restricting active power exchange of tie-line between industrial power grid and utility power grid.

Key words: new energy consumption; power fluctuation smoothing; electrolytic aluminum load; model predictive control; coordinated optimal control; wind power

附录 A

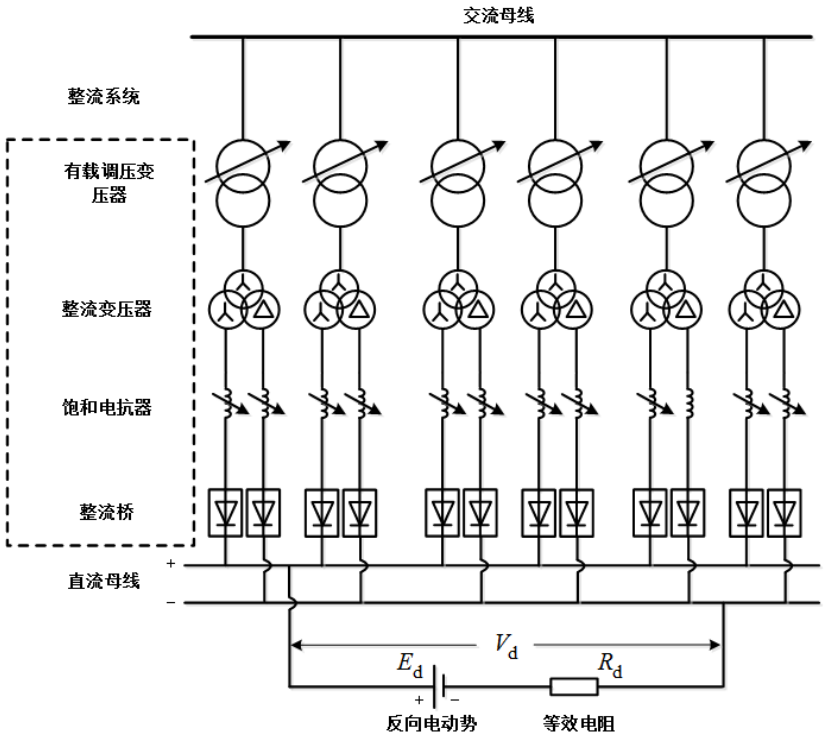

图 A1 电解铝负荷拓扑结构

Fig.A1 Topological structure of electrolytic aluminum load

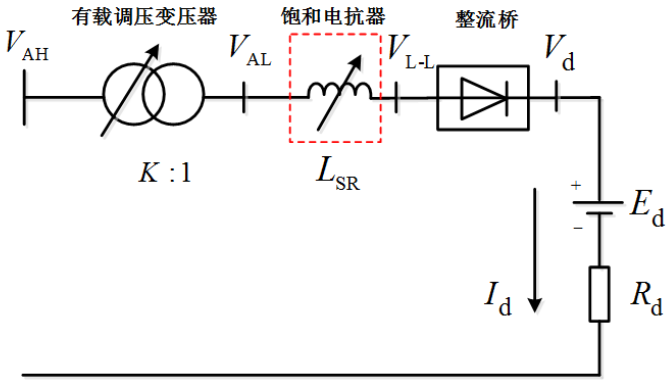

图 A2 电解铝负荷等效电路

Fig.A2 Equivalent circuit of electrolytic aluminum load

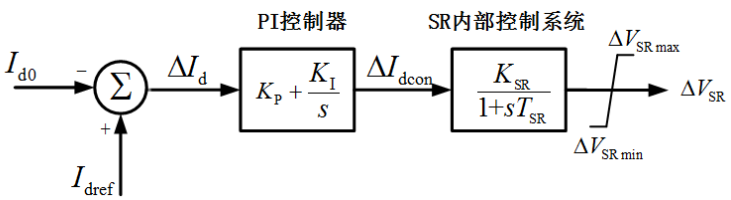

图 A3 SR 稳流控制模型

Fig.A3 Stable direct current control model of SR

附录 B

B1 式（10）与式（11）公式推导

电解铝负荷有功功率 P_{AL} 和电解槽直流电压 V_{d} 的表达式分别如式（8）和式（9）所示。电解槽直流电流 I_{d} 与 V_{d} 的关系可表示为：

$$V_{\mathrm{d}} = I_{\mathrm{d}}R_{\mathrm{d}} + E_{\mathrm{d}}$$

电解槽内的反向电动势 E_{d} 和等效电阻 R_{d} 短时间内通常认为是固定值，交流侧电压 V_{AH} 和变压器变比 K 保持不变。假设电解铝负荷直流电流、电压初始值为 I_{d0} 和 V_{d0}，SR 压降初始值为 V_{SR0}。当通过调节 SR 压降为 V_{SR1}，电解铝负荷有功功率为 P_{AL1}，此时对应的直流电流、电压分别为 I_{d1} 和 V_{d1}。直流电流与电压变化量 ΔI_{d} 和 ΔV_{d}、SR 压降变化量 ΔV_{SR} 分别为：

$$\Delta V_{\mathrm{d}} = V_{\mathrm{d1}} - V_{\mathrm{d0}},\quad \Delta I_{\mathrm{d}} = I_{\mathrm{d1}} - I_{\mathrm{d0}} = \Delta V_{\mathrm{d}} / R_{\mathrm{d}}$$

$$\Delta V_{\mathrm{SR}} = V_{\mathrm{SR1}} - V_{\mathrm{SR0}} = -\Delta V_{\mathrm{d}} / 1.35$$

电解铝负荷有功功率调节量 ΔP_{AL} 的表达式为：

$$\begin{aligned}\Delta P_{\mathrm{AL}} &= P_{\mathrm{AL1}} - P_{\mathrm{AL0}}\\ &= \left[V_{\mathrm{d1}}\left(V_{\mathrm{d1}} - E_{\mathrm{d}}\right) - V_{\mathrm{d0}}\left(V_{\mathrm{d0}} - E_{\mathrm{d}}\right)\right] / R_{\mathrm{d}}\\ &= \left[\left(V_{\mathrm{d1}}^2 - V_{\mathrm{d0}}^2\right) - \left(V_{\mathrm{d1}} - V_{\mathrm{d0}}\right)E_{\mathrm{d}}\right] / R_{\mathrm{d}}\end{aligned}$$

将 ΔV_{d} 的表达式代入 ΔP_{AL} 的表达式，可以进一步得到：

$$\Delta P_{\mathrm{AL}} = \frac{\Delta V_{\mathrm{d}}^2 + \left(2V_{\mathrm{d0}} - E_{\mathrm{d}}\right)\Delta V_{\mathrm{d}}}{R_{\mathrm{d}}} \tag{B1}$$

将 ΔI_{d} 的表达式代入式（B1），得到 ΔP_{AL} 与 ΔI_{d} 的关系式为：

$$\Delta P_{\mathrm{AL}} = R_{\mathrm{d}}\Delta I_{\mathrm{d}}^2 + R_{\mathrm{d}}\left(2I_{\mathrm{d0}} + E_{\mathrm{d}}\right)\Delta I_{\mathrm{d}} \tag{B2}$$

将 ΔV_{SR} 的表达式代入式（B1），得到 ΔP_{AL} 与 ΔV_{SR} 的关系式为：

$$\Delta P_{\mathrm{AL}} = \frac{1.8225\Delta V_{\mathrm{SR}}^2 + \left(1.35E_{\mathrm{d}} - 2.7V_{\mathrm{d0}}\right)\Delta V_{\mathrm{SR}}}{R_{\mathrm{d}}} \tag{B3}$$

式（B2）与式（B3）即正文中的式（10）和式（11）。

B2 式（13）公式推导

正文中图 2 为电解铝负荷有功功率控制模型，包含电解槽、PI 控制器和 SR 内部控制系统等环节。根据控制模型的传递函数，则有以下表达式：

$$\begin{cases}\Delta I_{\mathrm{d}}(s) = \dfrac{1/K_{\mathrm{P\text{-}I}}}{1 + sT_{\mathrm{ES}}}\Delta P_{\mathrm{ALref}}(s)\\ \Delta I_{\mathrm{dcon}}(s) = \left(K_{\mathrm{P}} + \dfrac{K_{\mathrm{I}}}{s}\right)\Delta I_{\mathrm{d}}(s)\\ \Delta P_{\mathrm{AL}}(s) = \dfrac{K_{\mathrm{P\text{-}V}}K_{\mathrm{SR}}}{1 + sT_{\mathrm{SR}}}\Delta I_{\mathrm{dcon}}(s)\end{cases} \tag{B4}$$

对式（B4）展开，则有：

$$\begin{cases}s\Delta I_{\mathrm{d}}(s) = -\dfrac{1}{T_{\mathrm{ES}}}\Delta I_{\mathrm{d}}(s) + \dfrac{1}{T_{\mathrm{ES}}K_{\mathrm{P\text{-}I}}}\Delta P_{\mathrm{ALref}}(s)\\ s\Delta I_{\mathrm{dcon}}(s) = \left(K_{\mathrm{I}} - \dfrac{K_{\mathrm{P}}}{T_{\mathrm{ES}}}\right)\Delta I_{\mathrm{d}}(s) + \dfrac{K_{\mathrm{P}}}{T_{\mathrm{ES}}K_{\mathrm{P\text{-}I}}}\Delta P_{\mathrm{ALref}}(s)\\ s\Delta P_{\mathrm{AL}}(s) = \dfrac{K_{\mathrm{P\text{-}V}}K_{\mathrm{SR}}}{T_{\mathrm{SR}}}\Delta I_{\mathrm{dcon}}(s) - \dfrac{1}{T_{\mathrm{SR}}}\Delta P_{\mathrm{AL}}(s)\end{cases} \tag{B5}$$

式（B5）是拉普拉斯变换形式下的方程表达式，换成时域下的微分方程，则有：

$$\begin{cases} \Delta\dot{I}_{\mathrm{d}} = -\dfrac{1}{T_{\mathrm{ES}}}\Delta I_{\mathrm{d}} + \dfrac{1}{T_{\mathrm{ES}}K_{\mathrm{P\text{-}I}}}\Delta P_{\mathrm{ALref}} \\ \Delta\dot{I}_{\mathrm{dcon}} = \left(K_{\mathrm{I}} - \dfrac{K_{\mathrm{P}}}{T_{\mathrm{ES}}}\right)\Delta I_{\mathrm{d}} + \dfrac{K_{\mathrm{P}}}{T_{\mathrm{ES}}K_{\mathrm{P\text{-}I}}}\Delta P_{\mathrm{ALref}} \\ \Delta\dot{P}_{\mathrm{AL}} = \dfrac{K_{\mathrm{P\text{-}V}}K_{\mathrm{SR}}}{T_{\mathrm{SR}}}\Delta I_{\mathrm{dcon}} - \dfrac{1}{T_{\mathrm{SR}}}\Delta P_{\mathrm{AL}} \end{cases} \tag{B6}$$

式（B6）即为正文中的式（13）。

附录 C

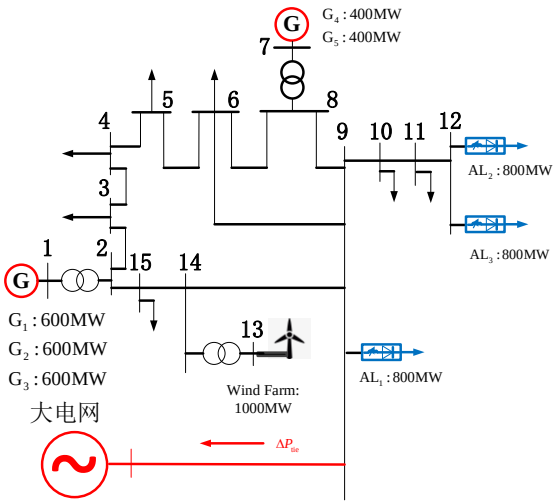

图 C1 云南文山工业电网拓扑图

Fig.C1 Topology of industrial power grid in Yunnan

表 C1 工业电网负荷有功功率

Table C1 Active power of loads in industrial power grid

节点	负荷有功功率/MW	节点	负荷有功功率/MW
3	50	10	60
4	80	11	80
5	80	15	150
6	50		

表 C2 工业电网中的控制参数

Table C2 Control parameters selection of industrial power grid

时间常数	数值/s	比例参数	数值
T_{ES}	0.2	K_{P}	10.5
T_{SR}	0.1	K_{I}	1.5
T_{G}	0.5	K_{SR}	7.5
T_{T}	5.0		

表 C3 工业电网机组初始出力

Table C3 Initial active power of generators in industrial power grid

机组	负荷有功功率/MW	机组	负荷有功功率/MW
G_1	500	G_4	350
G_2	500	G_5	350
G_3	500	WF	800