DOI:10.14188/j.1671-8844.2024.0172 文章编号:1671-8844(XXXX)XX-0001-12

工业园区电能质量协同预测控制策略研究

王珍[1,2],宫金武[1,2],孙鼎豪[1,2],孙建军[1,2],代双寅[3]

(1. 综合能源电力装备及系统安全湖北省重点实验室,湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学电气与自动化学院,湖北 武汉 430072; 3. 国网河南省电力公司,河南 郑州 450018)

摘要: 针对工业园区电能质量治理设备孤立运行、缺乏协调控制,导致治理效果差、效率低的问题,考虑到光伏出力及负荷的波动性和随机性,提出一种基于模型预测控制的多电力电子设备电能质量协同治理策略。该策略基于不同频率下的电流平衡方程建立工业园区节点母线电压电能质量预测模型,以电压畸变率、电压偏差、功率因数以及治理设备损耗为目标函数,并通过模型预测控制的滚动优化与反馈校正,优化各电力电子设备的输出,减小了光伏出力、负荷的波动性和预测误差对电能质量治理效果的影响。仿真分析结果验证了所提策略的可行性和有效性。

关键词: 工业园区;电能质量治理;模型预测控制;多电力电子设备;滚动优化

中图分类号: TM 761 **文献标志码:** A

Research on collaborative predictive control strategy of power quality in industrial parks

WANG Zhen[1,2], GONG Jinwu[1,2], SUN Dinghao[1,2], SUN Jianjun[1,2], DAI Shuangyin[3]

(1. Hubei Key Laboratory of Power Equipment & System Security for Integrated Energy, Wuhan 430072, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450018, China)

Abstract: In the industrial park, there are multiple power electronic devices, all of which have the ability to control power quality. However, currently, the Power quality control device in industrial parks often operates in isolation without coordinated control, resulting in poor power quality control effect and low efficiency. In this regard, this paper studies the coordinated control of power electronic equipment such as photovoltaic inverters, active power filters, and power filters in the park, aiming to enhance the effectiveness and efficiency of power quality control in the park. Considering the volatility and randomness of PV and load, a power quality coordinated control strategy of multiple power electronic devices based on model predictive control was proposed. Based on the current balance equation at different frequencies, the strategy establishes a power quality prediction model for the bus voltage of the node node in the industrial park, which takes the voltage distortion rate, voltage deviation, power factor and the loss of the control devices as the objective functions, and optimizes the output of each power electronic device through the rolling optimization and feedback correction of

收稿日期: 2025-06-30

作者简介: 王珍(2000-),女,硕士研究生,主要从事电力电子在电力系统中的应用研究,E-mail: 2022202070024@edu.cn。

基金项目: 国家电网公司科学技术项目(编号:5400202124483A05ZN)。

本文引用格式: 王珍,宫金武,孙鼎豪,等. 工业园区电能质量协同预测控制策略研究[J]. 武汉大学学报(工学版),XXXX,XX(XX):1-12.

Citation: WANG Zhen, GONG Jinwu, SUN Dinghao, et al. Research on collaborative predictive control strategy of power quality in industrial parks[J]. Engineering Journal of Wuhan University, XXXX, XX(XX):1-12.

the model predictive control, which reduces the impact of the fluctuation of photovoltaic and load and the prediction error on the power quality control effect. Simulation analysis confirms the feasibility and effectiveness of the proposed power quality coordinated control strategy of multiple power electronic devices based on model predictive control.

Key words: industrial parks; power quality control; model predictive control; multiple power electronic devices; rolling optimization

当前,工业园区通常配置电容器、动态无功补偿装置、有源电力滤波器等大量专用治理装置孤立运行进行电能质量治理,治理手段单一,治理效率低下,其控制技术和治理模式无法满足园区优质供电的需求[1-4]。为改善工业园区电能质量治理效果,有必要协调控制这些电力电子设备[5-7]。然而,工业园区中光伏逆变器的电能质量治理能力受到自身有功出力波动的影响[8],这给研究工业园区多电力电子设备电能质量协同治理带来了一定的挑战。

在多电力电子设备电能质量协同治理方面上已有学者进行了一定的研究。文献[9]针对谐波和电压偏差提出电压检测型有源电力滤波器与静态无功发生器(static var generator,SVG)协同配置策略。文献[10]根据电压跌落等级协调统一电能质量调节器、固态切换开关和静止同步补偿器对电压进行补偿,同时协调统一电能质量调节器和静止同步补偿器补偿无功、负序和谐波电流。文献[11]提出级联多电平有源电力滤波器与SVG综合补偿系统控制方法,解决了控制耦合导致的稳定性问题。文献[12]分别分析了自带和不自带大功率储能的统一电能质量调节器的协调控制策略,并提出以多台动态电压恢复器串联补偿的集中控制方式和分散控制方式。文献[13]采用多目标自适应进化规划算法实现静止无功补偿器与可控串联补偿装置协调控制。文献[14]针对多个电能质量控制器协调采用带有中央控制器的主从控制结构,并将多目标粒子群优化算法应用于中央控制器的协调控制中。文献[15]提出一种基于原始对偶次梯度优化算法,以分布式方式解决有源滤波器和混合有源滤波器的协调控制。上述研究主要针对传统治理设备如SVG、有源电力滤波器的协调配置与控制,未将光伏逆变器考虑在内,工业园区治理资源未能得到充分利用,未解决光伏逆变器治理能力受自身有功出力影响给电能质量协同治理带来的难点。

由于光照具有随机性、波动性,光伏逆变器电能质量治理能力是不确定的[16],同时工业园区负荷也具有时变性,因此工业园区多电力电子设备电能质量协同治理属于含不确定性因素的优化问题。模型预测控制(model predictive control,MPC)具有滚动优化、反馈校正的特点,是解决这种不确定性问题的有效途径[17]。MPC根据当前系统状态预测系统未来的输出,实现有限时间段内的最优控制,可解决多目标多约束和含不确定性的优化问题,具有控制效果良好、鲁棒性好的优点,已广泛应用于电力系统最优控制问题中[18-25]。文献[19-20]采用MPC研究风电场中风机和SVG的功率协调控制,考虑二者功率响应时间常数不同实现动态优化。文献[21-22]提出基于MPC的海上风电场电压协调控制,考虑风机动态响应过程对各风机进行协调控制。文献[23-25]采用MPC实现包含风光可再生能源配电网的多时间尺度有功无功协调控制,通过滚动优化适应风光不确定性。光伏逆变器治理能力需要根据光伏有功出力预测数据进行确定,而有功出力预测数据与实际值存在偏差且预测偏差随时间尺度增长而增大,相比传统优化算法及智能优化算法,MPC算法可通过滚动优化更新光伏、负荷的预测数据,以及通过反馈校正功能,反馈系统实际状态,减小预测误差和外部干扰带来的影响,考虑了系统的不确定性,抗干扰能力强。

工业园区中光伏逆变器、有源电力滤波器和无源电力滤波器等多电力电子设备电能质量协同治理的核心难点是如何协调治理能力受自身有功出力影响的光伏逆变器。针对于此,本文提出了基于MPC的多电力电子设备电能质量协同治理策略。根据工业园区光伏和负荷的超短期预测结果以及系统实时状态,对未来一段时间内园区母线电压畸变率、电压偏差和功率因数进行预测,从而对各治理设备输出进行滚动优化,并反馈系统实际状态校正预测模型,减小光伏出力预测误差对电能质量协同治理的影响,实现系统电能质量最佳。

1 工业园区电能质量治理分析模型

为实现工业园区中光伏(photovoltaic,PV)逆变器、有源电力滤波器(active power filter,APF),无源电力滤波器(power filter,PF)的电能质量协同治

理，采用MPC策略对各治理设备的电流输出进行协调优化，工业园区电能质量协同治理框架如图1所示。光伏逆变器、APF、PF和变频器通过并网点（point of common coupling，PCC）与外部电网连接。其中PV、APF和PF作为电能质量治理设备，变频器作为工业园区负荷。在协调控制层，基于MPC的电能质量协同控制器每5 min根据反馈的实际值及光伏、负荷预测值给出光伏无功电流参考值I^*_{PVq}、APF无功电流参考值I^*_{APFq}、APF的h各次谐波电流参考值I^*_{APFh}；指令跟踪层根据协调控制层的参考值及采样得到的设备输出实际值和系统无功电流、谐波电流相位，经过电流环实时给出各治理设备的开关信号；在设备层，各设备输出指令电流对工业园区电能质量进行治理。

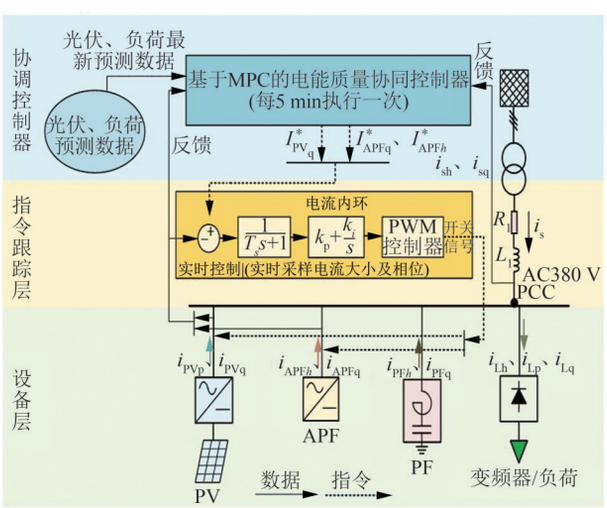


图1 工业园区电能质量协同治理框架

Fig.1 Collaborative governance framework for power quality in industrial parks

1.1 工业园区配电系统基波电流分析模型

为分析工业园区配电系统各设备间的基波电流关系，将图1所示工业园区配电系统的基波电路等效为如图2所示。由于PV、APF输出可控，变频器输出可预测，将三者等效为可控电流源，PF作为无源器件可等效为感性元件，对基波无功电流起分流作用，外部电网可等效为理想电压源。图2中：i_{L1}为流过变频器的基波电流；i_{PV1}为光伏输出的基波电流；i_{APF1}为APF补偿的基波电流；i_{PF1}为PF滤除的基波电流；i_{s1}为流过网侧的基波电流；u_{PCC1}为并网点基波电压；u_{s1}为外部电网基波电压；R_1、L_1分别为连接线路的电阻、电容，L_2、C_2分别为PF的等效电感、电容。

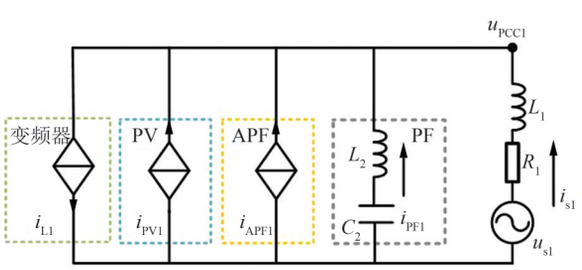


图2 工业园区配电系统基波等效电路

Fig.2 Fundamental equivalent circuit of industrial park power distribution system

由基尔霍夫电流定律可得：

$$i_{L1}-i_{APF1}-i_{PV1}-i_{PF1}-i_{s1}=0 \tag{1}$$

另外，将电流写成相量形式，有：

$$\begin{cases}\dot{I}_{s1}=\dot{I}_{sp1}+\dot{I}_{sq1}\\ \dot{I}_{L1}=\dot{I}_{Lp1}+\dot{I}_{Lq1}\\ \dot{I}_{PV1}=\dot{I}_{PVp1}+\dot{I}_{PVq1}\\ \dot{I}_{APF1}=\dot{I}_{APFq1}\\ \dot{I}_{PF1}=\dot{I}_{PFq1}\end{cases} \tag{2}$$

式中：$\dot{I}_{s1}$、$\dot{I}_{L1}$、$\dot{I}_{PV1}$、$\dot{I}_{APF1}$、$\dot{I}_{PF1}$分别为i_{s1}、i_{L1}、i_{PV1}、i_{APF1}、i_{PF1}的相量形式；$\dot{I}_{sp1}$、$\dot{I}_{sq1}$分别为$\dot{I}_{s1}$的有功、无功分量；$\dot{I}_{Lp1}$、$\dot{I}_{Lq1}$分别为$\dot{I}_{L1}$的有功、无功分量；$\dot{I}_{PVp1}$、$\dot{I}_{PVq1}$分别为$\dot{I}_{PV1}$的有功、无功分量；$\dot{I}_{APFq1}$、$\dot{I}_{PFq1}$分别为$\dot{I}_{APF1}$、$\dot{I}_{PF1}$的无功分量，APF、PF不输出有功电流。

根据式(1)、(2)，由基尔霍夫定律可得工业园区配电系统基波电流、基波电压相量关系为

$$\begin{cases}\dot{I}_{sp1}=\dot{I}_{Lp1}-\dot{I}_{PVp1}\\ \dot{I}_{sq1}=\dot{I}_{Lq1}-\dot{I}_{PVq1}-\dot{I}_{APFq1}-\dot{I}_{PFq1}\\ \dot{U}_{PCC1}=\dot{U}_{s1}-\dot{I}_{s1}(R_1+\mathrm{j}\omega_1 L_1)\\ \dot{I}_{PFq1}=\dfrac{\dot{U}_{PCC1}}{\mathrm{j}\omega_1 L_2+1/(\mathrm{j}\omega_1 C_2)}\end{cases} \tag{3}$$

式中：$\dot{U}_{PCC1}$、$\dot{U}_{s1}$分别为u_{PCC1}、u_{s1}的相量形式；ω_1为基波角频率。

由式(3)可求流过网侧基波无功电流$\dot{I}_{sq1}$：

$$\dot{I}_{sq1}=a(\dot{I}_{Lq1}-\dot{I}_{PVq1}-\dot{I}_{APFq1})+b(\dot{I}_{Lp1}-\dot{I}_{PVp1})-c \tag{4}$$

$$\begin{cases}a=1+\mathrm{j}\omega_1 L_1/[\mathrm{j}\omega_1 L_2+1/(\mathrm{j}\omega_1 C_2)-\mathrm{j}\omega_1 L_1]\\ b=\mathrm{j}\omega_1 L_1/[\mathrm{j}\omega_1 L_2+1/(\mathrm{j}\omega_1 C_2)-\mathrm{j}\omega_1 L_1]\\ c=\dot{U}_{s1}/[\mathrm{j}\omega_1 L_2+1/(\mathrm{j}\omega_1 C_2)-\mathrm{j}\omega_1 L_1]\end{cases} \tag{5}$$

由式(3)、(4)可求得并网点基波电压偏差ΔU_{PCC1}：

$$\Delta U_{PCC1}=(|\dot{U}_{s1}|-|\dot{U}_{PCC1}|)/|\dot{U}_{s1}|\times 100\%=[|\dot{U}_{s1}|-|\dot{U}_{s1}-(\dot{I}_{sp1}+\dot{I}_{sq1})(R_1+\mathrm{j}\omega_1 L_1)|]/|\dot{U}_{s1}|\times 100\% \tag{6}$$

由式(3)、(4)可求网侧功率因数η_{PF}:

$$\eta_{PF}=\left|\dot{I}_{sp}\right|\Big/\sqrt{|\dot{I}_{sp}|^2+|\dot{I}_{sq}|^2} \tag{7}$$

1.2 工业园区配电系统谐波分析模型

为分析工业园区配电系统各设备间的谐波电流关系,将图1所示工业园区配电系统的谐波电路等效如图3所示。假设外部电网不存在谐波,PV不补偿谐波电流,因此等效电路仅包含谐波源变频器及谐波治理设备APF、PF。图3中:i_{Lh}为流过变频器的h次谐波电流;i_{APFh}为APF补偿的h次谐波电流;i_{PFh}为PF滤除的h次谐波电流;i_{sh}为流过网侧的h次谐波电流;$h=2,3,4,\cdots$。

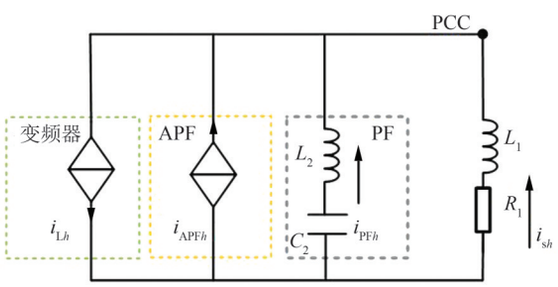


图3 工业园区配电系统谐波等效电路

Fig.3 Harmonic equivalent circuit of industrial park power distribution system

由基尔霍夫电流定律可得:

$$i_{Lh}-i_{APFh}-i_{PFh}-i_{sh}=0 \tag{8}$$

根据式(8)及欧姆定律可得:

$$\begin{cases}\dot{I}_{sh}=\dfrac{\mathrm{j}\omega_h L_2+1/(\mathrm{j}\omega_h C_2)}{R_1+\mathrm{j}\omega_h L_1+\mathrm{j}\omega_h L_2+1/(\mathrm{j}\omega_h C_2)}(\dot{I}_{Lh}-\dot{I}_{APFh})\\ \dot{I}_{PFh}=\dfrac{R_1+\mathrm{j}\omega_h L_1}{R_1+\mathrm{j}\omega_h L_1+\mathrm{j}\omega_h L_2+1/(\mathrm{j}\omega_h C_2)}(\dot{I}_{Lh}-\dot{I}_{APFh})\end{cases} \tag{9}$$

式中:$\dot{I}_{Lh}$、$\dot{I}_{APFh}$、$\dot{I}_{PFh}$、$\dot{I}_{sh}$分别为i_{Lh}、i_{APFh}、i_{PFh}、i_{sh}的相量形式;ω_h为h次谐波角频率。

由于APF在谐波控制时受控制延时与采样滤波器带宽影响较大,其实际输出谐波电流与其参考值存在如下关系[26]:

$$\dot{I}_{APFh}=\frac{1}{1+T_s s}\dot{I}^{*}_{APFh} \tag{10}$$

式中:T_s为APF响应时间常数。

将式(10)代入式(9)得考虑控制延时与采样滤波器带宽影响的$\dot{I}_{sh}$和$\dot{I}_{PFh}$:

$$\begin{cases}\dot{I}_{sh}=\dfrac{\mathrm{j}\omega_h L_2+1/(\mathrm{j}\omega_h C_2)}{R_1+\mathrm{j}\omega_h L_1+\mathrm{j}\omega_h L_2+1/(\mathrm{j}\omega_h C_2)}\cdot\\ \qquad(\dot{I}_{Lh}-\dfrac{1}{1+\mathrm{j}\omega_h T_s}\dot{I}^{*}_{APFh})\\ \dot{I}_{PFh}=\dfrac{R_1+\mathrm{j}\omega_h L_1}{R_1+\mathrm{j}\omega_h L_1+\mathrm{j}\omega_h L_2+1/(\mathrm{j}\omega_h C_2)}\cdot\\ \qquad(\dot{I}_{Lh}-\dfrac{1}{1+\mathrm{j}\omega_h T_s}\dot{I}^{*}_{APFh})\end{cases} \tag{11}$$

根据式(3)、(11)可求得并网点谐波电压总畸变率γ_{THD}:

$$\gamma_{THD}=\frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty}(|\dot{I}_{sh}(R_1+\mathrm{j}\omega_h L_1)|/\sqrt{2})^2}}{|\dot{U}_{s1}-(\dot{I}_{sp1}+\dot{I}_{sq1})(R_1+\mathrm{j}\omega_1 L_1)|/\sqrt{2}}\times 100\% \tag{12}$$

2 基于MPC的多电力电子设备电能质量协同治理策略

MPC是一种滚动的闭环最优控制算法,是从工业应用中总结、提炼出来的,擅于解决多约束条件、多目标多自由度的最优控制问题,在工业控制领域应用广泛[24-25]。其基本原理为在每一个采样时刻,根据系统当前状态基于预测模型预测系统在未来一段时间内输出,通过最小化目标函数决策这段时间的最优控制变量,并在下一采样时刻重复这一优化过程,实现滚动优化[27]。MPC由预测模型、滚动优化和反馈校正组成[18]。

为解决光伏逆变器治理能力受出力影响给电能质量协同治理带来的难题,本文采用MPC实现工业园区多电力电子设备的电能质量协同治理。时间尺度设置为ΔT,即每间隔ΔT采样一次系统状态并通过MPC算法进行优化,预测区间为T_p,$T_p=n_p\Delta T$,n_p为预测步长。模型预测控制示意图如图4

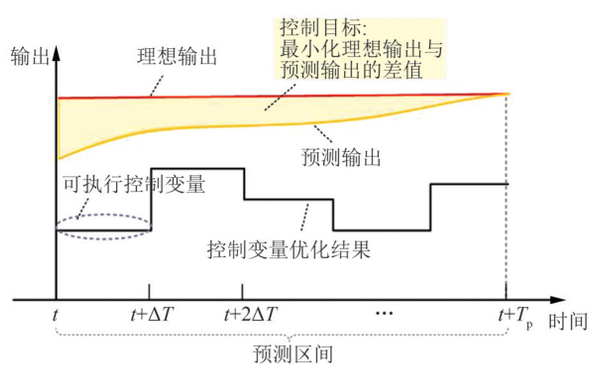


图4 模型预测控制示意图

Fig.4 Schematic diagram of the model predictive control

所示，在t时刻输入系统状态采样值及光伏、负荷在$[t,t+T_p]$时间段超短期预测数据，基于预测模型预测园区系统在$[t,t+T_p]$时段的电能质量，通过最小化预测输出与理想输出之间的差值得出$[t,t+T_p]$时段控制变量的最优解，由此优化控制考虑了系统未来一段时间内负荷、光伏的波动状况，提前对控制变量进行优化调整，具有前瞻性。但考虑到离预测时间点时间越长，光伏和负荷的预测数据误差越大，因此只取第一个控制区间$[t,t+\Delta T]$的解下发给系统执行。在下一个采样时刻$t+\Delta T$重复上述优化过程，得到$[t+\Delta T,t+2\Delta T]$时间段的控制变量，由此进行滚动优化，如图5所示。

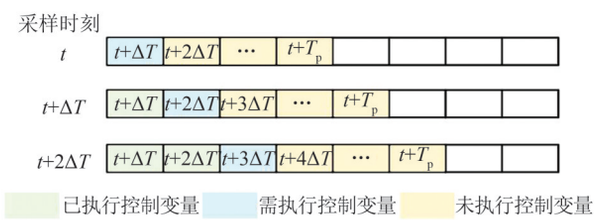


图5 滚动优化示意图

Fig.5 Schematic diagram of rolling optimization

2.1 MPC优化模型建立

2.1.1 预测模型

根据工业园区每时段电流平衡特性及上文分析的工业园区配电系统电流关系，选取k时刻电网侧h次谐波电流$\dot{I}_{sh}(k)$和电网侧无功电流$\dot{I}_{sq}(k)$构成的向量$\boldsymbol{x}(k)=\left[\dot{I}_{sh}(k)\quad \dot{I}_{sq}(k)\right]^{\mathrm{T}}$为状态变量，以$k$时刻APF输出$h$次谐波电流增量参考值$\Delta\dot{I}^{*}_{\mathrm{APF}h}(k)$、PV输出无功电流增量$\Delta\dot{I}_{\mathrm{PVq}}(k)$、APF输出无功电流增量$\Delta\dot{I}_{\mathrm{APFq}}(k)$构成的向量$\boldsymbol{u}(k)=\left[\Delta\dot{I}^{*}_{\mathrm{APF}h}(k)\quad \Delta\dot{I}_{\mathrm{PVq}}(k)\quad \Delta\dot{I}_{\mathrm{APFq}}(k)\right]$为控制变量，以$k$时刻负荷谐波电流$\Delta\dot{I}_{\mathrm{L}h}(k)$、无功电流的超短期预测增量$\Delta\dot{I}_{\mathrm{Lq}}(k)$构成的向量$\boldsymbol{r}(k)=\left[\Delta\dot{I}_{\mathrm{L}h}(k)\quad \Delta\dot{I}_{\mathrm{Lq}}(k)\right]^{\mathrm{T}}$为扰动变量，输出变量$\boldsymbol{y}(k)=\boldsymbol{x}(k)=\left[\dot{I}_{sh}(k)\quad \dot{I}_{sq}(k)\right]^{\mathrm{T}}$，由式(4)、(5)、(11)可建立在$k$时刻通过控制变量、扰动变量、状态变量初值预测$k+1$时刻状态变量的预测模型：

$$\boldsymbol{x}(k+1|k)=\begin{bmatrix}\dot{I}_{sh}(k+1|k)\\ \dot{I}_{sq}(k+1|k)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{I}_{sh}(k|k)\\ \dot{I}_{sq}(k|k)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}-\dfrac{A_h}{1+\mathrm{j}\omega_h T} & 0 & 0\\ 0 & -1 & -1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\dot{I}^{*}_{\mathrm{APF}h}(k|k)\\ \Delta\dot{I}_{\mathrm{PVq}}(k|k)\\ \Delta\dot{I}_{\mathrm{APFq}}(k|k)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}A_h & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\dot{I}_{\mathrm{L}h}(k|k)\\ \Delta\dot{I}_{\mathrm{Lq}}(k|k)\end{bmatrix} \tag{13}$$

$$\boldsymbol{y}(k+1|k)=\begin{bmatrix}\dot{I}_{sh}(k+1|k)\\ \dot{I}_{sq}(k+1|k)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}\boldsymbol{x}(k+1|k) \tag{14}$$

式中：

$$A_h=\frac{\mathrm{j}\omega_h L_2+1/(\mathrm{j}\omega_h C_2)}{R_1+\mathrm{j}\omega_h L_1+\mathrm{j}\omega_h L_2+1/(\mathrm{j}\omega_h C_2)} \tag{15}$$

由预测模型式(13)便可基于输入的当前k时刻测量的网侧谐波电流$\dot{I}_{sh}(k|k)$、网侧无功电流$\dot{I}_{sq}(k|k)$及扰动变量负荷谐波电流、无功电流相较上一时刻的增量$\Delta\dot{I}_{\mathrm{L}h}(k|k)$、$\Delta\dot{I}_{\mathrm{Lq}}(k|k)$，通过使与预测输出即网侧谐波电流$\dot{I}_{sh}(k+1|k)$、网侧无功电流$\dot{I}_{sq}(k+1|k)$有关的目标函数最小得到此刻控制变量APF输出$h$次谐波电流增量参考值、PV输出无功电流增量、APF输出无功电流增量的最优值即$\Delta\dot{I}^{*}_{\mathrm{APF}h}(k|k)$、$\Delta\dot{I}_{\mathrm{PVq}}(k|k)$、$\Delta\dot{I}_{\mathrm{APFq}}(k|k)$。且在每次滚动优化，扰动变量均由最新的超短期预测数据计算所得，使得控制更好地适应负荷的不确定性。扩写式(13)便可在k时刻预测未来n_p个时刻的系统状态：

$$\begin{aligned}
&\boldsymbol{x}(k+2|k)=\boldsymbol{x}(k+1|k)+\\
&\begin{bmatrix}-\dfrac{A_h}{1+\mathrm{j}\omega_h T} & 0 & 0\\ 0 & -1 & -1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\dot{I}^{*}_{\mathrm{APF}h}(k+1|k)\\ \Delta\dot{I}_{\mathrm{PVq}}(k+1|k)\\ \Delta\dot{I}_{\mathrm{APFq}}(k+1|k)\end{bmatrix}+\\
&\begin{bmatrix}A_h & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\dot{I}_{\mathrm{L}h}(k+1|k)\\ \Delta\dot{I}_{\mathrm{Lq}}(k+1|k)\end{bmatrix}\\
&\vdots\\
&\boldsymbol{x}(k+n_p|k)=\boldsymbol{x}(k+n_p-1|k)+\\
&\begin{bmatrix}-\dfrac{A_h}{1+\mathrm{j}\omega_h T} & 0 & 0\\ 0 & -1 & -1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\dot{I}^{*}_{\mathrm{APF}h}(k+n_p-1|k)\\ \Delta\dot{I}_{\mathrm{PVq}}(k+n_p-1|k)\\ \Delta\dot{I}_{\mathrm{APFq}}(k+n_p-1|k)\end{bmatrix}+\\
&\begin{bmatrix}A_h & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\dot{I}_{\mathrm{L}h}(k+n_p-1|k)\\ \Delta\dot{I}_{\mathrm{Lq}}(k+n_p-1|k)\end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{16}$$

2.1.2 约束条件

1) 光伏无功电流约束

光伏通过逆变器接入工业园区，可通过逆变器控制技术输出无功电流。光伏输出的有功电流和无功电流受逆变器容量约束，考虑光伏以最大功率发电，因此光伏无功电流约束为

$$|\dot{I}_{\mathrm{PVq}}|\leqslant\sqrt{I_{\mathrm{PV}}^{2}-|\dot{I}_{\mathrm{PVp}}|^{2}} \tag{17}$$

式中:I_{PV}为光伏额定电流;$\dot{I}_{PVp}$为光伏输出有功电流。由于光伏有功输出具有随机性,因此其无功电流最大值是变化的,需要在每个采样时刻根据光伏有功超短期预测数据进行更新,从而更新光伏无功容量。

2) APF输出无功电流、谐波电流约束

APF输出无功电流、谐波电流受其容量约束:

$$\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty}|\dot{I}_{APFh}|^2+|\dot{I}_{APFq}|^2}\leqslant I_{APF} \tag{18}$$

式中:I_{APF}为APF的额定电流。

2.1.3 目标函数

实现多电力电子设备协同控制的目的为改善工业园区电能质量,优化目标可为预测区间内并网点谐波电压畸变率最小、并网点电压跌落最小以及网侧功率因数最大,考虑到光伏逆变器和有源电力滤波器自身的损耗,目标函数设计为

$$\min J=J_1+J_2 \tag{19}$$

$$J_1=\sum_{k=2}^{n_p+1}\left(w_1\frac{1}{|\eta_{PF}(k)|}+w_2\Delta U_{PCC1}(k)+w_3\gamma_{THD}(k)\right) \tag{20}$$

$$J_2=\sum_{k=1}^{n_p}\left(w_4P_{loss\,PV}(k)+w_5P_{loss\,APF}(k)\right) \tag{21}$$

式中:w_1、w_2、w_3、w_4、w_5为对应目标权重系数。根据输出预测值$\dot{I}_{sh}(k)$、$\dot{I}_{sq}(k)$,并网点电压跌落预测值$\Delta U_{PCC1}(k)$可由式(3)、(4)、(6)计算得到,功率因数$\eta_{PF}(k)$可由式(3)、(4)、(7)计算得到,并网点谐波电压畸变率预测值$\gamma_{THD}(k)$可由式(3)、(4)、(12)计算得到。

光伏逆变器和有源电力滤波器损耗计算公式为

$$\begin{aligned}&P_{loss\,PV}(k)=\eta_{PV}\sqrt{3}\,U_{PV}\sqrt{|\dot{I}_{PVp}(k)|^2+|\dot{I}_{PVq}(k)|^2}\\&P_{loss\,APF}(k)=\eta_{APF}\sqrt{3}\,U_{APF}\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty}|\dot{I}_{APFh}(k)|^2+|\dot{I}_{APFq}(k)|^2}\end{aligned} \tag{22}$$

式中:$\dot{I}_{PVp}(k)$在每个采样时刻根据光伏超短期预测数据更新;$\dot{I}_{PVq}(k)$、$\dot{I}_{APFq}(k)$、$\dot{I}_{APFh}(k)$分别为k时刻光伏输出无功电流、APF输出无功电流、APF输出谐波电流;η_{PV}、η_{APF}分别为PV、APF的损耗系数;U_{PV}、U_{APF}分别为PV、APF端电压。

2.2 MPC反馈校正

优于传统优化算法与智能优化算法,模型预测控制具有反馈校正环节,可以在每一个滚动时刻更新系统实时测量状态,修正预测误差,抗干扰性能高,鲁棒性好。本文预测模型将负荷超短期预测值作为扰动变量并涉及光伏有功出力超短期预测值,由于超短期预测值与实际值存在一定的误差,或由于外界干扰,超前下发的多电力电子设备的输出参考值与实际输出不完全相等,系统实际状态与预测状态不符。

为尽可能消除偏差带来的影响,以上一时刻优化后网侧谐波电流与无功电流的实际值作为新一轮滚动优化的初始值,从而形成闭环控制,提高控制可靠性,即有:

$$\begin{cases}\dot{I}_{sh}(k+1|k+1)=\dot{I}_{sh}^{real}(k+1|k)\\\dot{I}_{sq}(k+1|k+1)=\dot{I}_{sq}^{real}(k+1|k)\end{cases} \tag{23}$$

式中:$\dot{I}_{sh}^{real}(k+1|k)$、$\dot{I}_{sq}^{real}(k+1|k)$分别为执行$k$时刻下发的控制变量指令后,在$k+1$时刻采样到的网侧谐波电流、无功电流的实际测量值;$\dot{I}_{sh}(k+1|k+1)$、$\dot{I}_{sq}(k+1|k+1)$为$k+1$时刻滚动优化的状态变量初始值。

为了使预测控制结果尽可能接近实际输出值,根据上一时刻预测与实际的偏差对模型进行校正,以提高模型预测精度,即有:

$$\Delta\boldsymbol{x}_{err}(k)=\begin{bmatrix}\dot{I}_{sh}^{real}(k+1|k)-\dot{I}_{sh}(k+1|k)\\\dot{I}_{sq}^{real}(k+1|k)-\dot{I}_{sq}(k+1|k)\end{bmatrix} \tag{24}$$

$$\begin{aligned}&\boldsymbol{x}'(k+2|k+1)=\boldsymbol{x}(k+2|k+1)+\boldsymbol{H}_{err}\Delta\boldsymbol{x}_{err}(k)=\\&\begin{bmatrix}\dot{I}_{sh}(k+2|k+1)\\\dot{I}_{sq}(k+2|k+1)\end{bmatrix}+\\&\begin{bmatrix}-\dfrac{A_h}{1+j\omega_hT}&0&0\\0&-1&-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\dot{I}^{*}_{APFh}(k+1|k+1)\\\Delta\dot{I}_{PVq}(k+1|k+1)\\\Delta\dot{I}_{APFq}(k+1|k+1)\end{bmatrix}+\\&\begin{bmatrix}A_h&0\\0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\dot{I}_{Lh}(k+1|k+1)\\\Delta\dot{I}_{Lq}(k+1|k+1)\end{bmatrix}+\boldsymbol{H}_{err}\Delta\boldsymbol{x}_{err}(k)\end{aligned} \tag{25}$$

式中:$\Delta\boldsymbol{x}_{err}(k)$为$k$时刻网侧谐波电流、无功电流MPC偏差;$\dot{I}_{sh}(k+1|k)$、$\dot{I}_{sq}(k+1|k)$为$k$时刻系统预测的网侧谐波电流、无功电流;$\boldsymbol{x}(k+2|k+1)$为$k+1$时刻基于原始预测模型预测的$k+2$时刻系统状态变量即网侧谐波电流、无功电流;$\boldsymbol{x}'(k+2|k+1)$为$k+1$时刻对$k+2$时刻系统状态的修正后预测值;$\boldsymbol{H}_{err}$为修正矩阵,是对角矩阵。

本文中控制变量为增量形式,其下发给电力电子设备的指令为k时刻设备输出实际测量值加上k时刻控制量优化结果,因此系统需要反馈APF、PV输出实际值,即:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}^{*\,\mathrm{ref}}_{\mathrm{APF}h}(k+1|k+1) \\ \dot{I}^{\mathrm{ref}}_{\mathrm{PVq}}(k+1|k+1) \\ \dot{I}^{\mathrm{ref}}_{\mathrm{APFq}}(k+1|k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}^{\mathrm{real}}_{\mathrm{APF}h}(k+1|k) \\ \dot{I}^{\mathrm{real}}_{\mathrm{PVq}}(k+1|k) \\ \dot{I}^{\mathrm{real}}_{\mathrm{APFq}}(k+1|k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\dot{I}^{*}_{\mathrm{APF}h}(k+1|k+1) \\ \Delta\dot{I}_{\mathrm{PVq}}(k+1|k+1) \\ \Delta\dot{I}_{\mathrm{APFq}}(k+1|k+1) \end{bmatrix} \tag{26}$$

式中:$\dot{I}^{*\,\mathrm{ref}}_{\mathrm{APF}h}(k+1|k+1)$、$\dot{I}^{\mathrm{ref}}_{\mathrm{PVq}}(k+1|k+1)$、$\dot{I}^{\mathrm{ref}}_{\mathrm{APFq}}(k+1|k+1)$分别为$k+1$时刻优化计算后下发给APF的谐波电流指令、PV的无功电流指令、APF的无功电流指令;$\dot{I}^{\mathrm{real}}_{\mathrm{APF}h}(k+1|k)$、$\dot{I}^{\mathrm{real}}_{\mathrm{PVq}}(k+1|k)$、$\dot{I}^{\mathrm{real}}_{\mathrm{APFq}}(k+1|k)$分别为执行$k$时刻下发的控制变量指令后在$k+1$时刻采样到的APF谐波电流、PV的无功电流、APF的无功电流实际测量值。

2.3 MPC滚动优化流程

采用模型预测控制实现多电力电子设备协同的电能质量治理,滚动优化流程如下:

1)输入由预测中心给出的光伏、负荷电流超短期预测数据;将当前时刻网侧谐波电流与无功电流的实际测量值作为每次滚动优化得初始值;测量APF实际输出谐波电流值、PV实际输出无功电流值、APF实际输出谐波电流值。

2)根据式(13)预测模型预测在预测区间内的网侧谐波电流与无功电流。

3)根据式(17)、(18)、(19)设计的约束条件和目标函数,将MPC优化问题线性化为二次规划问题,采用商业求解器求解该二次规划问题,得到预测区间内最优控制变量。

4)执行第1个控制变量,根据式(26)得到光伏无功电流指令值、APF无功电流指令值、APF谐波电流指令值。

5)每间隔ΔT更新预测中心给出的光伏、负荷电流超短期预测数据,校正预测模型并将系统状态测量值作为系统输入进行新一轮优化,直至优化周期结束。考虑到目前光伏、负荷超短期预测时间分辨率一般为5 min,将ΔT设置为5 min。

MPC滚动优化流程图如图6所示。

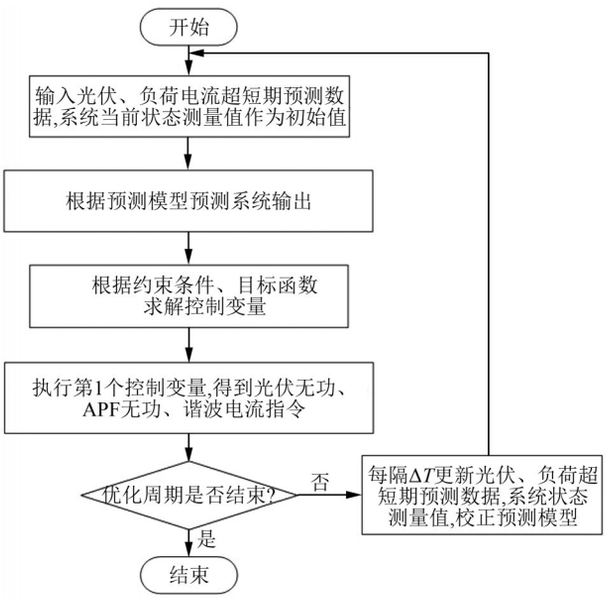


图6 MPC滚动优化流程图

Fig.6 Rolling optimization flowchart of MPC

3 仿真验证

根据图1所示工业园区配电系统设计仿真算例。PV额定电流为280 A,APF额定电流为150 A,PF电容为0.006 6 F、电感为0.030 6 H,系统线路阻抗R_1为0.000 1 Ω、线路电抗X_1为0.02 Ω,电网电压$\dot{U}_{s1}$为380 V。时间尺度ΔT设置为5 min,预测区间T_p为20 min,优化周期为24 h。

系统每5 min更新光伏、负荷超短期预测数据和系统状态进行优化求解,光伏、负荷的超短期预测数据可通过人工智能法、多元预测法等方法进行预测[28]。本文研究重点为模型预测控制在协调多电力电子设备治理电能质量上的有效性,因此,本文每5 min更新的光伏、负荷超短期预测数据通过光伏、负荷日前预测数据在每5 min叠加正态分布预测误差进行模拟。在每个采样时刻取光伏、负荷每5 min更新的超短期预测数据的最近时刻点数据组成日变化曲线如图7、8所示,由此这些日变化曲线最接近光伏、负荷实际值。负荷主要谐波电流为5、7、11、13、17、19次。

在每个采样时刻取光伏、负荷更新的超短期预测数据的最近时刻点至预测区间时刻点的值作为模型预测控制输入值进行优化计算,24 h内滚动优化288次。本文所提模型约束条件是非线性的,可

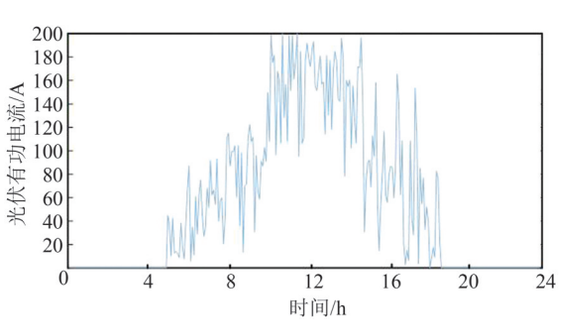
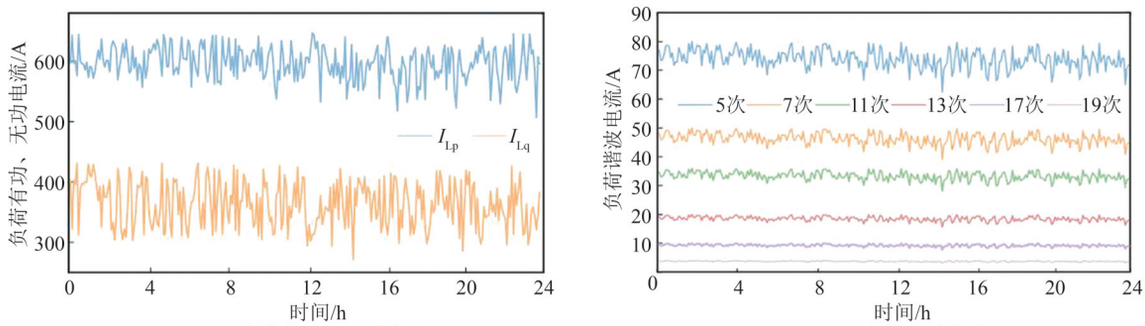


图7 光伏有功电流日变化曲线

Fig.7 Daily variation curves of photovoltaic active current



(a) 负荷有功、无功电流　　(b) 负荷谐波电流

图8　负荷电流日变化曲线

Fig.8　Daily variation curves of load current

将其线性化转化为二次规划问题,利用商业求解器求解。本次仿真在MatlabR2016b编译环境下,采用Yalmip优化工具建模,调用Cplex求解。

为体现基于MPC的多电力电子设备协同治理效果,本文将不进行电能质量治理、APF单独治理、基于全局优化的多电力电子设备协同治理、基于MPC的多电力电子设备协同治理4种模式进行了对比。其中,APF单独治理指只使用APF设备对园区电能质量进行治理,基于全局优化多电力电子设备协同治理指根据光伏、负荷日前预测值,对一天24 h的光伏、APF、PF出力进行优化。图9对比了4种治理模式下并网点谐波电压畸变率,未治理时,系统畸变率高于GB/T 14549—1993规定的谐波畸变限值5.0%[29]。相较未治理,APF单独治理和多设备协同治理由于对系统无功、谐波进行了补偿故均使得电压畸变率有所降低,低于5.0%。相比APF单独治理,多电力电子设备协同治理由于光伏设备加入电能质量治理,系统可用治理容量增大,因此谐波能较好地消除,电压畸变率更小。相比全局优化协同治理,基于MPC的协同治理通过滚动优化减小了预测误差带来的影响,谐波治理效果更好,电压畸变率小于0.7%。图10对比了4种治理模式下并网点电压偏差大小,并网点电压偏差与流过并网点电流及线路阻抗有关,相比与未治理,APF单独治理和多设备协同治理由于对系统无功电流进行了补偿,网侧电流有所减小,电压偏差也相对较小,其中采用基于MPC的多设备协调治理策略时电压偏差最小,其值小于1%。图11为4种治理模式下网侧功率因数,可以看出基于MPC的多设备协调治理策略下功率因数最高,其值在0.99附近波动,且波动范围较小。表1为APF单独治理、基于全局优化的多设备协调治理以及基于MPC的多设备协调治理3种模式下治理设备的损耗,由表1

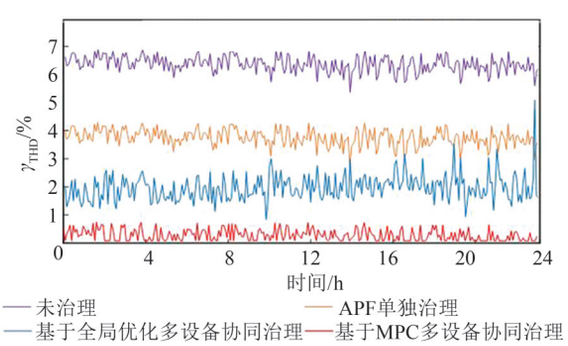


图9　并网点谐波电压畸变率

Fig.9　Harmonic voltage distortion rate at the grid-connected point

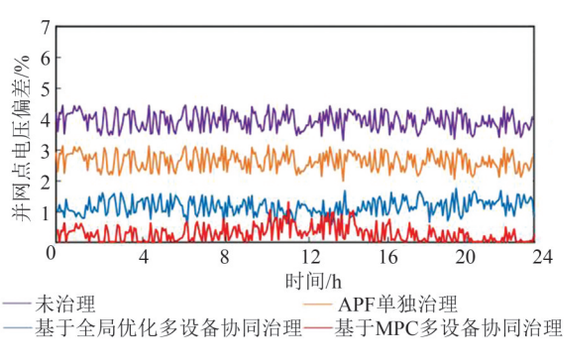


图10　并网点电压偏差

Fig.10　Voltage deviation at the point of connection

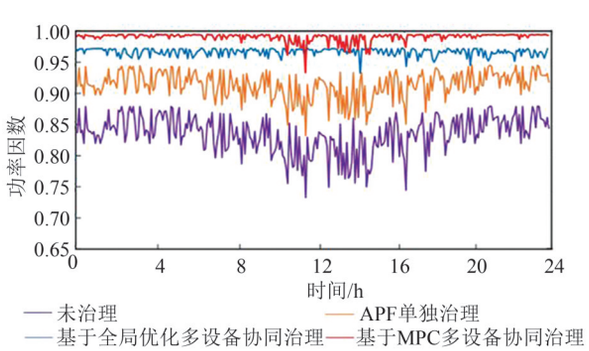


图11　网侧功率因数

Fig.11　Grid-side power factor

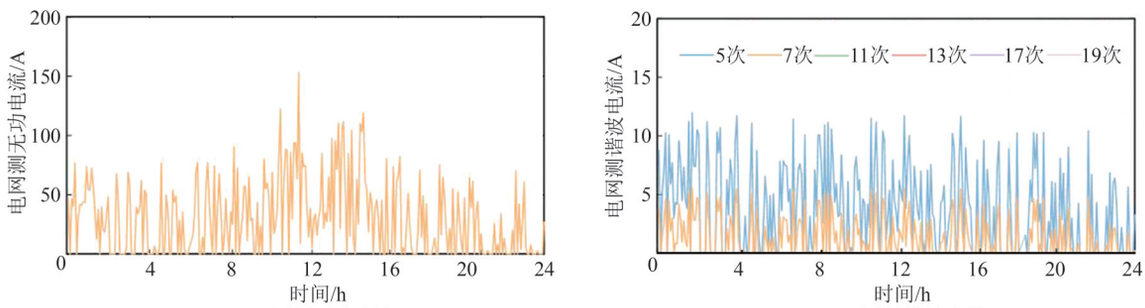
表 1　3 种治理模式下治理设备平均损耗

Table 1　Loss of devices of three governance model　kW

治理模式	APF	PV	总和
APF 单独	1.974	0	1.974
基于全局优化多设备协同	1.853	3.680	5.533
基于 MPC 多设备协同	1.802	3.479	5.281

可知在基于 MPC 的多设备协同治理策略下 APF 和光伏的平均损耗最低，治理设备效率最高。从图 9～11 及表 1 可得出采用模型预测控制实现多设备协同治理的可行性，以及相比单一设备治理和基于全局优化的多设备协同治理的优越性。

基于 MPC 的多电力电子设备协同治理模式下系统状态以及治理设备出力结果如图 12～15 所示。



(a) 网侧无功电流　(b) 网侧谐波电流

图 12　网侧电流

Fig.12　Current on the grid side

图 12(a)为网侧流过无功电流，经多设备协调治理后，在 0-10 时及 14-24 时，光伏有功出力较小、无功容量充足，网侧无功电流小于 72 A。在 10 时-14 时由于光伏有功出力较大，无功容量较小，系统网侧无功电流较大至 150 A，但相比于负荷所带来的无功电流，治理后系统网侧的无功电流已有效减小，网侧功率因数提高，从而减少了系统损耗，减小了电压偏差。图 12(b)为网侧流过的谐波电流，经过多设备治理后主要剩余 5 次、7 次谐波，5 次谐波小于 15 A，7 次谐波小于 7 A，其余高次谐波基本被消除，相比于负荷所带来的谐波含量，治理后系统谐波含量得到有效减少。图 13 给出了 MPC 下光伏的无功电流输出，从图可知在 8-12 时刻，由于光伏有功出力增大，其无功出力有所减小，在 12-16 时刻，随着光伏有功出力减小，其无功出力有所增大。图 14 为在 MPC 控制下 APF 补偿的无功电流、谐波电流，由于系统无功电流较大，APF 补偿无功电流也较大，在正午时刻左右，由于光伏输出无功减小，APF 输出无功大小保持较高状态，输出谐波电流有所减小。图 15 为流过无源电力滤波器 PF 的无功电流和谐波电流，由于经过 APF 和光伏的补偿，系统存在的无功、谐波已较小，因此 PF 分流的谐波、无功也较少，流过 PF 无功电流在 24 A 左右，各次谐波电流小于 0.2 A。

由上述仿真结果及分析可得，基于模型预测控制的多电力电子设备电能质量协同治理控制策略

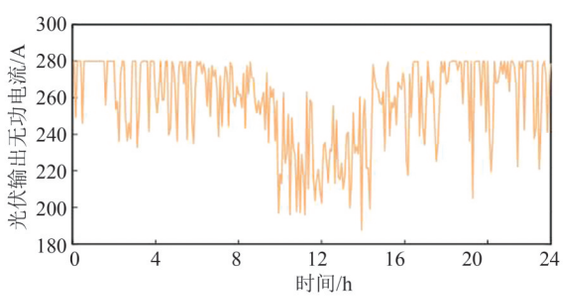


图 13　光伏输出无功电流

Fig.13　PV reactive current

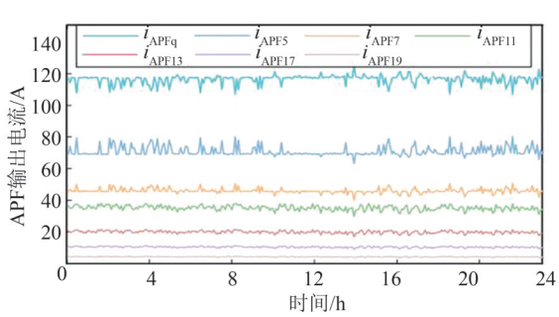
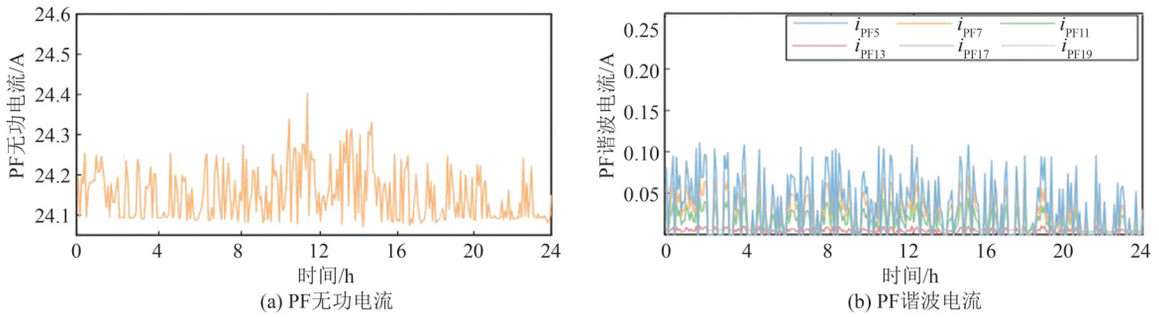


图 14　APF 输出无功电流、谐波电流

Fig.14　APF reactive current harmonic current

可以充分利用光伏无功资源，尤其在光伏有功出力较小的时刻，光伏逆变器得到了有效的利用，由于光伏也作为电能质量补偿设备，系统配备的 APF 等补偿设备容量可相应减小，从而减小治理成本，提高治理效率。基于 MPC 多设备协同治理后系统畸变率和电压偏差均有所减小，功率因数得到了提



(a) PF无功电流 (b) PF谐波电流

图15 PF电流

Fig.15 Current of PF

高,相较其他3种治理模式显著地改善了系统电能质量。

4 结论

针对工业园区所含的光伏逆变器、有源电力滤波器、无源电力滤波器等多电力电子设备电能质量协同治理,考虑到光伏和负荷的随机性和波动性,提出了基于模型预测控制的多电力电子设备电能质量协同治理策略。模型预测控制基于不同频率下电流平衡方程所建立的预测模型预测系统有限时域内的电能质量,超前协调各电力电子设备进行治理。根据光伏有功出力超短期预测值来得到光伏无功治理能力,由于预测值与实际值存在误差,模型预测控制在每个采样时刻更新光伏、负荷最新的超短期预测数据并反馈系统实际状态进行滚动优化,减小预测误差和外部干扰带来的影响,具有应对系统不确定性的能力,抗干扰性能强。仿真分析结果证明了基于模型预测控制的多电力电子设备电能质量协同治理策略的有效性和优越性。本文为工业园区多电力电子设备电能质量协同治理提供了一种切实可行的方法。

参考文献:

[1] LUO A, XU Q M, MA F J, et al. Overview of power quality analysis and control technology for the smart grid[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(1): 1-9.

[2] 施胜丹, 方存洋. 静止无功发生器在苏州工业园区高电能质量配电网示范工程中的应用[J]. 电气技术, 2019, 20(3): 102-106.
SHI Shengdan, FANG Cunyang. Static var generator applying in the demonstration project of high power quality distribution network in Suzhou industrial park [J]. Electrical Engineering, 2019, 20(3): 102-106.

[3] 孔碧光, 普碧才, 刘晓欣, 等. 泸水县硅工业园区电能质量治理研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(5): 136-141.
KONG Biguang, PU Bicai, LIU Xiaoxin, et al. Study on power quality control in Lushui County silicon industrial park[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(5): 136-141.

[4] 李文竹, 寇汉鹏, 曹阳, 等. 含高比例分布式电源配电网谐波治理策略[J]. 电工技术, 2023(2): 65-68.
LI Wenzhu, KOU Hanpeng, CAO Yang, et al. Harmonic control strategy of distribution network with high proportion of distributed power generation[J]. Electric Engineering, 2023(2): 65-68.

[5] 严静, 林锐, 张嫣. 一种基于协议容量分配的工业园区用户谐波电流限值分摊方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(9): 96-101.
YAN Jing, LIN Rui, ZHANG Yan. Allocation method of harmonic current limit for industrial park users based on protocol capacity allocation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(9): 96-101.

[6] 汪飞, 全晓庆, 任林涛. 电能质量扰动检测与识别方法研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4104-4120.
WANG Fei, QUAN Xiaoqing, REN Lintao. Review of power quality disturbance detection and identification methods[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4104-4120.

[7] 王强, 倪梦飞, 崔勇. 分布式光伏在高耗能工业园区中的应用[J]. 自动化应用, 2023, 64(24): 198-199.
WANG Qiang, NI Mengfei, CUI Yong. Application of distributed photovoltaics in high energy consumption industrial parks[J]. Automation Application, 2023, 64 (24): 198-199.

[8] TUYEN N D, FUJITA G. PV-active power filter combination supplies power to nonlinear load and compensates utility current[J]. IEEE Power and Energy Technology Systems Journal, 2015, 2(1): 32-42.

[9] 田书娅, 贾清泉, 林丽娟, 等. 面向谐波和电压综合治理的电压检测型APF与SVG协同配置[J]. 电力系统

自动化, 2021, 45(24): 149-157.
TIAN Shuya, JIA Qingquan, LIN Lijuan, et al. Collaborative allocation of voltage detection active power filter and static var generator for harmonic and voltage comprehensive mitigation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24): 149-157.

[10] 洪金琪, 徐雄, 俞永军, 等. 用户端UPQC与配电网DFACTS设备协调控制策略[J]. 浙江电力, 2021, 40(6): 28-35.
HONG Jinqi, XU Xiong, YU Yongjun, et al. A coordinated control strategy for consumer-side UPQC and DFACTS devices in distribution networks[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(6): 28-35.

[11] 高聪哲, 姜新建, 李永东. 基于级联有源滤波器与静止无功补偿器的综合补偿控制方案[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 92-98.
GAO Congzhe, JIANG Xinjian, LI Yongdong. A universal compensation control scheme based on cascade active power filter and static var compensator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 92-98.

[12] 霍群海, 韩立博, 韦统振, 等. D-FACTS装置交互影响分析及协调控制研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(S1): 329-336.
HUO Qunhai, HAN Libo, WEI Tongzhen, et al. Study on the interaction and coordinated operation of D-FACTS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 329-336.

[13] MA H Y, DU C. Multi-objective coordinated design of TCSC and SVC for improving transient stability[C]// 2015 Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC). September 18-20, 2015, Qinhuangdao, China. New York: IEEE Press, 2016: 246-250.

[14] SHEN Y, YANG F, WU Y W, et al. Multi-power quality controller coordination control based on multi-objective particle swarm optimization[C]//2019 IEEE 2nd International Conference on Electronics and Communication Engineering (ICECE). December 9-11, 2019. Xi'an, China. IEEE, 2019: 397-402.

[15] GONG C, CHENG Z Y, SOU W K, et al. Collaborative distributed optimal control of pure and hybrid active power filters in active distribution network [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(4): 2326-2337.

[16] 赵亮, 黎嘉明, 艾小猛, 等. 光伏出力随机性分量的提取和统计特性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 48-56.
ZHAO Liang, LI Jiaming, AI Xiaomeng, et al. Analysis on random component extraction and statistical characteristics of photovoltaic power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1): 48-56.

[17] 张伯明, 陈建华, 吴文传. 大规模风电接入电网的有功分层模型预测控制方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 6-14.
ZHANG Boming, CHEN Jianhua, WU Wenchuan. A hierarchical model predictive control method of active power for accommodating large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 6-14.

[18] KOURO S, CORTES P, VARGAS R, et al. Model predictive control: a simple and powerful method to control power converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6): 1826-1838.

[19] ZHAO H R, WU Q W, WANG J H, et al. Combined active and reactive power control of wind farms based on model predictive control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 1177-1187.

[20] LIU W P, LIU Y T, WU L. Model predictive control based voltage regulation strategy using wind farm as black-start source[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(2): 1122-1134.

[21] LIAO W, WU Q W, CUI H S, et al. Model predictive control based coordinated voltage control for offshore radial DC-connected wind farms[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(1): 280-289.

[22] GUO Y F, GAO H L, WU Q W, et al. Enhanced voltage control of VSC-HVDC-connected offshore wind farms based on model predictive control[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 474-487.

[23] HU R N, WANG W, WU X Z, et al. Coordinated active and reactive power control for distribution networks with high penetrations of photovoltaic systems [J]. Solar Energy, 2022, 231: 809-827.

[24] 董雷, 陈卉, 蒲天骄, 等. 基于模型预测控制的主动配电网多时间尺度动态优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4609-4617.
DONG Lei, CHEN Hui, PU Tianjiao, et al. Multi-time scale dynamic optimal dispatch in active distribution network based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4609-4617.

[25] 任佳依, 顾伟, 王勇, 等. 基于模型预测控制的主动配电网多时间尺度有功无功协调调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1397-1407.
REN Jiayi, GU Wei, WANG Yong, et al. Multi-time scale active and reactive power coordinated optimal dis-

patch in active distribution network based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1397-1407.

[26] AKAGI H, NABAE A, ATOH S. Control strategy of active power filters using multiple voltage-source PWM converters[C]//1985 Annual Meeting Industry Applications Society. October 6-11, 1985, Toronto, ON, Canada. New York: IEEE Press, 2023: 460-466.

[27] CAMACHO E F, BORDONS C. Model based predictive controllers[M]//Model Predictive Control. London: Springer London, 1999: 13-31.

[28] 彭小圣, 熊磊, 文劲宇, 等. 风电集群短期及超短期功率预测精度改进方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(23): 6315-6326.
PENG Xiaosheng, XIONG Lei, WEN Jinyu, et al. A summary of the state of the art for short-term and ultra-short-term wind power prediction of regions[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(23): 6315-6326.

[29] 中华人民共和国国家标准.GB/T 14549—1993 电能质量公共电网谐波[S].北京:中国电力出版社,1993.
State Standard of the People's Republic of China. GB/T 14549-1993 Power Quality Public Grid Harmonics [S]. Beijing: China Electric Power Publishing House, 1993.