

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190705

基于模型预测控制的光热-光伏系统多时间尺度无功优化控制策略研究

张宏¹, 董海鹰^{1,2}, 陈钊³, 黄蓉³, 丁坤³

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州交通大学新能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730070; 3. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对光热-光伏系统无功控制问题, 提出一种基于模型预测控制 MPC (Model Predictive Control) 的多时间尺度无功优化控制策略。在日前优化同步发电机与光伏逆变器无功出力的基础上, 日内采用基于 MPC 的滚动优化及反馈校正控制思路, 利用动态无功补偿设备控制母线电压。通过基于灵敏度的电压预测模型, 预测未来多个时刻电压运行状态。在此基础上, 以未来多个时刻预测电压控制偏差最小为优化目标, 建立日内滚动优化模型, 得到动态无功补偿设备的无功控制计划, 并通过电压控制偏差反馈校正, 完成日内无功电压的模型预测控制。以中国敦煌地区光热电站与光伏电站所组成联合发电系统为仿真算例, 通过与传统多时间尺度无功优化控制策略对比, 验证该控制策略在提高系统汇集母线电压和光热、光伏电站 PCC 母线电压的稳定性的可行性与有效性。

关键词: 光热-光伏系统; 模型预测控制; 多时间尺度; 无功优化控制; 母线电压

Multi-time scale reactive power optimal control strategy of a CSP-PV system based on model predictive control

ZHANG Hong¹, DONG Haiying^{1,2}, CHEN Zhao³, HUANG Rong³, DING Kun³

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. School of New Energy and Power Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
3. State Grid Gansu Electric Power Research Institute, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The Concentrating Solar Power and Photovoltaic Power (CSP-PV) system have a reactive power control problem. To address this, a multi-time scale reactive power optimal control strategy based on MPC is proposed. Based on the day-ahead optimal reactive power of a synchronous generator and photovoltaic inverter, the bus voltage is controlled by dynamic reactive power compensation equipment within the intra-day time scale. This adopts the idea of rolling optimization and correcting control based on MPC. The voltage prediction model based on sensitivity is used to predict the voltage states at multiple moments in the future. On this basis, an intra-day rolling optimization model is established with minimum deviation of the predicted voltage control at multiple future moments as the optimization objective to obtain the reactive power control plan of the dynamic reactive power compensation equipment. The model predictive control of the in-day-reactive power and voltage is completed by feedback correction of the voltage control deviation. Taking the CSP-PV combined power generation system in the DUN Huang area of China as a simulation example, by comparing with the traditional multi-time scale reactive power optimization control strategy, the feasibility and effectiveness of the proposed control strategy in improving the system bus voltage and the stability of the PCC bus voltage for concentrating solar power station and photovoltaic power station are verified.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGGSKY00FJJS1800140).

Key words: CSP-PV system; model predictive control; multi-time scale; reactive power optimal control; bus voltage

0 引言

近年来, 甘肃新能源发电产业迅速发展, 其并

网装机容量与日俱增。光伏发电已成为继风电之后新能源发电新增长点, 光伏发电装机容量现居全球第一^[1-3]。伴随光热技术发展, 光热发电在新能源发电领域逐渐受到重视。2018年12月28日甘肃敦煌首航节能100 MW塔式熔盐光热电站成功并网发

基金项目: 国家电网公司科技项目资助 (SGGSKY00FJJS1800140)

电, 这标志着我国成为世界上少数掌握百兆瓦级塔式熔盐光热电站技术的国家, 具有重要的里程碑意义。光热电站具有良好的可调度性与可控性^[4-5], 光热发电与大规模光伏发电以及交直流混联电网协调运行, 可消纳具有间歇性、随机性的可再生能源, 因此构建以光热-光伏为主的源端能源电力系统具有重要意义^[6-7]。

传统多时间尺度无功优化控制基本都以开环优化控制为主, 这种控制方法实质上忽略了系统功率预测误差等其他不确定因素所导致的电压控制偏差在相邻控制时段间的传递, 其最终将影响系统无功控制效果。而 MPC 作为一种基于预测模型的有限时域闭环滚动优化控制方法, 能够反馈校正系统的不确定性因素, 鲁棒控制性能好^[8-11]。因此, 研究基于 MPC 的多时间尺度无功优化控制策略具有重要理论价值与实践意义。

现有研究针对光热-光伏系统基于 MPC 的多时间尺度无功优化控制的研究处于起步阶段, 以发电场群或配电网为对象, 对其基于 MPC 的多时间尺度有功调度、无功控制以及有功-无功协调控制的研究取得了一定成果。文献[12]针对分布式能源接入配电网由于其预测精度随时间尺度增长而下降的问题, 提出基于 MPC 的多时间尺度主动配电网多源协调优化调度策略; 文献[13]考虑主动配电网内有功无功可调资源, 提出一种基于 MPC 的多时间尺度主动配电网有功-无功协调调度策略; 文献[14]建立了基于 MPC 的配电网多时间尺度动态无功优化模型; 文献[15]针对主动配电网的电压问题, 提出一种基于 MPC 的无功电压控制策略; 文献[16]提出一种基于 MPC 的风电场群多时间尺度无功优化控制策略。文献[14-16]为本文研究提供有益参考。上述文献主要针对发电场群或配电网进行研究, 未对多种能源组合而成的联合发电系统进行研究。

文献[17-19]提出风电-光伏互补发电系统无功电压控制策略, 但未基于 MPC 从多时间尺度角度进行无功电压控制。文献[20-21]提出一种基于 MPC 的微电网多时间尺度优化调度方法, 但主要解决有功调度问题。可以看出, 目前基于 MPC 进行光热-光伏系统多时间尺度无功优化控制策略的研究很少。

针对上述问题, 本文提出一种基于 MPC 的光热-光伏联合发电系统多时间尺度无功优化控制策略。该控制策略从日前和日内两个控制层面完成系统多时间尺度无功电压控制, 日前优化同步发电机与光伏逆变器的无功出力, 以平抑母线电压的大幅波动, 降低日内 SVC 无功调节压力; 日内采用基于 MPC 的无功电压滚动优化及反馈校正控制思路, 优

化 SVC 无功出力, 使母线电压基本稳定在参考电压附近。通过日前优化与日内滚动优化相结合的两阶段优化控制思路, 提高了系统汇集母线电压和光热、光伏电站 PCC 母线电压的稳定性。

1 基于 MPC 的光热-光伏系统多时间尺度无功优化控制结构

基于 MPC 原理^[22-23], 构建光热-光伏系统多时间尺度无功优化控制结构, 包含日前优化控制层和日内滚动优化控制层, 如图 1 所示。

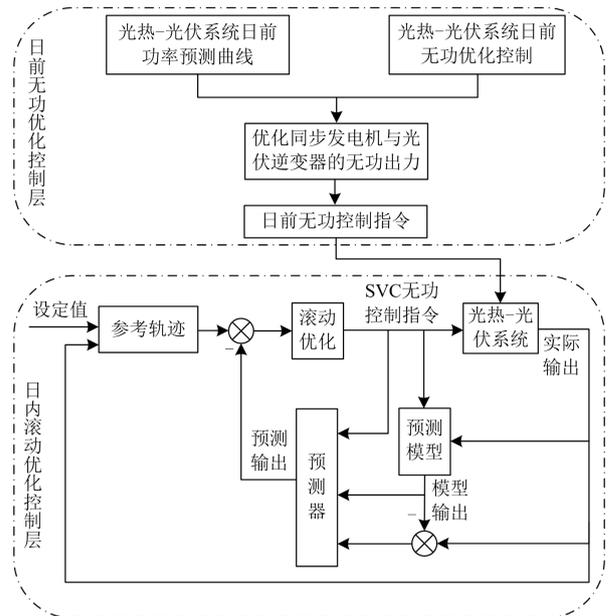


图 1 基于 MPC 的光热-光伏系统多时间尺度无功优化控制结构

Fig. 1 Multi time scale reactive power optimization control structure about CSP-PV system based on MPC

日前优化控制取 15 min 为优化时间粒度, 基于光热-光伏系统日前功率预测信息和日前无功优化控制模型, 安排同步发电机与光伏逆变器在次日 96 个时刻的无功出力计划; 日内滚动优化控制取 5 min 为优化时间粒度, 以日前无功优化控制结果为基准, 利用当前时刻母线电压运行状态和电压预测模型, 预测下一时刻母线电压运行状态, 通过求解日内无功电压滚动优化模型, 得到未来 N 个时刻 SVC 无功控制指令序列, 并执行首个控制指令, 然后根据 MPC 后的母线电压实际值以及母线电压实际控制偏差量进行反馈校正, 完成当前时刻无功电压的 MPC。在此基础上, 建立并求解下一时刻无功优化控制模型, 进行下一时刻无功电压的 MPC, 重复上述步骤, 完成日内光热-光伏系统无功电压的滚动优

化以及反馈校正控制。

2 基于 MPC 的光热-光伏系统多时间尺度无功优化控制模型

2.1 日前无功优化控制模型

基于日前光热-光伏系统功率预测信息,以系统汇集母线电压和光热、光伏电站 PCC 母线电压的控制偏差最小为优化目标,建立日前无功优化控制模型,确定次日同步发电机与光伏逆变器 96 个时刻无功出力计划。

2.1.1 目标函数

光热-光伏系统汇集母线电压需满足入网要求,即电网调度给定参考值附近。通过优化同步发电机与光伏逆变器在次日 96 个时刻无功出力,使系统汇集母线电压控制偏差平方和最小^[24]。

$$f_1 = \sum_{t=1}^{96} (U_{1,t} - U_{\text{ref}})^2 \quad (1)$$

此外,光热电站与光伏电站各自 PCC 母线需满足电压要求,其目标函数为

$$f_2 = \sum_{t=1}^{96} [(U_{\text{pv},t} - U_{\text{ref}})^2 + (U_{\text{csp},t} - U_{\text{ref}})^2] \quad (2)$$

式中: $U_{1,t}$ 表示日前 t 时刻系统汇集母线电压控制值; $U_{\text{pv},t}$ 表示日前 t 时刻光伏电站 PCC 母线电压控制值; $U_{\text{csp},t}$ 表示日前 t 时刻光热电站 PCC 母线电压控制值; U_{ref} 表示母线电压控制参考值。

光热-光伏系统日前无功电压控制目标函数定义为

$$F_1 = \min(f_1 + f_2) \quad (3)$$

2.1.2 约束条件

(1) 全网潮流方程约束

$$\begin{cases} P_{i,t} = U_{i,t} \sum_{j \in i} U_{j,t} (G_{ij} \cos \theta_{ij,t} + B_{ij} \sin \theta_{ij,t}) \\ Q_{i,t} = U_{i,t} \sum_{j \in i} U_{j,t} (G_{ij} \sin \theta_{ij,t} - B_{ij} \cos \theta_{ij,t}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$ 分别表示 t 时刻各节点注入有功、无功功率,前者由光热-光伏系统预测功率决定,为确定变量,后者为优化控制变量; $U_{i,t}$ 、 $U_{j,t}$ 表示 t 时刻各节点电压幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 表示节点 i 与节点 j 互导纳; $\theta_{ij,t}$ 表示 t 时刻节点 i 与节点 j 电压相角差。

(2) 控制变量约束

将同步发电机与光伏逆变器的无功调节能力作为控制变量约束。

$$Q_{\text{pv},\min} \leq Q_{\text{pv},t} \leq Q_{\text{pv},\max} \quad (5)$$

$$Q_{\text{G},\min} \leq Q_{\text{G},t} \leq Q_{\text{G},\max} \quad (6)$$

式中: $Q_{\text{pv},\min}$ 、 $Q_{\text{pv},\max}$ 表示光伏发电单元可调无功最小、最大值; $Q_{\text{G},\min}$ 、 $Q_{\text{G},\max}$ 表示光热发电机组可调无功最小、最大值。

(3) 母线电压约束

光热-光伏系统母线电压调节不仅调节系统汇集母线电压,还需调节光热电站与光伏电站接入系统的 PCC 母线电压。

$$\begin{cases} 0.98 \leq U_1 \leq 1.08 \\ 0.99 \leq U_{\text{pv}} \leq 1.09 \\ 0.99 \leq U_{\text{csp}} \leq 1.09 \end{cases} \quad (7)$$

2.2 基于 MPC 的日内无功优化控制模型

由于光热电站输出功率的可控性,光热-光伏系统功率预测精度足以保证系统日前、日内无功源无功出力计划的有效性。但由于传统日内无功控制采用开环控制方法,即一次性下发优化初期所确定的未来一段周期的优化结果,忽略了前序时刻系统无功源无功出力计划对后序时刻母线电压的影响,无法反馈校正不确定因素所导致的电压控制偏差,最终导致母线电压控制偏差及其波动幅度不断增大。因此日内采用 MPC 进行无功电压滚动优化及反馈校正控制。

2.2.1 母线电压预测模型

基于日内光热-光伏系统功率预测信息以及无功控制计划,通过离线潮流计算所得灵敏度矩阵计算电压预测值^[15]。本文参考文献[15],将系统灵敏度模型作为母线电压预测模型。母线电压预测方程如式(8)。

$$\begin{cases} \mathbf{U}(k+1/k) = \mathbf{U}(k) + \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{u}} \Delta \mathbf{u}(k) \\ \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{u}} \Delta \mathbf{u}(k) = \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{Q}}(k) \Delta \mathbf{Q}(k) + \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{P}}(k) \Delta \mathbf{P}(k) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{U}(k+1/k)$ 表示基于 k 时刻母线电压的 $k+1$ 时刻电压值向量; $\mathbf{U}(k)$ 表示 k 时刻母线电压值向量; $\Delta \mathbf{u}(k)$ 表示 k 时刻优化控制变量; $\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{u}}$ 表示母线电压对控制变量的灵敏度矩阵; $\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{P}}(k)$ 、 $\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{Q}}(k)$ 分别表示基于 k 时刻母线电压的节点电压幅值对节点注入有功、无功的灵敏度矩阵,具体推导过程见文献[15]。

2.2.2 无功电压滚动优化模型

基于日前光伏逆变器与同步发电机无功出力计划,日内采用 MPC 滚动优化 SVC 无功出力。

(1) 目标函数

以基于 k 时刻母线电压的未来 N 个时刻母线电压预测控制偏差最小作为滚动优化的控制目标。

$$\min J = \sum_{i=1}^N \|U(k+i/k) - U_{\text{ref}}(k+i/k)\| \quad (9)$$

式中： $U(k+i/k)$ 表示基于 k 时刻母线电压的 $k+i$ 时刻电压预测值向量； $U_{\text{ref}}(k+i/k)$ 表示基于 k 时刻母线电压的 $k+i$ 时刻电压参考值向量。

(2) 约束条件

a. 母线电压约束见式(7)

b. SVC 无功调节能力约束见式(10)

$$Q_{\text{svc,min}} \leq Q_{\text{svc}}(k) + \sum_{i=0}^{N-1} \Delta Q(k+i/k) \leq Q_{\text{svc,max}} \quad (10)$$

式中： $Q_{\text{svc,max}}$ 、 $Q_{\text{svc,min}}$ 分别表示 SVC 无功出力上、下限向量； $Q_{\text{svc}}(k)$ 表示 k 时刻 SVC 无功出力初始状态向量； $\Delta Q(k+i/k)$ 表示基于 k 时刻所预设的未来 $k+i$ 时刻 SVC 无功调整值向量。

日内无功电压滚动优化模型属于二次规划模型，通过 Matlab 工具箱中 quadprog 函数求解，得到未来 N 个时刻 SVC 无功出力调整量所构成优化控制序列。在 k 时刻仅下发执行首个控制指令。直至下个优化控制周期到来，重复上述滚动优化过程。

2.2.3 反馈校正

由于光热-光伏系统日内功率预测误差以及滚动预测模型的预测精度问题导致采用 MPC 后的母线电压值与其实际控制值存在偏差，因此需进行反馈校正。

(1) 将 k 时刻优化控制后的实际母线电压值作为 $k+1$ 时刻滚动优化的初始值，构成滚动优化，以降低系统日内功率预测误差的影响。

$$U_0(k+1/k+1) = U_{\text{real}}(k+1/k) \quad (11)$$

式中： $U_{\text{real}}(k+1/k)$ 表示 k 时刻 SVC 无功控制指令下发后， $k+1$ 时刻母线电压向量实际值； $U_0(k+1/k+1)$ 表示 $k+1$ 时刻 MPC 的母线电压向量初始值。

(2) 利用 k 时刻母线电压预测控制偏差校正 $k+1$ 时刻母线电压预测模型结果，以提高预测模型的预测精度。

$$\begin{cases} U'(k+1+i/k+1) = U(k+1+i/k+1) + \alpha U_{\text{err}}(k) \\ U_{\text{err}}(k) = U_{\text{real}}(k+1/k) - U_{\text{ref}}(k+1/k) \end{cases} \quad (12)$$

式中： $U_{\text{err}}(k)$ 表示 k 时刻母线电压 MPC 偏差； $\alpha \in (0,1)$ 为校正补偿系数； $U(k+1+i/k+1)$ 表示基于 $k+1$ 时刻母线电压的未来 $k+1+i$ 时刻的电压预测值； $U'(k+1+i/k+1)$ 表示未来 $k+1+i$ 时刻母线

电压预测值的修正结果。

2.3 优化控制流程

基于 MPC 的光热-光伏系统多时间尺度无功优化控制流程如图 2 所示。

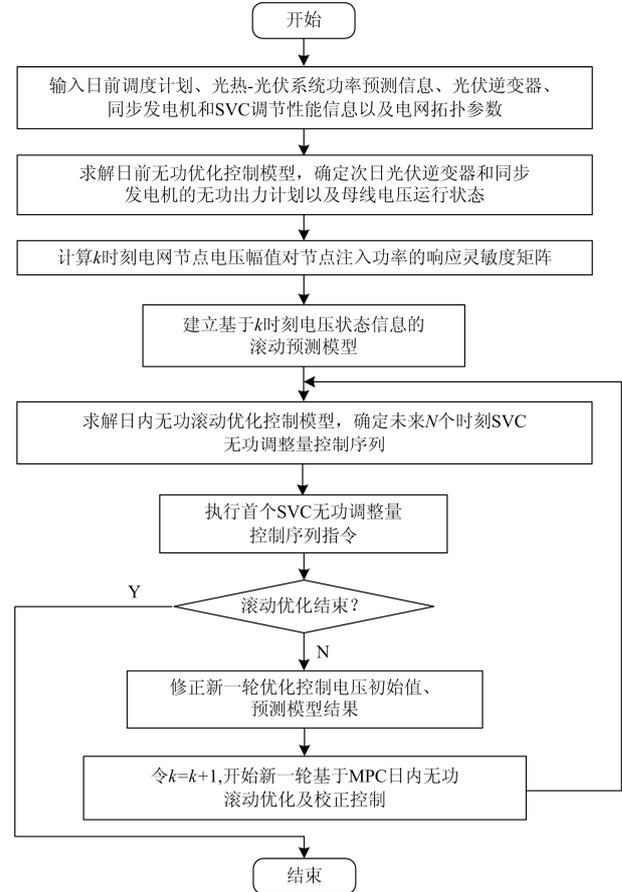


图 2 基于 MPC 的光热-光伏系统无功优化控制流程

Fig. 2 Flow of reactive power optimization control for CSP-PV hybrid system based on MPC

3 算例分析

3.1 算例系统

选取我国敦煌地区光热电站与光伏电站所组成的联合发电系统，验证本文控制策略的可行性与有效性。算例系统拓扑结构如图 3 所示。光热电站总装机容量为 100 MW，含 1 台光热发电机组；光伏电站总装机容量为 100 MW，含 4 回集电线路，每回集电线路串联 10 组 PVGU，每组 PVGU 容量为 2.5 MW。二者经各自 PCC 母线汇集到 35 kV 母线处，再通过 35 kV/220 kV 升压变压器以及输送线路接入省网系统。SVC 补偿容量为 -30~150 Mvar。系统基准容量为 100 MVA，母线电压目标指令 $U_{\text{ref}} = 1.0$ p.u.。预测步长与控制步长取为 3，调节参数取为 5，采样时间取为 0.3 s。

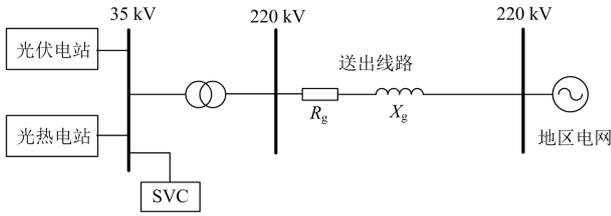


图3 仿真系统拓扑结构

Fig. 3 Topology diagram of simulation system

3.2 控制效果分析

为验证本文控制策略对光热-光伏系统的无功控制效果, 将其与传统多时间尺度无功优化控制策略进行仿真对比。

(1) 传统控制策略: 日前以系统汇集母线电压和光热、光伏电站 PCC 母线电压的控制偏差最小为控制目标, 优化同步发电机与光伏逆变器的无功出力, 日内采用开环滚动优化控制方式, 优化 SVC 288 个时刻(1×5 min)的无功出力。

(2) 本文控制策略: 日前优化控制策略与传统控制策略一致, 日内基于 MPC 理论, 采用闭环滚动优化控制方式, 以连续 3 个时刻(3×5 min)为预测控制周期, 滚动优化 SVC 无功出力并进行反馈校正控制。

光热-光伏系统日前(15 min)、日内(5 min)、实际的有功功率预测信息如图 4 所示。

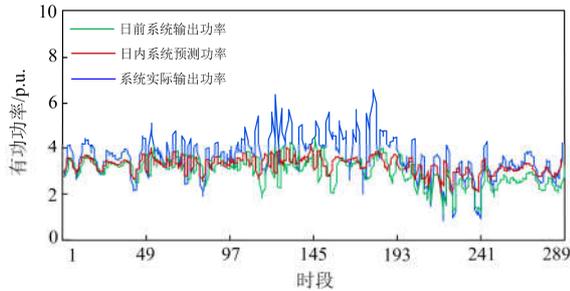


图4 光热-光伏系统输出功率预测曲线

Fig. 4 Prediction curve of output power about CSP-PV system

3.2.1 光热-光伏系统无功源无功出力分析

两种优化控制策略下光热-光伏系统同步发电机、光伏逆变器以及 SVC 无功出力计划分别如图 5、图 6 和图 7 所示, 整个时段各无功源无功出力如表 1 所示。

综合分析图 5、图 6、图 7 以及表 1 可知: 传统优化控制策略下同步发电机、光伏逆变器以及 SVC 无功出力变化剧烈, 且无功出力比较大, 系统整个时段无功源所发无功总出力不为 0, 根据无功与电压的关系, 系统汇集母线电压无法稳定在某一给定值; 相比传统优化控制策略, 基于 MPC 优化控制

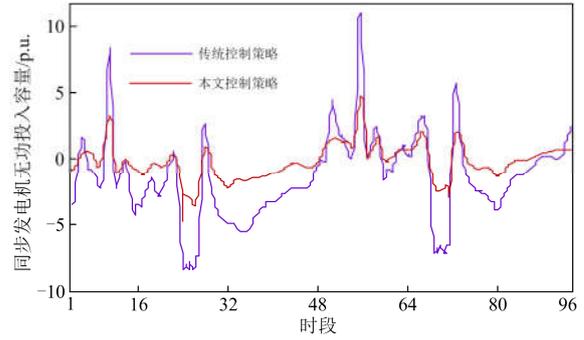


图5 同步发电机无功投入容量

Fig. 5 Input capacity of synchronous generator

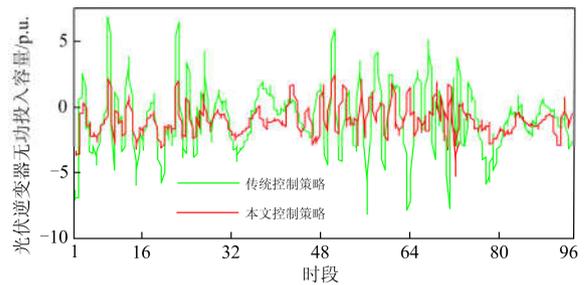


图6 光伏逆变器无功投入容量

Fig. 6 Input capacity of PV inverter

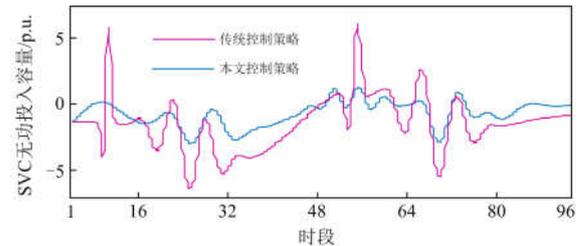


图7 SVC 无功投入容量

Fig. 7 Input capacity of SVC

表 1 系统无功源无功出力

Table 1 Reactive-power output of system reactive power supply

系统无功源	无功源总无功出力/kvar	
	传统控制策略	本文控制策略
同步发电机	1 723.6	1 557.3
光伏逆变器	-933	-823.7
SVC	-886.6	-733.6

策略下的同步发电机、光伏逆变器以及 SVC 无功出力计划与传统控制策略基本相同, 但无功出力相对减小, 且无功出力变化更为平稳, 系统整个时段无功源无功总出力为 0, 根据无功与电压的关系, 系统汇集母线电压可以稳定在某一给定值。

3.2.2 光热-光伏系统汇集母线电压分析

图 8 为两种优化控制策略下系统汇集母线电压

控制效果。通过仿真对比可知，两种优化控制策略在一定程度上均能够优化控制系统汇集母线电压水平。传统优化控制策略下系统汇集母线电压与参考电压仍存在一定偏差，且整个时段内汇集母线电压波动较大，即传统优化控制策略仅使汇集母线电压提高，并没有将其稳定在参考电压附近；基于 MPC 的多时间尺度无功控制策略经滚动优化和反馈校正控制，所计算系统各时段无功更加准确，系统汇集母线电压基本稳定在参考电压附近，其电压偏差以及整个时段内电压波动幅度都较小。

图 9 为两种优化控制策略下系统汇集母线电压指标。通过对比可知，本文控制策略下系统汇集母线电压水平以及电压波动情况都得到明显改善。

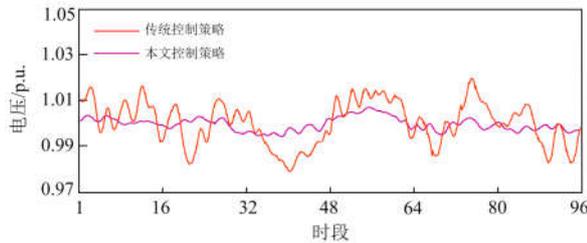


图 8 光热-光伏系统汇集母线电压控制效果

Fig. 8 Voltage control effect of collecting bus voltage in CSP-PV hybrid system

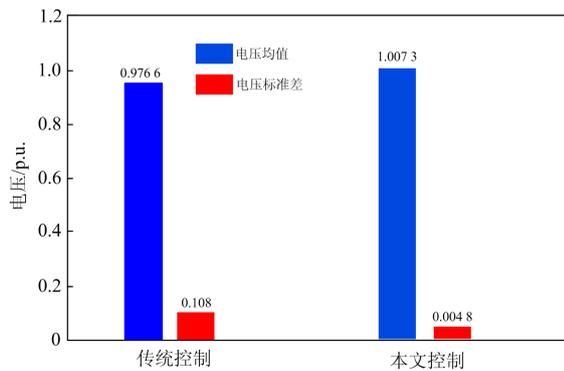


图 9 汇集母线电压指标

Fig. 9 Collecting bus voltage index

3.2.3 各光伏发电单元并网电压以及光热、光伏电站 PCC 母线电压分析

光伏电站中各集电线路参数与所串联 PVGU 数都相同，取其中一路分析。

图 10 为两种优化控制策略下各光伏发电单元并网电压。通过对比可知，基于 MPC 优化控制策略下的各 PVGU 并网电压水平得到明显改善。传统优化控制策略下第 10 组电压达 1.08 p.u.，波动幅度约为 0.08 p.u.，在系统电压发生波动时，可能引起该组保护设备动作，甚至发生连锁反应，最终导致

多台逆变器脱网。基于 MPC 优化控制策略下的各 PVGU 无功出力如表 2 所示。由表 2 可知：前 4 组 PVGU 吸收容性无功，后 6 组 PVGU 吸收感性无功，从而保证线路电压平均分布于 1.0 p.u.左右。

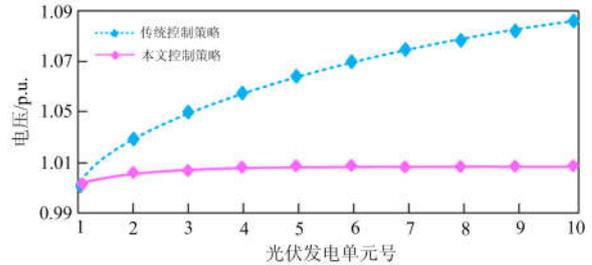


图 10 各光伏发电单元并网电压

Fig. 10 Grid-connecting voltage of each PVGU

表 2 各 PVGU 无功出力

Table 2 Reactive-power output of each PVGU

光伏发电单元编号	各 PVGU 无功出力/kvar
1	125.2
2	85.4
3	51.8
4	21
5	-6.6
6	-28.3
7	-48.6
8	-59.8
9	-68.3
10	-71.8

图 11、图 12 分别为光伏、光热电站 PCC 母线电压。通过仿真结果可以看出，基于 MPC 优化控制策略下的光热、光伏电站 PCC 母线电压都基本稳定在参考电压附近，而传统优化控制策略下光热、光伏电站 PCC 母线电压与参考电压有一定差值，波动幅度比较大，并且在部分优化时段母线电压超出其约束范围。因此本文控制策略能有效降低光热、光伏电站的 PCC 母线电压控制偏差及其波动幅度，使各自 PCC 母线电压具有较高水平。

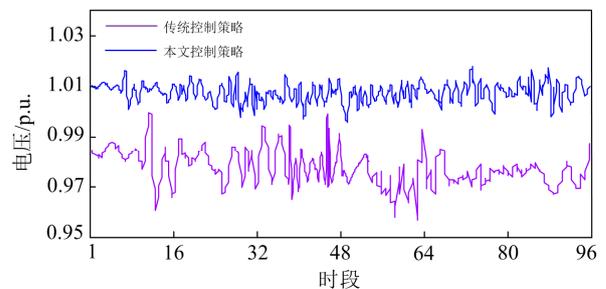


图 11 光伏电站 PCC 母线电压

Fig. 11 PCC bus voltage of PV plant

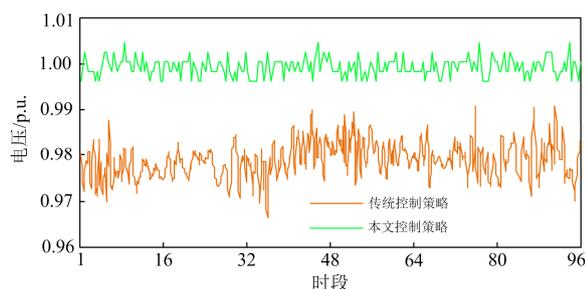


图 12 光热电站 PCC 母线电压

Fig. 12 PCC bus voltage of CSP plant

4 结论

本文针对光热-光伏系统无功控制问题,提出一种基于 MPC 的多时间尺度无功优化控制策略。在日前优化同步发电机与光伏逆变器无功出力的基础上,日内采用 MPC 进行无功电压滚动优化及反馈校正控制,优化 SVC 无功出力,以降低母线电压控制偏差及其波动幅度。算例仿真结果表明:在无功源配置相同的情形下,相比传统多时间尺度无功优化控制策略,基于 MPC 控制策略可预先响应系统可预测变化,快速跟踪母线电压波动,并反馈校正其控制偏差,从而使得系统汇集母线电压和光热、光伏电站的 PCC 母线电压基本稳定在 1.0 p.u.附近,有效提高了母线电压控制水平,保证系统安全稳定运行,同时为光热-光伏系统多时间尺度下无功优化控制提供理论指导。

参考文献

[1] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14. DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.

[2] 李姚旺, 苗世洪, 刘君瑶, 等. 考虑需求响应不确定性的光伏微电网储能系统优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 69-77. LI Yaowang, MIAO Shihong, LIU Junyao, et al. Optimal allocation of energy storage system in PV micro grid considering uncertainty of demand response[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 69-77.

[3] 张顺, 葛智平, 郭涛, 等. 大规模新能源接入后系统调峰能力与常规电源开机方式关系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 106-110. ZHANG Shun, GE Zhiping, GUO Tao, et al. Research on relationship between the capacity of systematic peak regulation and conventional power startup mode after access to large-scale new energy[J]. Power System

Protection and Control, 2016, 44(1): 106-110.

[4] SALMAN S, AI X, WU Z. Design of a P-&-O algorithm based MPPT charge controller for a stand-alone 200 W PV system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 259-266. DOI: 10.1186/s41601-018-0099-8.

[5] 杜尔顺, 张宁, 康重庆, 等. 太阳能光热发电并网运行及优化规划研究综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5765-5775. DU Ershun, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Reviews and prospects of the operation and planning optimization for grid integrated concentrating solar power[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5765-5775.

[6] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2-11. KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.

[7] 姚良忠, 朱凌志, 周明, 等. 高比例可再生能源电力系统的协同优化运行技术展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 36-43. YAO Liangzhong, ZHU Lingzhi, ZHOU Ming, et al. Prospects of coordination and optimization for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 36-43.

[8] DING T, LIU S, YUAN W, et al. A two-stage robust reactive power optimization considering uncertain wind power integration in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 301-311.

[9] ZHENG Y, LI S, TAN R. Distributed model predictive control for on-connected microgrid power management[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018, 26(3): 1028-1039.

[10] VALVERDE G, CUTSEM T V. Model predictive control of voltages in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 2152-2161.

[11] 张明锐, 宋柏慧, 王佳莹, 等. 基于模型预测控制的固态变压器控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 129-137. ZHANG Mingrui, SONG Baihui, WANG Jiaying, et al. Control strategy for solid state transformer based on model predictive control[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 129-137.

[12] 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.
- [13] 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 dispatch in active distribution network based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1397-1407.
- [14] 颜湘武, 徐韵, 李若瑾, 等. 基于模型预测控制含可再生分布式电源参与调控的配电网多时间尺度无功动态优化[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2022-2037.
- YAN Xiangwu, XU Yun, LI Ruojin, et al. Multi-time scale reactive power optimization of distribution grid based on model predictive control and including RDG regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2022-2037.
- [15] 蔡宇, 林今, 宋永华, 等. 基于模型预测控制的主动配电网电压控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 42-49.
- CAI Yu, LIN Jin, SONG Yonghua, et al. Voltage control strategy in active distribution network based on model predictive control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 42-49.
- [16] 夏鹏, 刘文颖, 朱丹丹, 等. 基于模型预测控制的多时间尺度无功电压优化控制方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 64-70.
- XIA Peng, LIU Wenyong, ZHU Dandan, et al. Multi-time scale optimal control method of reactive power and voltage based on model predictive control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 64-70.
- [17] 张伯泉, 杨宜民. 风-光互补发电系统的电压控制[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(16): 5-10.
- ZHANG Boquan, YANG Yimin. Voltage control of wind-photovoltaic hybrid power systems[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(16): 5-10.
- [18] 王建彬, 杨宜民, 甘璐. 基于改进遗传算法的风/光互补发电系统电压无功控制[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(1): 172-174.
- WANG Jianbin, YANG Yimin, GAN Lu. Reactive power and voltage control of wind/ photovoltaic hybrid power farm based on an improved genetic algorithm[J]. Control Theory & Applications, 2008, 25(1): 172-174.
- [19] 钱康, 许文超, 孙纯军, 等. 风光联合并网的无功控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(1): 28-33.
- QIAN Kang, XU Wenchao, SUN Chunjun, et al. Reactive power control strategy of grid-connection for the wind-PV hybrid system[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2014, 26(1): 28-33.
- [20] 肖斐, 艾芊. 基于模型预测控制的微电网多时间尺度需求响应资源优化调度[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 184-190.
- XIAO Fei, AI Qian. Multiple time-scale optimal dispatch of demand response resource for microgrid based on model predictive control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 184-190.
- [21] 肖浩, 裴玮, 孔力. 基于模型预测控制的微电网多时间尺度协调优化调度[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 7-14, 55.
- XIAO Hao, PEI Wei, KONG Li. Multi-time scale coordinated optimal dispatch of microgrid based on model predictive control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 7-14, 55.
- [22] 陈虹. 模型预测控制[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [23] 代高富, 符金伟, 周胜, 等. 基于模型预测控制的MMC-HVDC系统控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 10-16.
- DAI Gaofu, FU Jinwei, ZHOU Sheng, et al. Study of control strategy for MMC-HVDC system based on model predictive control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 10-16.
- [24] 蔡游明, 李征, 蔡旭. 计及控制时间窗内功率波动的风电场群无功电压分层优化控制[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1240-1250.
- CAI Youming, LI Zheng, CAI Xu. Voltage hierarchical optimal control of a wind farm cluster in account of voltage fluctuation in control time window[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1240-1250.

收稿日期: 2019-06-17; 修回日期: 2019-07-07

作者简介:

张宏(1995—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为含新能源电力系统优化控制研究; E-mail: zhanghong1802@163.com

董海鹰(1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统优化运行与智能控制, 新能源发电优化控制。E-mail: hydong@mail.lzjtu.cn

(编辑 魏小丽)