

基于模型预测控制的多时间尺度无功电压优化控制方法

夏鹏¹, 刘文颖¹, 朱丹丹¹, 汪宁渤², 华夏²

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 国网甘肃省电力公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要:针对高比例风电接入下电网电压快速、频繁波动的问题,提出了基于模型预测控制(MPC)的多时间尺度电网无功电压优化控制方法。在日前优化安排离散无功补偿设备的基础上,日内采用基于MPC的滚动优化及校正控制思路,利用连续无功补偿装置对电压进行控制。首先,建立基于灵敏度的电网电压预测模型,预测得到未来多个时刻的电网电压运行状态;然后,以未来多个时刻的电网电压预计控制偏差最小为优化目标,建立日内滚动优化控制模型,求解得到连续无功补偿装置的无功控制计划,并通过电压控制偏差校正,完成日内无功电压模型预测控制;最后,以我国“三北”地区某风电场集群为例进行仿真计算,通过与传统电压控制方法进行对比,验证所提方法在提高电压控制水平方面的可行性和有效性。

关键词:高比例风电;无功优化;电压控制;模型预测控制;滚动优化;多时间尺度

中图分类号:TM 732;TM 614

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.03.010

0 引言

随着全球风电事业的迅速发展,高比例风电接入将成为电力系统的新场景^[1]。在全新的场景下,风电出力的随机性、波动性等不确定性特征^[2-3]越发明显,使得风电接入电网的电压波动更加频繁、剧烈,给电网无功电压优化控制带来了极大的挑战。因此,研究适应风电不确定性的无功电压优化控制方法,是提高风电接入比例、促进风电功率消纳的客观需求。

目前,针对大规模风电并网带来的无功电压优化控制问题,国内外学者已经开展了广泛的研究^[4-7]。文献[4]根据日前风电功率预测信息,以风电集群的电网损耗最低、中枢节点电压偏差最小为目标,对风电集群内无功补偿设备进行集中式优化控制;文献[5]为了应对风电功率波动对电网电压的影响,将多时间尺度优化方法引入无功电压控制中,以日前、日内2个时间尺度优化控制无功补偿设备的无功出力;文献[6-7]进一步细化了无功电压优化控制的时间尺度,提出了“计划+在线+紧急”多层级无功补偿设备的协调控制模式。上述方法通过细化时间尺度,降低了风电功率随机波动对电网电压

的影响,但各时间尺度(尤其日内时间尺度)下的无功优化控制本质上都是单时间断面的开环优化控制,容易造成由风电不确定性引起的电压控制偏差在相邻控制时段间传递,影响无功电压优化控制的效果。

与单时间断面的开环优化控制方法不同,模型预测控制MPC(Model Predictive Control)作为一种基于预测模型的有限时域滚动优化闭环控制方法,能较好地应对系统不确定性的影响,具有良好的鲁棒控制性能,在电力系统中得到了推广应用^[8-13]。文献[10-11]将MPC中的滚动优化理念引入电力系统有功调度,通过利用风电及负荷的滚动预测值对风电场和常规机组出力进行在线滚动优化,能够较好地应对风电的随机波动特性。文献[12]将MPC理论与大系统分层递阶控制理论相结合,提出了基于分层模型预测的有功控制方法,并将其应用于计及风电不确定性的电力系统优化调度中,显著减小了弃风电量。上述研究通过引入MPC理论,使得计及风电不确定性的优化调度方法具有较好的鲁棒性能。但是,目前MPC理论在计及风电不确定性的无功电压优化控制领域中的应用较少,因此,这部分研究还有待深入开展。

为此,本文提出了一种基于MPC的多时间尺度无功电压优化控制方法,以降低风电不确定性对电网电压控制的影响。首先,建立日前无功电压优化控制模型,得到次日离散无功补偿装置优化控制计划;其次,建立基于灵敏度系数的电网电压预测模型,预测得到未来多时刻的电网电压运行状态,并以未来多时刻的电网电压计划控制偏差最小为优化目标,建立日内滚动优化控制模型,求解得到日内连续无功补偿装置的无功控制计划;然后,通过电压控制偏差校正,完成日内无功电压的MPC;最后,通过算

收稿日期:2018-03-05;修回日期:2018-12-20

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51377053);国家科技支撑计划项目(2015BAA01B04);国家电网公司科技项目(522727160002);国网甘肃省电力公司科技项目(SGGSKY00JNJS1700152)

Project supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China(51377053), the National Key Technology R&D Program of China(2015BAA01B04), the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(522727160002) and the Science and Technology Project of State Grid Gansu Electric Power Company(SGGSKY00JNJS1700152)

例分析验证了本文所提方法的有效性。

1 基于 MPC 的无功电压优化控制思路

针对风电功率随机波动引起的电网电压快速波动的问题,本文采取一种将日前优化与日内滚动优化相结合的两阶段无功电压优化控制思路:日前优化安排电容/电抗器组的投切计划,以平抑大幅度电压波动,减少日内静止无功补偿器(SVC)/静止无功发生器(SVG)的调节压力;日内采用基于 MPC 的无功电压滚动优化及校正控制思路,优化安排 SVC/ SVG 的无功出力,以平抑电网电压频繁、快速波动。

具体地,日内基于 MPC 的无功电压滚动优化及校正控制思路如图 1 所示。

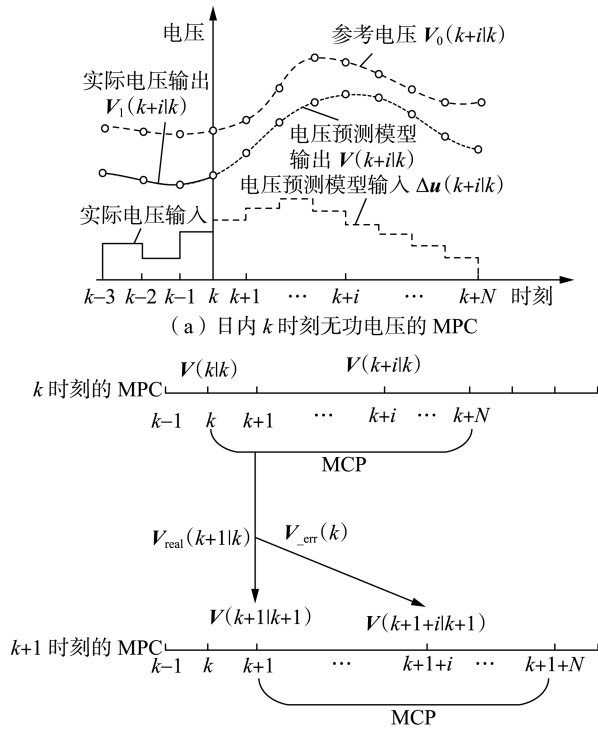


图 1 日内基于 MPC 的无功电压滚动优化及校正控制思路

Fig.1 Rolling optimization and corrective control of intraday reactive power and voltage based on MPC

如图 1(a) 所示,在 k 时刻,基于当前电网电压状态 $V(k|k)$,建立电网电压预测模型,并结合 k 时刻预设的未来 $k+i$ 时刻 SVC、SVG 无功计划值向量 $\Delta u(k+i|k)$,预测得到未来 $k+i$ 时刻的电网电压向量 $V(k+i|k)$;然后,根据电压参考值向量 $V_0(k+i|k)$,以基于 k 时刻的未来 N 个优化时刻的电网电压预测控制偏差 $J(k)$ 最小为目标,建立优化控制模型,如式(1)所示。

$$\min J(k) = \sum_{i=1}^N \| V(k+i|k) - V_0(k+i|k) \| \quad (1)$$

其中, $V_0(k+i|k)$ 为 $k+i$ 时刻电网电压参考值向量; N 为预测控制步长。

通过求解优化模型,得到 $k, k+1, \dots, k+N-1$ 时刻 SVC/ SVG 的无功出力控制指令序列,下发并执行其中的首个控制指令,从而完成 k 时刻无功电压的 MPC。

如图 1(b) 所示,在 $k+1$ 时刻,根据 k 时刻 MPC 后的电网电压实际值 $V_{\text{real}}(k+1|k)$,更新当前 $k+1$ 时刻的电网电压状态 $V(k+1|k+1)$;同时,根据 k 时刻的电网电压实际控制偏差量 $V_{\text{err}}(k)$,对基于 $k+1$ 时刻电网电压状态信息的未来 N 个时刻的电网电压预测结果 $V(k+1+i|k+1)$ 进行修正。

在此基础上,建立并求解 $k+1$ 时刻的电压优化控制模型,完成 $k+1$ 时刻无功电压的 MPC;在下一时刻到来时,重复上述步骤,实现日内无功电压的滚动优化及校正控制。

2 基于 MPC 的无功电压优化控制方法

本文提出基于 MPC 的多时间尺度无功电压优化控制方法。考虑到离散电容/电抗器组具有调节容量大、调节速度慢等特征,日前优化安排次日 96 个时刻(时间间隔为 15 min,时长为 96×15 min)电容/电抗器组的投切计划以平抑大幅度电压波动,发挥其电压支撑的基本作用;考虑到 SVC/ SVG 具有补偿容量小、响应速度快、可连续调节等特性,日内基于 MPC 思路,每 5 min 启动一次,滚动优化未来 N 个时刻(时长为 $N \times 5$ min) SVC/ SVG 的无功出力计划,并执行首个时刻的优化结果,从而平抑日内频繁、快速的小幅电压波动,发挥其辅助、精细的电压调节作用。

2.1 日前无功电压优化控制

根据日前(15 min)风电功率预测信息,以电压控制偏差最小为目标,建立日前无功电压优化控制模型,得到次日电容/电抗器组的投切计划。

(1) 目标函数。

通过优化安排离散电容/电抗器组在次日 96 个时刻的投切计划,使得各电网中枢节点的电压控制偏差平方和最小,如式(2)所示。

$$\min \Delta V_{\Sigma, \text{rq}} = \sum_{i=1}^{96} \sum_{t=1}^M (V_{i,t} - V_{i,t}^{\text{ref}})^2 \quad (2)$$

其中, $V_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的日前电压控制结果; $V_{i,t}^{\text{ref}}$ 为 t 时刻节点 i 的电压控制参考值; M 为电网中枢节点数量。

(2) 约束条件。

约束条件主要包括潮流方程约束以及离散电容/电抗器组的调节性能约束。

a. 全网潮流方程约束。

$$\begin{cases} P_{i,t} = V_{i,t} \sum_{j \in i} V_{j,t} (G_{ij} \cos \theta_{ij,t} + B_{ij} \sin \theta_{ij,t}) \\ Q_{i,t} = V_{i,t} \sum_{j \in i} V_{j,t} (G_{ij} \sin \theta_{ij,t} - B_{ij} \cos \theta_{ij,t}) \end{cases} \quad (3)$$

其中, $P_{i,t}$ 为 t 时刻注入节点 i 的有功功率, 由风电预测功率决定, 为确定性变量; $Q_{i,t}$ 为 t 时刻注入节点 i 的无功功率, 为待优化控制变量; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为电网节点导纳矩阵中元素的实部和虚部; $\theta_{ij,t}$ 为时刻 t 节点 i 、 j 的电压相角差。在日前无功电压优化控制模型中, $P_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$ 的计算公式为:

$$\begin{cases} P_{i,t} = P_{Wi,t} \\ Q_{i,t} = n_{i,t} Q_{iC} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $P_{Wi,t}$ 为 t 时刻注入节点 i 的风电有功功率; Q_{iC} 为节点 i 处每组离散电容/电抗器的额定无功容量; $n_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 处投入离散电容/电抗器的组数, 为待优化控制变量。

b. 离散电容/电抗器组的调节性能约束。

离散电容/电抗器组的投入组数及单日可调节次数限制约束, 如式(5)所示。

$$\begin{cases} n_{i,\min} \leq n_{i,t} \leq n_{i,\max} \\ \sum_{t=1}^{95} |n_{i,t+1} - n_{i,t}| \leq N_{iC,\max} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $n_{i,\max}$ 、 $n_{i,\min}$ 分别为节点 i 处离散电容/电抗器组的可投入组数上、下限; $N_{iC,\max}$ 为节点 i 处电容/电抗器组的单日最大可调节次数。

2.2 基于 MPC 的日内无功电压优化控制

目前, 实际工程中风电功率预测精度能够保障离散电容/电抗器组日前投切计划的有效性, 从而降低 SVC/SVG 的日内调节压力。然而, 传统的日内单时间断面电压优化控制方法既没有考虑前序时刻无功计划对后续时刻电网电压的影响, 也没有及时修正不确定因素引起的电压控制偏差, 难以有效应对日内电压频繁、快速波动。因此, 需要采用基于 MPC 的日内无功电压滚动优化及校正控制。

2.2.1 电网电压预测模型

在日内(5 min)风电功率预测信息和无功补偿计划已知的情况下, 通过潮流计算可获得电网电压预测值, 但潮流方程求解复杂, 在实际控制模型^[14-15]中常利用潮流方程线性化所得灵敏度矩阵来计算电压预测值, 在保证了一定精度的同时也简化了求解过程。

结合日内风电功率预测信息, 以当前 k 时刻的电网电压运行状态为初始值, 以 k 时刻 SVC/SVG 的无功计划调整量为待优化控制变量, 推导得到 $k+1$ 时刻的电网电压预测方程, 如式(6)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{V}(k+1|k) = \mathbf{V}(k|k) + \Delta \mathbf{V}(k|k) \\ \Delta \mathbf{V}(k|k) = \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{Q}}(k) \Delta \mathbf{Q}(k|k) + \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{P}}(k) \Delta \mathbf{P}(k|k) \end{cases} \quad (6)$$

继续扩写式(6), 得到基于 k 时刻电网电压状态信息的未来 N 个时刻的电网电压预测模型, 如式(7)所示。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}(k+1|k) \\ \mathbf{V}(k+2|k) \\ \vdots \\ \mathbf{V}(k+N|k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}(k|k) \\ \mathbf{V}(k|k) \\ \vdots \\ \mathbf{V}(k|k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{Q}}(k) & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{Q}}(k) & \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{Q}}(k) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{Q}}(k) & \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{Q}}(k) & \cdots & \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{Q}}(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{Q}(k|k) \\ \Delta \mathbf{Q}(k+1|k) \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{Q}(k+N-1|k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{P}}(k) & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{P}}(k) & \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{P}}(k) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{P}}(k) & \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{P}}(k) & \cdots & \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{P}}(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}(k|k) \\ \Delta \mathbf{P}(k+1|k) \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{P}(k+N-1|k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, $\Delta \mathbf{Q}(k+i|k)$ 为 k 时刻预设的未来 $k+i$ 时刻 SVC/SVG 的无功调整值向量, 为待优化控制变量; $\Delta \mathbf{P}(k+i|k)$ 为 $k+i$ 时刻风电功率日内预测值相较于日前预测值的偏差向量; $\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{P}}(k)$ 、 $\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{Q}}(k)$ 分别为基于 k 时刻电网电压运行状态信息的节点电压幅值对节点注入有功功率、无功功率的响应灵敏度矩阵, 推导过程见附录 A。

2.2.2 无功电压滚动优化控制模型

基于离散电容/电抗器组的前日投切计划, 日内采用 MPC 方法对 SVC/SVG 的无功出力计划进行滚动优化。

a. 优化目标。

每次滚动优化的控制目标为基于 k 时刻电网电压状态信息的未来 N 个时刻的电压预测控制偏差最小, 即:

$$\min J = \sum_{i=1}^N \|\mathbf{V}(k+i|k) - \mathbf{V}_0(k+i|k)\| = (\mathbf{V} - \mathbf{V}_0)^T (\mathbf{V} - \mathbf{V}_0) \quad (8)$$

其中, $\mathbf{V} = [\mathbf{V}(k+1|k), \mathbf{V}(k+2|k), \dots, \mathbf{V}(k+N|k)]^T$ 为基于 k 时刻电网电压状态信息的未来 N 个时刻的电网电压预测值向量; $\mathbf{V}_0 = [\mathbf{V}_0(k+1|k), \mathbf{V}_0(k+2|k), \dots, \mathbf{V}_0(k+N|k)]^T$ 为未来 N 个时刻的电网电压参考值向量。

b. 约束条件。

日内滚动优化的约束条件主要包括节点电压幅值上下限约束、SVC/SVG 的调节范围约束, 具体如式(9)所示。

$$\begin{cases} V_{\min} \leq V \leq V_{\max} \\ Q^{\min} \leq Q(k|k) + \sum_{i=0}^{N-1} \Delta Q(k+i|k) \leq Q^{\max} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $V_{\max}$ 、 $V_{\min}$ 分别为电网电压幅值上、下限向量; $Q^{\max}$ 、 $Q^{\min}$ 分别为 SVC/SVG 的无功出力上、下限向量; $Q(k|k)$ 为 k 时刻 SVC/SVG 无功出力初始状态量; $\Delta Q(k+i|k)$ 为 k 时刻预设的未来 $k+i$ 时刻 SVC/SVG 的无功调整值向量。

由式(8)、(9)可知, 本文所提无功电压滚动优化控制模型为典型的二次规划模型, 可以采用对偶单纯形法^[16]进行求解, 得到由未来 N 个时刻 SVC/SVG 的无功计划调整量所构成的优化控制指令集合 $\{\Delta Q(k|k), \Delta Q(k+1|k), \dots, \Delta Q(k+N-1|k)\}$, 在时刻 k 仅下发执行首个控制指令 $\Delta Q(k|k)$ 。等待下一个优化控制周期到来时, 重复上述优化过程。

2.2.3 无功电压滚动优化及校正控制

在进行下一轮滚动优化之前, 由于日内风电功率存在预测误差, 且电网电压预测方程也为近似方程(见式(6)), 这使得基于 MPC 的电网电压预测控制结果与实际控制后电网电压值存在偏差, 因此, 需要引入校正控制环节。

一方面, 本文采用上一轮优化控制后的电网电压实际值作为新一轮滚动优化控制的初始值, 构成滚动优化, 以降低超短期风电功率预测误差的影响, 具体如式(10)所示。

$$V(k+1|k+1) = V_{\text{real}}(k+1|k) \quad (10)$$

其中, $V_{\text{real}}(k+1|k)$ 为执行 k 时刻 SVC/SVG 无功调节指令后, 实际量测系统采集到的 $k+1$ 时刻实际电网电压向量; $V(k+1|k+1)$ 为 $k+1$ 时刻 MPC 的电网电压初始值向量。

另一方面, 本文根据上一轮电网电压预测控制偏差对新一轮电网电压预测模型结果进行修正, 从而提高电网电压预测模型的预测精度, 具体如式(11)所示。

$$\begin{cases} V'(k+1+i|k+1) = V(k+1+i|k+1) + \alpha V_{\text{err}}(k) \\ V_{\text{err}}(k) = V_{\text{real}}(k+1|k) - V_0(k+1|k) \end{cases} \quad (11)$$

其中, $V_{\text{err}}(k)$ 为 k 时刻电网电压 MPC 偏差; α 为校正补偿系数, 其取值范围为 $[0, 1]$; $V(k+1+i|k+1)$ 为基于 $k+1$ 时刻电网电压状态信息的未来 $k+1+i$ 时刻的电压预测结果; $V'(k+1+i|k+1)$ 为未来 $k+1+i$ 时刻电压预测结果的修正量。

最后, 分别将式(10)、(11)代入式(8)、(9), 构建日内 $k+1$ 时刻的无功电压滚动优化控制模型, 从而完成日内无功电压滚动优化和校正控制。另外, 通过引入校正环节, 也使日内无功电压优化控制具有更好的稳定性和鲁棒性。

2.3 方法流程

基于 MPC 的无功电压优化流程如图 2 所示。

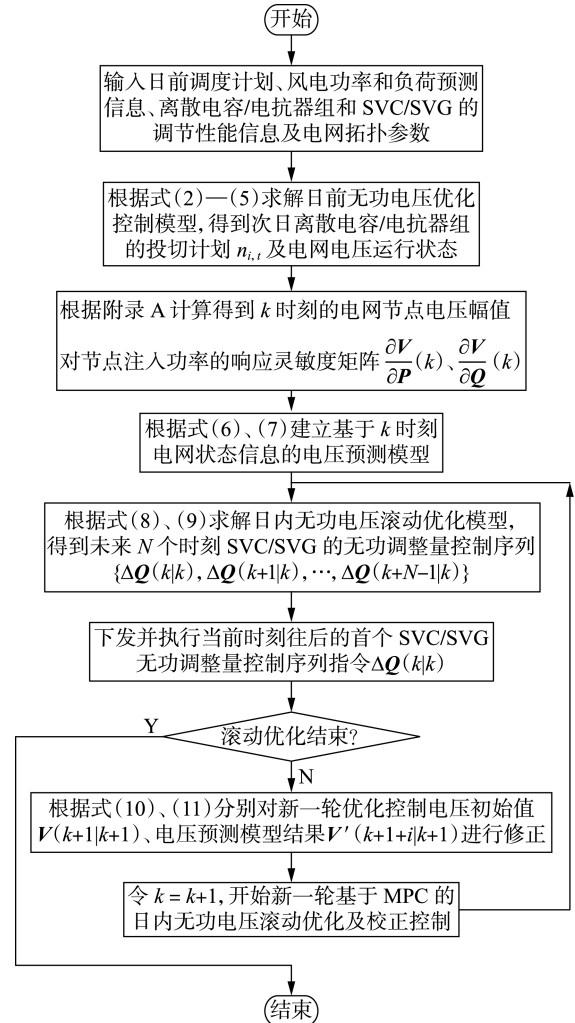


图 2 基于 MPC 的无功电压优化控制方法流程图

Fig.2 Flowchart of reactive power and voltage optimal control method based on MPC

3 算例分析

3.1 算例描述

本文以我国“三北”地区某实际风电场集群为例进行仿真计算, 算例系统结构如图 3 所示。该风电集群的总装机容量为 1 150 MW, 7 座风电场呈辐射状汇集到 3 座变电站后, 再集中接入大电网。以该 3 座变电站为汇集站, 将风电场群划分为 3 个汇集区域, 各区域内风电机组的装机容量和无功补偿设备情况如表 1 所示。另外, 为了验证本文所提方法能够有效地应对风电不确定性引起的电网电压波动问题, 附录 B 中图 B1 分别给出了 A、B 和 C 这 3 个区域的风电日前 (15 min)、日内 (5 min) 有功功率预测信息。

3.2 方法有效性分析

为了验证本文所提方法的有效性, 另取 2 种无功电压优化控制方法求解本文算例, 并对电压控制

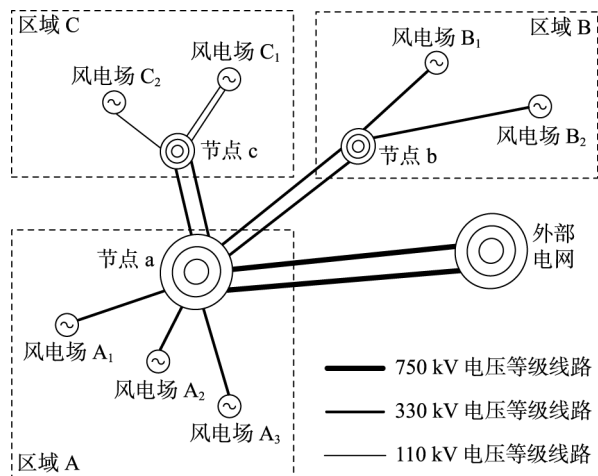


图 3 风电集群系统结构示意图

Fig.3 Structure diagram of a wind power cluster system

表 1 风电机组装机容量和无功补偿装置参数

Table 1 Parameters of installed capacity of wind power generators and reactive power compensation devices

汇集 区域	风电机组 容量/MW	离散无功补偿装置		连续无功补偿装置	
		组数	总容量/Mvar	数量	总容量/Mvar
A	600	8	-250~150	6	-128~48
B	350	6	-120~60	2	-46~30
C	200	6	-80~40	2	-28~20

注：无功补偿装置总容量的数值为正表示感性无功、为负表示容性无功。

效果及无功设备投入情况进行比较分析。

方法 1: 单时间尺度优化控制。以中枢点电压偏差最小为目标, 采用集中控制方式对风电集群内的所有无功补偿设备进行优化控制, 具体可参考文献[4]。

方法 2: 传统多时间尺度优化控制。日前以中枢点电压偏差最小为目标, 统一优化离散电容/电抗器组的投切计划(96×15 min), 日内采用开环滚动优化方式, 对 SVC/SVG 日内 288 个时刻(1×5 min)的无功出力进行逐个优化, 具体可参考文献[5]。

方法 3: 基于 MPC 的多时间尺度优化控制。日前控制同方法 2; 日内采用滚动优化方式, 以连续 3 个时刻(3×5 min)为预测控制周期, 对 SVC/SVG 的日内无功出力进行滚动优化及校正控制。

经过上述 3 种优化方法控制后得到的风电集群内电容/电抗器组、SVC/SVG 的调节计划分别如图 4 和图 5 所示。

由图 4、5 可知: 方法 1 中离散电容/电抗器组投切频繁、SVC/SVG 的无功出力变化剧烈; 相比于方法 1, 方法 2 和方法 3 中电容/电抗器组的投切计划相同, 且投切次数显著减少; 相比于方法 2, 方法 3 中 SVC/SVG 的最大感性、容性无功出力均较低, 且无功出力变化更为平稳。

执行上述无功调节计划后, 中枢节点 a、b 和 c 的电压控制效果分别如图 6—8 所示(图中电压为标

么值)。

由图 6—8 可知: 中枢节点 a、b、c 的节点电压总体上表现出相似的波动趋势, 均在时段 35—45 期间出现较大的电压跌落, 这主要是由该时段下的风电出力大发所导致的, 详见附录 B 中图 B1; 另外, 针对图 6—8 中风电功率随机波动引起的电压波动问题,

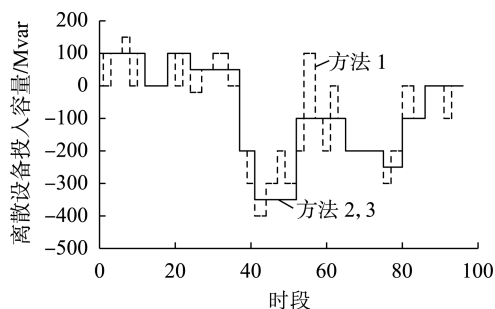


图 4 风电集群内离散电容/电抗器组的投入容量

Fig.4 Input capacity of discrete capacitor/reactor groups in wind power cluster system

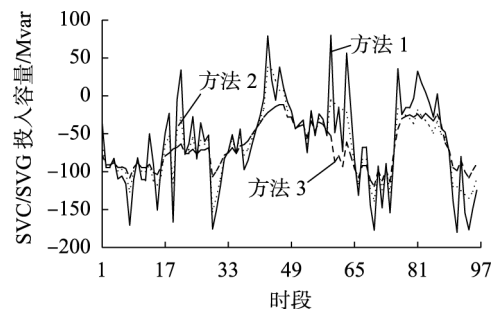


图 5 风电集群内 SVC/SVG 的投入容量

Fig.5 Input capacity of SVC/SVG in wind power cluster system

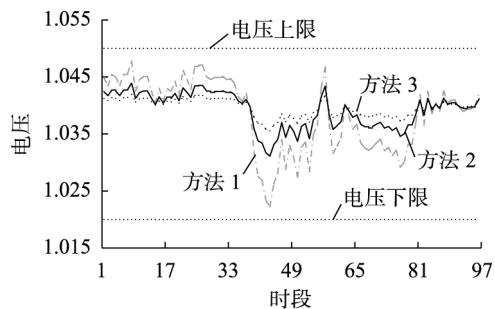


图 6 中枢节点 a 的电压控制效果

Fig.6 Voltage control effect of hub node a

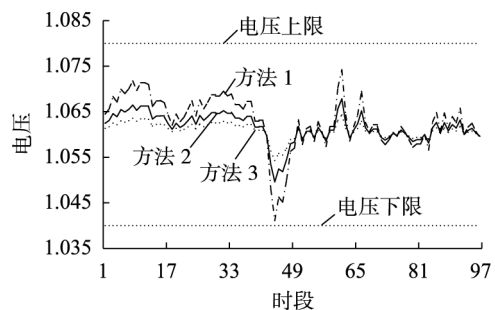


图 7 中枢节点 b 的电压控制效果

Fig.7 Voltage control effect of hub node b

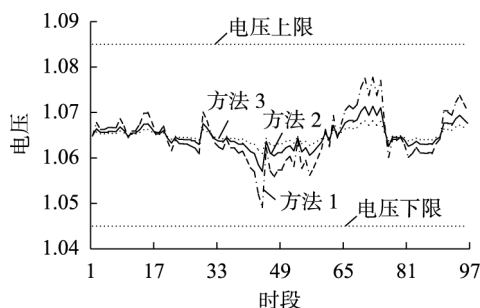


图8 中枢节点c的电压控制效果

Fig.8 Voltage control effect of hub node c

虽然算例中采用的3种方法都能将中枢节点a、b、c的电压控制在电压指令允许范围内,但是,相较于方法1、2,采用方法3后中枢节点a、b、c的电压波动幅度最小,控制效果最好。上述结果说明了本文所提方法能有效降低风电集群的电压波动幅度。

最后,对以上3种方法的电压控制效果和无功补偿设备动作情况进行统计分析,如表2所示(表中最大电压偏差为标幺值)。

表2 3种方法的优化结果

Table 2 Optimal results of three methods

控制方法	最大电压偏差			离散设备动作次数	最大连续无功需求容量/Mvar
	节点a	节点b	节点c		
方法1	0.025 6	0.033 1	0.028 6	306	[-180,80]
方法2	0.012 8	0.018 2	0.014 3	93	[-153,38]
方法3	0.006 3	0.010 0	0.007 1	93	[-119,0]

注:最大连续无功需求容量的数值为正表示感性无功、为负表示容性无功。

分析表2可知:①相比于方法1,方法2和方法3的中枢节点平均电压偏差分别降低了48.11%和73.20%,离散无功补偿设备的动作次数均降低了69.61%,SVC/SVG最大调节容量需求分别降低了26.54%和54.23%,这是因为相较于方法1的单时间尺度优化控制方式,方法2、3采用多时间尺度控制方式,能够更好地应对风电不确定性对电压的影响;②在离散电容/电抗器组投切计划相同的情况下,相比于方法2,方法3中SVC/SVG的最大调节容量需求降低了37.7%,此外中枢节点最大电压偏差也降低了48.3%,这是因为电容/电抗器组承担了基础无功支撑后,日内采用MPC预测未来多时刻的电网电压状态,协调SVC/SVG无功出力,提前响应风电不确定性带来的电网电压波动,从而取得了良好的无功电压优化控制效果。上述结果证明了本文所提基于MPC的多时间尺度无功电压优化控制方法的有效性。

4 结论

本文针对高比例风电接入电网引起的无功电压控制问题,提出了一种基于MPC的无功电压滚动优化及校正控制方法。在日前优化安排离散电容/电

抗器组投切计划的基础上,日内采用基于MPC的无功电压滚动优化及校正控制思路,对SVC/SVG进行优化控制,以降低电网电压快速、频繁波动。算例结果表明:本文所提方法能够提前响应系统可预测变化,及时追踪电网电压波动,有效提高电压控制水平。需说明的是,本文是在电网无功补偿能力充裕的前提下开展无功电压优化控制研究,下一步的研究工作将针对因风电接入比例高、功率预测误差大等因素造成的电网无功补偿能力不足的情形,进行相应的无功电压优化控制研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 鲁宗相,李海波,乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):9-20.
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 9-20.
- [2] 钱臻,刘建坤,陈静,等. 计及风电不确定性的含UPFC电力系统的两阶段最优潮流[J]. 电力自动化设备,2017,37(3):80-86.
QIAN Zhen, LIU Jiankun, CHEN Jing, et al. Two-stage OPF considering wind-power uncertainty for power system with UPFC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 80-86.
- [3] 薛禹胜,雷兴,薛峰,等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5029-5040.
XUE Yusheng, LEI Xing, XUE Feng, et al. A review on impacts of wind power uncertainties on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5029-5040.
- [4] 陈惠粉,乔颖,鲁宗相,等. 风电场群的无功电压协调控制策略[J]. 电力系统自动化,2010,34(18):78-83.
CHEN Huifen, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. Study on reactive power and voltage coordinated control strategy of wind farm group[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 78-83.
- [5] 刘文颖,郭鹏,但扬清,等. 含大规模风电接入电网的双时间尺度无功协调控制[J]. 可再生能源,2016,34(12):1811-1818.
LIU Wenying, GUO Peng, DAN Yangqing, et al. Double-time scale reactive power control with large-scale wind power integrated into grid[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(12): 1811-1818.
- [6] 杨硕,王伟胜,刘纯,等. 计及风电功率波动影响的风电场集群无功电压协调控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(28):4761-4769.
YANG Shuo, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Coordinative strategy for reactive power and voltage control of wind farms cluster considering wind power fluctuation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4761-4769.
- [7] 陈惠粉,乔颖,闵勇,等. 风电场动态无功补偿协调控制策略[J]. 电网技术,2013,37(1):248-254.
CHEN Huifen, QIAO Ying, MIN Yong, et al. Study on coordinated control strategy of dynamic and static reactive compensation in wind farm[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 248-254.
- [8] PAPPALA V S, NAKAWIRO W, ERLICH I. Predictive optimal control of wind farm reactive sources[C]//2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. New Orleans, LA, USA: IEEE, 2010:1-7.

- [9] 杨兴武,冀红超,甘伟. 基于模型预测控制的并网逆变器开关损耗优化方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(8):84-89.
YANG Xingwu,JI Hongchao,GAN Wei. Switching loss optimization based on model predictive control for grid-connected inverter[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(8):84-89.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 张忠,王建学. 采用模型预测控制的微电网有功无功联合实时调度方法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(24):6743-6750,6928.
ZHANG Zhong,WANG Jianxue. An active and reactive power joint real-time dispatch approach for microgrid using model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(24):6743-6750,6928.
- [14] 明杰,向红吉,戴朝华,等. 多风电场接入的灵敏度场景静态无功/电压评估[J]. 电力自动化设备,2017,37(12):102-108,115.
MING Jie,XIANG Hongji,DAI Chaohua,et al. Static reactive power/voltage assessment of sensitivity scenarios with multiple wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(12):102-108,115.
- [15] 徐岩,郅静,樊世通. 基于功率灵敏度和经济补偿最小化的线路过负荷紧急控制方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):118-123.
XU Yan,ZHI Jing,FAN Shitong. Line overload emergency control based on power sensitivity and minimized economic compensation[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(1):118-123.
- [16] 方润生,任云霞,王世英. 用对偶单纯形算法解装卸工问题[J]. 山西大学学报(自然科学版),2010,33(4):519-524.
FANG Runsheng,REN Yunxia,WANG Shiyong. Solving the loader problem by dual simplex[J]. Journal of Shanxi University(Natural Science Edition),2010,33(4):519-524.

作者简介:



夏 鹏

夏 鹏(1992—),男,湖南衡阳人,博士研究生,研究方向为新能源电力系统稳定与控制(E-mail:xiapeng23@163.com);

刘文颖(1955—),女,北京人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统分析与控制、新能源电力系统特性与多能互补等(E-mail:liuwenyingls@sina.com)。

Multi-time scale optimal control method of reactive power and voltage based on model predictive control

XIA Peng¹, LIU Wenying¹, ZHU Dandan¹, WANG Ningbo², HUA Xia²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Aiming at the problem of rapid and frequent fluctuation of grid voltage under high proportion wind power interconnection, a multi-time scale optimal control method of reactive power and voltage based on MPC (Model Predictive Control) is proposed. Based on the day-ahead optimal arrangement of discrete reactive power compensation equipment, the voltage is controlled by continuous reactive power compensation equipment within the intra-day time scale, which adopts the idea of rolling optimization and correcting control based on MPC. Firstly, the grid voltage forecasting model based on sensitivity is established to forecast the voltage states at multiple future moments. Then, the intra-day rolling optimization model is built with the minimum expected voltage control deviation at multiple future moments as its optimization objective, based on which, the reactive power control planning of continuous reactive power compensation equipment is obtained. The intra-day MPC of reactive power and voltage is realized by correcting the voltage control deviation. Finally, a wind power cluster system in “three northern” regions of China is taken as the example, whose simulative results verify the feasibility and effectiveness of the proposed method in improving the voltage control level by comparing with the traditional voltage control method.

Key words: high proportion wind power; reactive power optimization; voltage control; model predictive control; rolling optimization; multi-time scale

附录 A

根据 k 时刻的电网状态，采用牛顿-拉夫逊法进行潮流计算，对潮流方程进行线性化处理，得到：

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} H & N \\ K & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ V(k) \cdot \Delta V \end{bmatrix} \quad (A1)$$

式 (A1) 中的雅可比矩阵为：

$$J = \begin{bmatrix} H & N \\ K & L \end{bmatrix} \quad (A2)$$

在式 (A1) 的等号左、右两边同时乘以雅可比矩阵的逆矩阵，可得：

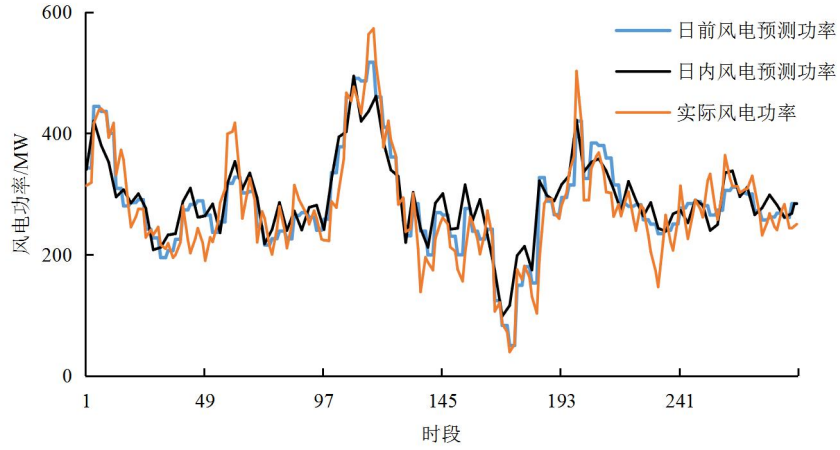
$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ V(k)^{-1} \cdot \Delta V \end{bmatrix} = -J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (A3)$$

根据式 (A3) 可以推导得到基于 k 时刻电网状态信息下的灵敏度矩阵 $\frac{\partial V}{\partial P}(k)$ 、 $\frac{\partial V}{\partial Q}(k)$ 为：

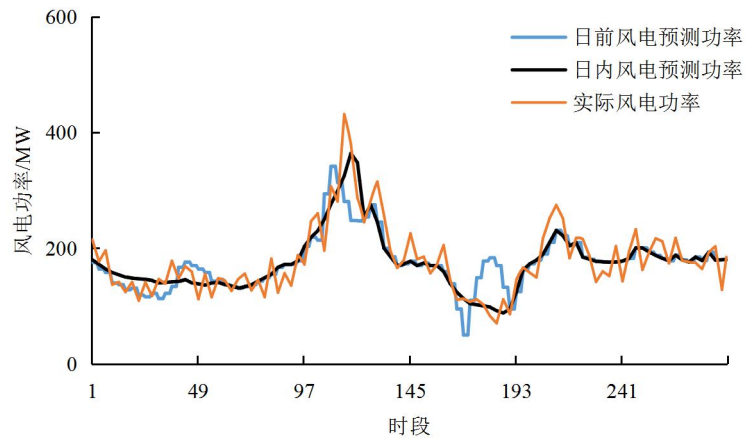
$$\begin{cases} \frac{\partial V}{\partial P}(k) = V(k) \times C \\ \frac{\partial V}{\partial Q}(k) = V(k) \times D \end{cases} \quad (A4)$$

其中， $V(k)$ 为日前离散无功补偿装置按计划投切后， k 时刻的电网电压运行状态矩阵；参数矩阵 C 、 D 根据雅可比矩阵的逆矩阵得到，由 k 时刻的电网运行状态和电网结构参数共同决定。

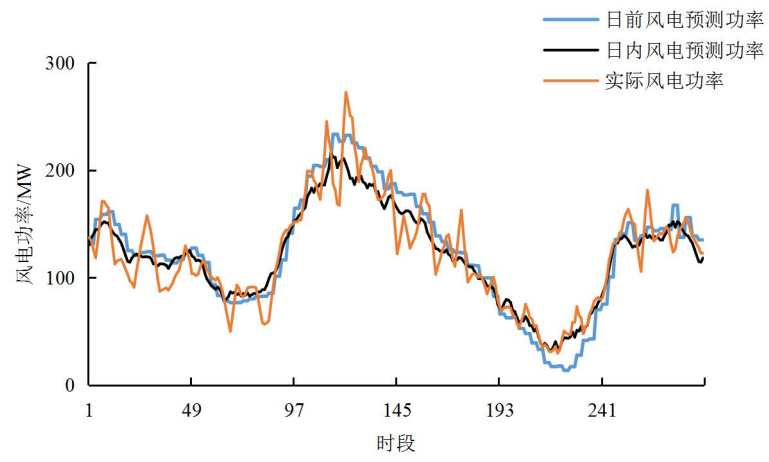
附录 B



(a) 区域 A



(b) 区域 B



(c) 区域 C

图 B1 3 个区域的风电功率预测结果

Fig.B1 Forecasting results of wind power in three areas