

# 基于模型预测控制的全功率变速抽水蓄能与SVG功率协调控制

潘鹏宇<sup>1,2</sup>, 丁理杰<sup>1,2</sup>, 王珍<sup>3</sup>, 史华勃<sup>1,2</sup>, 陈刚<sup>1,2</sup>, 张远志<sup>3</sup>, 查晓明<sup>3</sup>, 孙建军<sup>3</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 电力物联网四川省重点实验室, 四川 成都 610041; 3. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:**全功率变速抽水蓄能机组(FSC-VSPSU)通过背靠背变流器接入电网,具有功率快速可调、有功无功独立解耦的优点,在近年来得到了广泛关注。由于新能源场站具有波动性,通常配置静止无功发生器(SVG)来维持系统电压稳定。针对SVG易出现容量不足的状况,研究FSC-VSPSU与SVG功率协调控制。分析了FSC-VSPSU与SVG无功调节特性,提出了基于模型预测控制的功率协调控制策略。采用模型预测控制协调响应时间不同的FSC-VSPSU与SVG,通过电压灵敏度计算无功和电压的关系,建立以并网点电压、FSC-VSPSU电压偏差最小以及SVG无功储备最大为目标的模型预测控制(MPC)问题数学模型,求解得到FSC-VSPSU与SVG功率参考值。通过仿真验证了所提模型预测控制的可行性以及其相较于下垂控制的优越性。

**关键词:**全功率变速抽水蓄能机组; SVG; 模型预测控制; 功率协调

中图分类号: TM 46 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2024)05-0001-07

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240501

## Coordinated Power Control of Variable Speed Pumped Storage Unit with Full-size Converter and SVG Based on Model Predictive Control

PAN Pengyu<sup>1,2</sup>, DING Lijie<sup>1,2</sup>, WANG Zhen<sup>3</sup>, SHI Huabo<sup>1,2</sup>, CHEN Gang<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Yuanzhi<sup>3</sup>, ZHA Xiaoming<sup>3</sup>, SUN Jianjun<sup>3</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. Power Internet of Things Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610041, Sichuan, China;

3. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China)

**Abstract:** The variable speed pumped storage unit with full-size converter (FSC-VSPSU) is connected to power grid through back-to-back converters, which has the advantages of fast power adjustment and independent decoupling of active and reactive power, so it has attracted wide attention in recent years. Due to the volatility of new energy station, it is usually equipped with static var generator (SVG) to maintain the stability of system voltage, but SVG is also prone to insufficient capacity. Aiming at this situation, the coordinated power control of FSC-VSPSU and SVG is studied, the reactive power regulation characteristics of FSC-VSPSU and SVG are analyzed, and a coordinated power control strategy based on model predictive control (MPC) is proposed. Model predictive control is used to coordinate FSC-VSPSU and SVG with different response times, and the relationship between reactive power and voltage is calculated by voltage sensitivity. A mathematical model of MPC problem is established with the goal of minimum voltage deviation of FSC-VSPSU and point of common coupling, and maximum SVG reserve, and then the power reference values of FSC-VSPSU and SVG are solved. The feasibility of the proposed model predictive control and its superiority over droop control are verified by the simulation.

**Key words:** variable speed pumped storage unit with full-size converter; static var generator; model predictive control; power coordination

## 0 引言

随着风电、光伏等可再生能源发电的大规模发展,新能源在电网中的装机容量比例逐年提高,然而其出力间歇性与波动性造成的电能质量、电压和频率问题给电网运行带来巨大的挑战。多能互补发电技术成为有效解决上述问题的主要方法,包括风光储互补、风光水互补、风光火互补、水风光蓄互补等<sup>[1]</sup>。抽水蓄能作为目前应用最广、技术最为成熟的可再生能源储能技术,对电网的调峰填谷、旋转备用等发挥巨大的作用<sup>[2]</sup>。其中全功率变速抽水蓄能机组(variable speed pumped storage unit with full-size converter, FSC-VSPSU)通过背靠背交直流变流器接入电网,具有功率快速可调、有功无功独立解耦的优点,在多能互补技术中具有一定优势,被广泛关注<sup>[3]</sup>。由于大型新能源场站一般在较偏远地区,接点处的电网较弱,其间歇性发电易引起较大的电压波动。为提高新能源并网电压稳定性,在风光蓄互补发电技术应用中,通过协调抽水蓄能机组与新能源场站配置的静态无功发生器(static var generator, SVG)<sup>[4-5]</sup>的无功功率输出来对系统进行无功补偿是一种有效方法。

现有无功补偿的研究主要针对单个无功补偿设备,如 SVG、抽水蓄能机组等。如文献[6]研究了 SVG 控制结构模型及其在双馈风电场中容量的选取以及主要参数的确定;文献[7]研究了 SVG 在直驱风电场的无功补偿;文献[8]考虑了电网正常和故障情况下的无功潮流特性,探讨了 SVG 在风电场无功功率控制中的作用;文献[9]对抽水蓄能电站运行特性进行了分析,提出了基于励磁电压控制器的抽水蓄能机组无功电压补偿;文献[10]分析了 FSC-VSPSU 基本结构和控制策略,提出了变流器无功优先控制策略;文献[11]对抽水蓄能机组无功调节能力进行了分析,阐述了抽水蓄能机组在抽水工况下无功调节的试验方法和结果。上述文献仅仅研究了单个设备的无功补偿作用,而由于 SVG、抽水蓄能等无功补偿设备都有无功容量的约束,系统容易出现无功补偿设备容量不足、系统突发故障不能及时补偿的情况。因此,研究 SVG 和抽水蓄能的协调控制对新能源场站无功补偿以及电网电压稳定具有一定意义。

在多个设备的功率协调控制研究中,常采用粒子群算法、遗传算法等优化算法和下垂控制策略。如文献[12]以减小风电场节点电压偏差、降低网络损耗和利用风电机组无功输出能力为目标,采用粒子群算法协调风机和 SVG 的无功出力;文献[13]以配电网节点电压总偏移指数最小为目标函数,采用改进狼群算法对 SVG 和风电机组进行功率协调;文献[14]采用传统下垂控制使每台风机根据自身下垂系数发出无功功率,但在系统不同状态下,采用的固定下垂系数并不是最优系数,使得系统电压稳定性不高;文献[15-16]在协调风电场内各机组无功出力来稳定接入点电压时,采用自适应下垂控制即变下垂系数控制,下垂系数根据其当前设备最大无功容量等进行自适应调节,使得无功容量较大的风电机组输出更多的无功功率。上述研究采用优化算法进行多设备协调可解决多目标问题,但其易陷入局部最优。采用下垂控制协调风电场内各机组功率输出,可灵活应对系统运行参数的变化,快速稳定系统电压和频率。然而在协调不同类型设备时,使用优化算法或下垂控制没有考虑不同类型设备响应时间常数的不同。若不考虑设备在时间尺度上的协调,则会给控制带来不良的效果<sup>[17]</sup>。

近年来,模型预测控制(model predictive control, MPC)因其能在当前状态基础上预测系统未来的输出,实现有限时间段内的最优控制而备受关注<sup>[18]</sup>。MPC 是一种先进的控制框架,已广泛应用于电力系统最优控制问题中<sup>[19]</sup>,可解决多目标和多约束的优化问题,具有控制效果好、鲁棒性强的优点,也宜于对不同时间尺度的控制行为进行协调<sup>[17,20]</sup>。

针对 FSC-VSPSU 与 SVG 考虑时间尺度的功率协调,下面提出了基于 MPC 的全功率抽水蓄能机组与 SVG 功率协调控制。通过 MPC 来考虑 SVG 和全功率抽水蓄能机组功率时间常数不同的特性,并引入预测信息,基于未来一定时间内的整体性能最优协调抽水蓄能机组和 SVG 功率输出,提高系统电压稳定性。

## 1 FSC-VSPSU 与 SVG 无功调节特性

### 1.1 FSC-VSPSU 无功调节特性

FSC-VSPSU 总体结构主要由水泵水轮机、发电电动机、背靠背变流器组成,其结构如图 1 所示。

FSC-VSPSU 通过背靠背变流器与电网连接,背靠背变流器控制策略通常采用电压矢量定向控制,机侧逆变器控制转速或输出有功功率,网侧逆变器控制直流侧电压和输出无功功率,因此 FSC-VSPSU 具备无功调节能力。

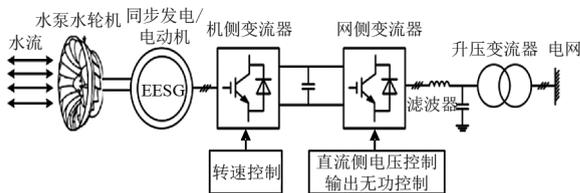


图 1 FSC-VSPSU 结构

FSC-VSPSU 无功功率容量由变流器的额定容量以及机组发出有功功率决定,其无功功率极限值为

$$\begin{cases} Q_{psu}^{\max} = \sqrt{S_n^2 - P_T^2} \\ Q_{psu}^{\min} = -\sqrt{S_n^2 - P_T^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $Q_{psu}^{\max}$  为 FSC-VSPSU 最大无功功率; $Q_{psu}^{\min}$  为 FSC-VSPSU 最小无功功率; $S_n$  为网侧变流器额定容量; $P_T$  为输出的机械功率。

### 1.2 SVG 无功调节特性

SVG 因具有动态响应速度快、调节范围广、兼具谐波治理功能的优点,已经成为现代无功补偿装置的重要发展方向。SVG 结构如图 2 所示,其控制通常采用电压矢量定向控制,实现有功无功的解耦。SVG 的无功功率极限由其额定容量决定。

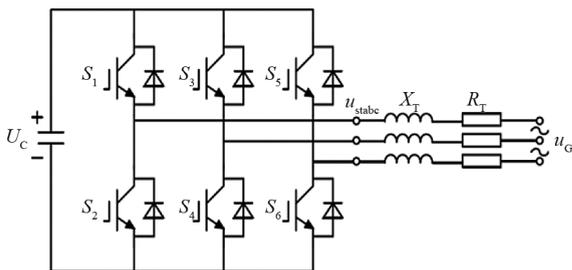


图 2 SVG 结构

由于 FSC-VSPSU 具有机械特性和电气特性,SVG 只具有电气特性,FSC-VSPSU 功率时间常数相比于 SVG 较大。为实现 FSC-VSPSU 和 SVG 考虑响应时间差异的功率协调,提出采用 MPC 策略。

## 2 基于模型预测控制的 FSC-VSPSU 与 SVG 功率协调控制

FSC-VSPSU 与 SVG 设备群的系统结构如图 3

所示,FSC-VSPSU 和 SVG 经过一定距离连接到外部电网。所提基于 MPC 的 FSC-VSPSU 与 SVG 功率协调控制结构如图 4 所示。首先,FSC-VSPSU 有功指令直接由地调自动电压控制 (automatic voltage control,AVC) 给出;其次,通过 MPC 协调 FSC-VSPSU 和 SVG 无功输出,给出 FSC-VSPSU 的无功指令;最后,FSC-VSPSU 和 SVG 跟踪各自的有功无功指令值进行功率输出。

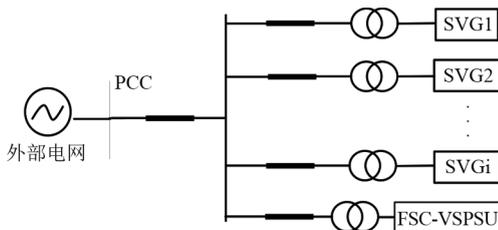


图 3 FSC-VSPSU 与 SVG 设备群的系统结构

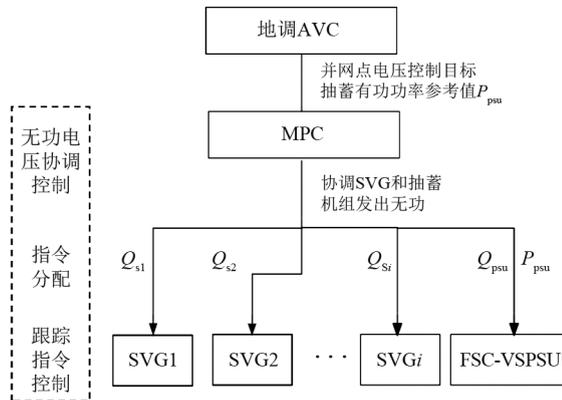


图 4 FSC-VSPSU 与 SVG 功率协调控制结构

### 2.1 模型预测控制 (MPC)

MPC 基本原理是通过系统预测模型得到系统所有可能的状态,即系统将在某一时段的输出,并通过性能优化指标来决定未来动作。MPC 基本上可以概括为 3 个基本要素:预测模型、滚动优化和反馈校正<sup>[21]</sup>。

1) 预测模型:可以由当前状态和未来输入来预测系统未来某一时段内输出的系统模型,是模型预测控制最基本的部分。

2) 滚动优化:指 MPC 在线、重复地在每个时刻都对系统进行优化控制,根据系统未来状态和目标函数、约束条件选择控制变量值。

3) 反馈校正:将当前时刻系统的实际输出作为新一轮滚动优化的初始值,在每个新的采样时刻,基于预测模型的输出值必须通过实际测量的输出功率信息进行修正,然后进行新一轮的优化。

## 2.2 电压灵敏度计算

所研究的 FSC-VSPSU 与 SVG 的协调控制,旨在实现电压的稳定,因此需要计算注入无功功率对节点电压的灵敏度系数。所提灵敏度系数的计算采用解析法,既可提高计算效率,又能克服可能出现的收敛问题<sup>[22]</sup>。

系统中节点  $i$  注入的功率与电压的关系可表达为

$$\vec{S}_i^* = \vec{U}_i^* \sum_j \vec{Y}_{ij} \vec{U}_j \quad (2)$$

式中: $\vec{U}_i$ 为节点  $i$  的电压向量; $\vec{U}_j$ 为节点  $j$  的电压向量; $\vec{S}_i$ 为注入复功率; $\vec{Y}_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$ ,为网络导纳矩阵; $\vec{S}_i^*$ 和 $\vec{U}_i^*$ 分别为 $\vec{S}_i$ 和 $\vec{U}_i$ 的共轭。

进一步地, $\vec{S}_i^*$ 关于节点  $l$  注入无功功率的偏导数可表达为

$$\frac{\partial \vec{S}_i^*}{\partial Q_l} = \frac{\partial (P_i + jQ_i)}{\partial Q_l} = \frac{\partial \vec{U}_i^*}{\partial Q_l} \sum_j \vec{Y}_{ij} \vec{U}_j + \vec{U}_i^* \sum_j \vec{Y}_{ij} \frac{\partial \vec{U}_j}{\partial Q_l} = \begin{cases} -j1, i=l \\ 0, i \neq l \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\frac{\partial \vec{U}_i^*}{\partial Q_l}$ 和 $\frac{\partial \vec{U}_j}{\partial Q_l}$ 均是线性的,因此 $\frac{\partial \vec{U}_i^*}{\partial Q_l}$ 和 $\frac{\partial \vec{U}_j}{\partial Q_l}$ 具有唯一解。根据方程解,可以求出电压灵敏度系数为

$$\frac{\partial |U_i|}{\partial Q_l} = \frac{1}{|U_i|} \text{Re} \left\{ \vec{U}_i^* \frac{\partial \vec{U}_i}{\partial Q_l} \right\} \quad (4)$$

## 2.3 基于 MPC 的 FSC-VSPSU 与 SVG 功率协调控制

基于 MPC 的 FSC-VSPSU 与 SVG 功率协调控制主要控制思想为:首先,建立预测模型预测 FSC-VSPSU 和 SVG 的无功输出;然后,根据预测的无功通过电压灵敏度系数预测并网点电压和 FSC-VSPSU 端电压,再设计目标函数和约束条件;最后,求解 MPC 优化问题,将最优功率指令下发给 FSC-VSPSU 与 SVG。基于 MPC 的 FSC-VSPSU 与 SVG 功率协调控制如图 5 所示。

### 2.3.1 预测模型

考虑到通信系统与功率控制的动态响应特征,可以将 FSC-VSPSU 的功率控制环简化为一阶滞后函数<sup>[23]</sup>,即

$$\Delta Q_{\text{psu}} = \frac{1}{1 + sT_{\text{psu}}} \Delta Q_{\text{psu}}^{\text{ref}} \quad (5)$$

式中: $\Delta Q_{\text{psu}}$ 为抽水蓄能机组无功输出增量; $\Delta Q_{\text{psu}}^{\text{ref}}$ 为

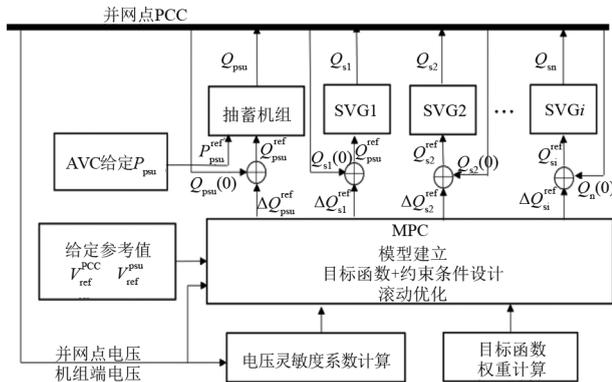


图 5 基于 MPC 的 FSC-VSPSU 与 SVG 功率协调控制

抽水蓄能机组无功输出增量参考值; $T_{\text{psu}}$ 为抽水蓄能机组无功功率控制时间常数,通常取值为  $100 \text{ ms}$ <sup>[24-25]</sup>。设抽水蓄能机组当前无功输出测量值和无功输出参考值分别为  $Q_{\text{psu}}(0)$ 、 $Q_{\text{psu}}^{\text{ref}}$ ,则

$$Q_{\text{psu}}^{\text{ref}} = \Delta Q_{\text{psu}}^{\text{ref}} + Q_{\text{psu}}(0) \quad (6)$$

由此,可得到 FSC-VSPSU 无功出力预测模型表达式为

$$\Delta \dot{Q}_{\text{psu}} = -\frac{1}{T_{\text{psu}}} \Delta Q_{\text{psu}} + \frac{1}{T_{\text{psu}}} \Delta Q_{\text{psu}}^{\text{ref}} \quad (7)$$

同理,考虑到通信系统与功率控制的动态响应特征,可以将 SVG 的功率控制环简化为一阶滞后函数,即

$$\Delta Q_s = \frac{1}{1 + sT_s} \Delta Q_s^{\text{ref}} \quad (8)$$

式中: $\Delta Q_s$ 为 SVG 无功输出增量; $\Delta Q_s^{\text{ref}}$ 为 SVG 无功输出增量参考值; $T_s$ 为 SVG 无功功率控制时间常数,通常取值为  $10 \text{ ms}$ 。设 SVG 当前无功输出测量值和无功输出参考值分别为  $Q_s(0)$ 、 $Q_s^{\text{ref}}$ ,则

$$Q_s^{\text{ref}} = \Delta Q_s^{\text{ref}} + Q_s(0) \quad (9)$$

由此,可得到 SVG 无功出力预测模型表达式为

$$\Delta \dot{Q}_s = -\frac{1}{T_s} \Delta Q_s + \frac{1}{T_s} \Delta Q_s^{\text{ref}} \quad (10)$$

将式(7)、式(10)写成模型预测控制标准形式,则包含 1 台 FSC-VSPSU 和  $m$  台 SVG 的系统预测模型可表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (11)$$

其中:

$$x = [\Delta Q_{s1} \Delta Q_{s2} \cdots \Delta Q_{si} \Delta Q_{\text{psu}}]^T \quad (12)$$

$$u = [\Delta Q_{s1}^{\text{ref}} \Delta Q_{s2}^{\text{ref}} \cdots \Delta Q_{si}^{\text{ref}} \Delta Q_{\text{psu}}^{\text{ref}}]^T \quad (13)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_s} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_s} & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & -\frac{1}{T_s} & 0 \\ & & & \ddots & \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & -\frac{1}{T_{psu}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_s} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_s} & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{1}{T_s} & 0 \\ & & & \ddots & \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \frac{1}{T_{psu}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$C = I \quad (16)$$

式中: $x$  为当前状态量; $u$  为控制变量; $y$  为输出量; $\dot{x}$  为  $x$  关于时间的系数。

设置采样周期为  $t_s$ , 将上述连续状态空间方程采用前向欧拉法离散化, 得到离散状态方程为

$$\begin{cases} x(k+1) = A_d x(k) + B_d u(k) \\ y(k) = C_d x(k) \end{cases} \quad (17)$$

其中  $A_d = e^{At_s}$ ,  $B_d = \int_0^{t_s} e^{At} B dt$ ,  $C_d = C$ 。

式中, $x(k)$ 、 $u(k)$ 、 $y(k)$  分别为  $k$  时刻的状态量、控制变量、输出量。

由此便得到了包含 1 台 FSC-VSPSU 和  $m$  台 SVG 系统的离散化预测模型。

### 2.3.2 目标函数及约束条件

建立预测模型后, 需设计目标函数和约束条件进行滚动优化。控制目标设计为并网点电压、抽水蓄能机组机端电压偏差最小以及 SVG 无功储备最大。

1) 为满足并网点电压及抽水蓄能机组端电压在合理的范围内且输出稳定, 可通过预测的抽水蓄能机组、SVG 无功出力 and 电压灵敏度系数预测并网点电压, 以及抽水蓄能机组端电压在未来一段时间内的大小, 并将预测电压与基准值的偏差最小作为目标函数, 则

$$J_1 = \sum_{k=1}^{n_p} (K_{PCC} \|\Delta V_{pre}^{PCC}(k)\|^2 + K_{psu} \|\Delta V_{pre}^{psu}(k)\|^2) \quad (18)$$

式中: $n_p$  为预测时域; $\Delta V_{pre}^{PCC}(k)$  为  $k$  时刻并网点电压与基准值的差值; $\Delta V_{pre}^{psu}(k)$  为  $k$  时刻抽水蓄能机组端电压与基准值的差值; $K_{PCC}$ 、 $K_{psu}$  分别为并网点电压、抽水蓄能机组端电压目标的权重系数。

其中,  $\Delta V_{pre}^{PCC}(k)$ 、 $\Delta V_{pre}^{psu}(k)$  可表示为

$$\begin{cases} \Delta V_{pre}^{PCC}(k) = V_{PCC}(0) + \frac{\partial |V_{PCC}|}{\partial Q_{psu}} \Delta Q_{psu}(k) + \\ \quad \frac{\partial |V_{PCC}|}{\partial Q_s} \Delta Q_s(k) - V_{ref}^{PCC} \\ \Delta V_{pre}^{psu}(k) = V_{psu}(0) + \frac{\partial |V_{psu}|}{\partial Q_{psu}} \Delta Q_{psu}(k) + \\ \quad \frac{\partial |V_{psu}|}{\partial Q_s} \Delta Q_s(k) - V_{ref}^{psu} \end{cases} \quad (19)$$

式中, $V_{ref}^{PCC}$ 、 $V_{ref}^{psu}$  分别为并网点电压、抽水蓄能机组端电压基准值。

2) 为满足系统具有应对潜在扰动事故的能力, 应使得 SVG 储备容量最大化, 即 SVG 无功出力最小, 目标函数可为

$$J_2 = \sum_{k=1}^{n_p} K_s \|\Delta Q_s(k)\|^2 \quad (20)$$

式中: $\Delta Q_s(k)$  为  $k$  时刻 SVG 无功输出增量; $K_s$  为 SVG 无功输出权重系数。

因此, 总目标函数可定义为

$$\min J = J_1 + J_2 \quad (21)$$

下面制定约束条件, 主要包括容量约束、线路功率约束和爬坡约束。

#### 1) 容量约束

$$\begin{cases} Q_s^{\min} \leq Q_s(k) \leq Q_s^{\max} \\ Q_{psu}^{\min} \leq Q_{psu}(k) \leq Q_{psu}^{\max} \\ P_{psu}^{\min} \leq P_{psu}^{\text{ref}} \leq P_{psu}^{\max} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $Q_s(k)$  为  $k$  时刻 SVG 输出的无功功率; $P_{psu}^{\text{ref}}$  为 AVC 给定 FSC-VSPSU 输出有功功率; $Q_{psu}(k)$  为  $k$  时刻抽水蓄能机组输出无功功率; $Q_s^{\min}$ 、 $Q_s^{\max}$  分别为 SVG 可输出无功的最小值、最大值; $Q_{psu}^{\min}$ 、 $Q_{psu}^{\max}$  分别为 FSC-VSPSU 可输出无功的最小值、最大值; $P_{psu}^{\min}$ 、 $P_{psu}^{\max}$  分别为 FSC-VSPSU 可输出有功的最小值、最大值。

#### 2) 线路功率约束

$$\sqrt{P_w^2(k) + Q_w^2(k)} \leq S_{w\max} \quad (23)$$

式中:  $P_w(k)$  为  $k$  时刻流过线路  $w$  的有功功率;  $Q_w(k)$  为  $k$  时刻流过线路  $w$  的无功功率;  $S_{w\max}$  为线路可输送的最大视在功率。

3) 发电功率爬坡约束、抽水功率爬坡约束

$$\begin{cases} \delta_C^L \Delta t \leq (P_{psu,t+1}^G - P_{psu,t}^G) \leq \delta_C^U \Delta t \\ \delta_P^L \Delta t \leq (P_{psu,t+1}^P - P_{psu,t}^P) \leq \delta_P^U \Delta t \end{cases} \quad (24)$$

式中:  $\delta_C^L$ 、 $\delta_C^U$  分别为抽水蓄能机组发电功率最小、最大变化速度;  $\delta_P^L$ 、 $\delta_P^U$  分别为抽水蓄能机组抽水功率最小、最大变化速度;  $P_{psu,t}^G$ 、 $P_{psu,t}^P$  分别为抽水蓄能机组  $t$  时刻的发电功率和抽水功率。

根据以上方法,建立了 MPC 优化问题,进一步可将其转化为标准的二次规划求解问题,并用商业 QP 求解器进行求解。

### 3 仿真分析

某区域含风电场、光伏电站及抽水蓄能电站,其中风电场由 20 台 2 MW 风机、1 台 3.5 MW 的 SVG 组成;光伏电站由 20 台 1.5 MW 光伏阵列、1 台 2 MW 的 SVG 组成;抽水蓄能电站含一台 3 MW 的全功率变速抽水蓄能机组。为验证所提基于 MPC 的 FSC-VSPSU 与 SVG 功率协调控制的有效性,搭建了该区域 FSC-VSPSU 与 2 台 SVG 接入电网的仿真模型,仿真参数见表 1。

表 1 FSC-VSPSU、SVG 仿真参数

参数	数值
FSC-VSPSU 容量/MW	3
SVG1 容量/MW	3.5
SVG2 容量/MW	2
并网点电压权重	100
抽水蓄能机组端电压权重	0.2
SVG 无功储备权重	0.05
$X/R$	2
采样周期/s	0.1

为验证所提方法的适应性,该仿真系统在 1.0 s 前 FSC-VSPSU 和 SVG 的无功功率由系统随机给定,在 1.0 s 后采用所提协调控制方法。仿真结果如图 6、图 7 所示,可见,在 1.0 s 前并网点电压和 FSC-VSPSU 电压标幺值小于 1.00 pu。在 1.0 s 后采用所提协调控制方法,FSC-VSPSU 和 SVG 无功功率由基于 MPC 的控制器给定,并网点电压标幺值稳定为基准值 1.00 pu, FSC-VSPSU 电压标幺值稳定为 1.06 pu,均有较大的改善,验证了所提基于 MPC 的 FSC-

VSPSU 与 SVG 功率协调控制策略的正确性和有效性。

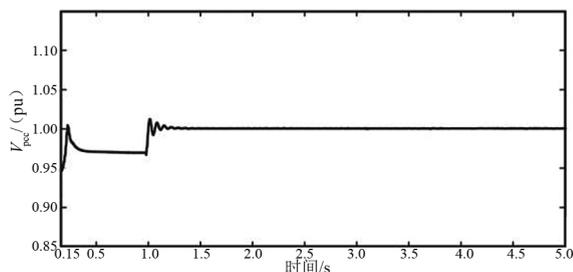


图 6 并网点电压标幺值仿真结果

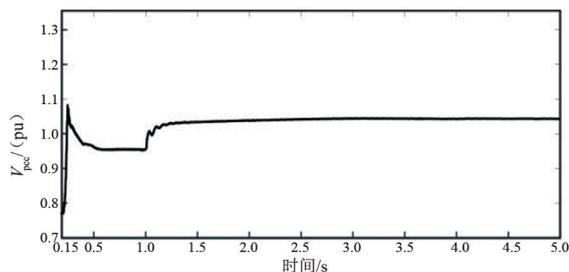


图 7 FSC-VSPSU 端电压标幺值仿真结果

图 8 为 FSC-VSPSU 与 SVG 功率输出仿真图,从图可知,1.0 s 前 FSC-VSPSU 与 SVG 随机给定无功功率输出,1.0 s 后采用所提协调控制方法,SVG1 输出无功功率 0.95 Mvar, SVG2 输出无功功率 0.47 Mvar, FSC-VSPSU 输出无功功率 1.5 Mvar, FSC-VSPSU 输出有功值由 AVC 直接给出,为 0.75 MW。SVG 无功出力均衡,留有一定的无功储备预防系统发生故障,因此验证了所提控制方法可以预留一定的 SVG 无功容量供系统紧急使用。

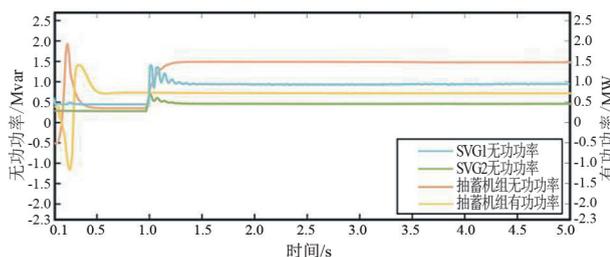


图 8 FSC-VSPSU 与 SVG 功率输出仿真

为分析所提控制策略对新能源波动的适应性,在仿真模型中加入一台风机模型通过并网点接入电网,风机 2.0 s 前风速为 8 m/s,在 2.0~4.0 s 迎来渐强风,以  $5 \text{ m/s}^2$  增大风速,4.0 s 后风速稳定在 18 m/s。由于风速变化,风机有功功率输出随之变化,风机输出有功如图 9 所示。由于风机有功变化,并网点电压也会随之变化,采用所提模型预测控制策略后,系统可根据并网点电压实际测量值滚动调整 SVG 与 FSC-VSPSU 的无功输出,使并网点电

压维持稳定。仿真结果如图 10 所示,为使在风速变化情况下并网点电压维持在 1.00 pu,SVG 与 FSC-VSPSU 输出的无功功率在 2.0~4.0 s 逐渐增加,4.0 s 后保持恒定。

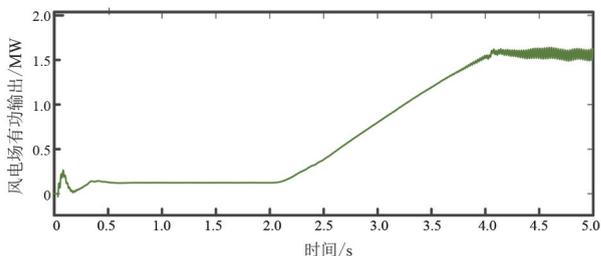


图 9 风机输出有功功率仿真

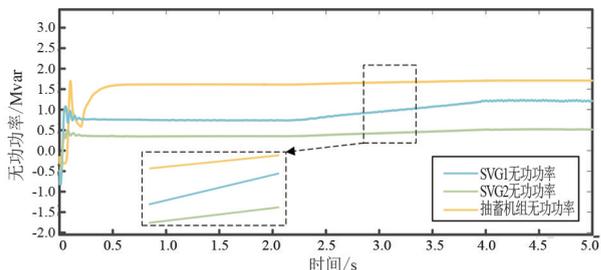


图 10 风速变化下 FSC-VSPSU 与 SVG 功率输出仿真

为验证所提协调控制方法的优越性,与传统下垂控制策略进行了对比。下垂控制策略为 FSC-VSPSU 与 SVG 通过并网点电压和各自下垂系数来确定输出无功功率,其中下垂系数与 FSC-VSPSU、SVG 容量有关。仿真算例中 FSC-VSPSU、SVG1、SVG2 下垂系数分别为 50、70、40。图 11 为系统 1.0 s 后分别采用下垂控制和所提协调控制方法下的并网点电压标幺值仿真结果,可见,采用下垂控制时并网点电压在 1.01 pu 附近波动,而采用所提协调控制方法时,并网点电压稳定为 1.00 pu,因此可以验证所提协调控制方法的优越性。

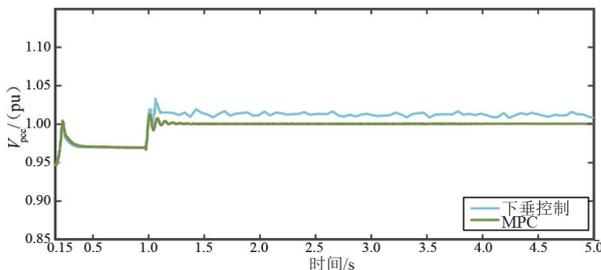


图 11 不同控制策略下并网点电压对比

## 4 结论

上面分析了 FSC-VSPSU 与 SVG 的无功调节特性,并在二者的无功调节特性的基础上提出了基于

MPC 的 FSC-VSPSU 与 SVG 功率协调控制。采用 MPC 将 FSC-VSPSU 与 SVG 动态响应时间差异考虑在内,以并网点电压、FSC-VSPSU 端电压偏差最小以及 SVG 无功储备最大为控制目标,协调 FSC-VSPSU 与 SVG 的功率输出。并通过仿真验证了所提控制策略的正确性,以及其相较于传统下垂控制的优越性。

## 参考文献

- [1] 韩晓言,丁理杰,陈刚,等.梯级水光蓄互补联合发电关键技术与研究展望[J].电工技术学报,2020,35(13):2711-2722.
- [2] 李强,袁越,李振杰,等.考虑峰谷电价的风电-抽水蓄能联合系统能量转化效益研究[J].电网技术,2009,33(6):13-18.
- [3] 姜海军,戎刚,史华勃,等.全功率变速抽水蓄能机组变速变功率协同控制策略研究[J].水电与抽水蓄能,2022,8(4):31-36.
- [4] 崔正湃,王皓靖,马锁明,等.大规模风电汇集系统动态无功补偿装置运行现状及提升措施[J].电网技术,2015,39(7):1873-1878.
- [5] 咸红超.风电对电网的影响及无功补偿的研究[J].山东工业技术,2016(19):172-173.
- [6] 付文秀,范春菊.SVG 在双馈风力发电系统电压无功控制中的应用[J].电力系统保护与控制,2015,43(3):61-68.
- [7] 郭成,贯坤,郭育华.SVG 对直驱式机组风电场无功补偿的研究[J].电力电容器与无功补偿,2017,38(3):67-70.
- [8] ZHENG W, BAI R Q, ZHI Y, et al. Research on application of SVG for reactive power control in wind farm [C]//2012 Power Engineering and Automation Conference, September 18 - 20, 2012, Wuhan, China. IEEE, 2012:1-3.
- [9] 罗胤,赵俊杰,王坤,等.天池抽水蓄能电站支持电网电压稳定措施研究[J].水电站机电技术,2022,45(4):25-28.
- [10] 衣传宝,梁廷婷,汪卫平,等.全功率变速抽水蓄能机组无功优先控制策略研究[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(1):25-31.
- [11] 张建伟,张洋,董飞燕.大型抽水蓄能电站抽水工况下无功电压调节研究和试验[J].水电与抽水蓄能,2016,2(5):61-64.
- [12] 王耀翔,戴朝波,杨志昌,等.考虑风电机组无功潜力的风电场无功电压控制策略[J].电力系统保护与控制,2022,50(24):83-90.

- [16] 吴晓文,舒乃秋,李洪涛,等. 基于流体多组分传输的气体绝缘母线温度场数值计算与分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(33):141-147.
- [17] 崔兆轩,林莘,钟建英,等.C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>混合气体特高压母线通流温升特性研究[J]. 电工技术学报,2023,38(9):2491-2499.
- [18] 梁智权,主编. 流体力学[M]. 重庆:重庆大学出版社,2002.
- [19] 张丕沛,李杰,汪鹏. 隔离开关合闸不到位引起 GIS 放电故障的原因分析[J]. 山东电力技术,2021,48(11):54-58.
- [20] 刘光启,马连湘,刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京:化学工业出版社,2002.

- [21] 陈敬友,高兵,杨帆,等. 气体绝缘输电线路温升数值计算及绝缘气体换热能力[J]. 高压技术,2020,46(11):4042-4051.

#### 作者简介:

张丕沛(1996),男,硕士,工程师,主要从事高压设备带电检测及故障诊断工作;

赵晓楠(1986),男,硕士,高级工程师,主要从事高压设备带电检测及故障诊断工作;

丛龙琦(1985),男,硕士,高级工程师,主要从事高压设备带电检测及故障诊断工作;

郭晨瑞(1996),男,工程师,主要从事高压设备带电检测及故障诊断工作。

(收稿日期:2024-02-20)

(上接第7页)

- [13] 印云刚,刘闯,何其新,等. 基于改进狼群算法的含风电配电网无功优化[J]. 内蒙古电力技术,2023,41(3):1-7.
- [14] LI Yujun, XU Zhao, WONG Kit Po. Advanced control strategies of PMSG-based wind turbines for system inertia support [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017,32(4):3027-3037.
- [15] 王康平,张兴科,刘财华,等. 基于自适应下垂控制的风电场无功电压控制策略[J]. 综合智慧能源,2022,44(4):12-19.
- [16] 李生虎,章怡帆,于新钰,等. 采用改进下垂控制和双层无功优化的风电场无功均衡分配研究[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(13):1-7.
- [17] 吴昊,于景龙,杨政厚,等. 风电场无功与电压控制技术综述[J]. 热力发电,2023,52(3):26-38.
- [18] 叶林,路朋,赵永宁,等. 含风电电力系统有功功率模型预测控制方法综述[J]. 中国电机工程学报,2021,41(18):6181-6198.
- [19] 路朋,叶林,裴铭,等. 风电集群有功功率模型预测协调控制策略[J]. 中国电机工程学报,2021,41(17):5887-5900.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] CHRISTAKOU K, LEBOUDEC J-Y, PAOLONE M, et al. Efficient computation of sensitivity coefficients of node

voltages and Line currents in unbalanced radial electrical distribution Networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2013,4(2):741-75.

- [23] MARTINEZ J, KJÆR P C, TEODORESCU R. DFIG turbine representation for small signal voltage control studies [C]//2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, May 20-22,2010,Brasov,Romania.IEEE, 2010;31-40.

[24] 王子伊,王玮,马伟,等. 梯级水光蓄互补发电系统实时协调控制策略[J]. 电网技术,2021,45(3):871-881.

- [25] 丁理杰,史华勃,陈刚等. 全功率变速抽水蓄能机组控制策略与调节特性[J]. 电力自动化设备,2024,44(3):166-171.

作者简介:  
潘鹏宇(1993),男,博士,工程师,研究方向为全功率变速抽水蓄能机组优化控制、电力系统宽频带阻抗测量;

丁理杰(1981),男,博士,正高级工程师,研究方向为大电网安全稳定分析与控制;

王珍(2000),女,硕士研究生,研究方向为电力电子在电力系统中的应用;

史华勃(1987),男,博士,高级工程师,研究方向为抽水蓄能发电技术、电力系统分析计算与稳定控制等;

陈刚(1985),男,博士,正高级工程师,研究方向为电力系统分析与控制;

张远志(1995),男,博士,研究方向为电机设计及其控制、电机磁场调制原理、新型电力系统用电机研究;

查晓明(1967),男,教授,博士生导师,研究方向为电力电子功率变换及系统、新能源发电及新型供配电系统技术;

孙建军(1975),男,教授,博士生导师,研究方向为电能质量分析及治理、电力电子系统及微电网的建模和分析。

(收稿日期:2023-11-15)