考虑风电不确定性的交直流混联电网静态电压稳定优化控制方法

涂思嘉[1],杨悦荣[2],林舜江[2],刘万彬[2],赵利刚[1],周保荣[1],姚文峰[1]

(1.直流输电技术国家重点实验室(南方电网科学研究院有限责任公司),广东 广州 510663;2.华南理工大学电力学院,广东 广州 510640)

摘　要:静态电压稳定裕度(SVSM)是电力系统运行中常用的电压稳定性评估指标,风电场出力的不确定波动会引起系统SVSM水平变化,可能会给系统安全运行带来威胁。为此,提出了考虑风电场出力不确定性的交直流混联电网静态电压稳定优化控制模型,以最小化系统总调控成本为目标,同时要求在给定风电出力波动范围的情况下,系统SVSM波动区间范围的下界满足给定的安全运行要求。为了求解该三层优化模型,引入参数化逼近方法,将内层和中层优化模型逐层进行参数化逼近,以获得SVSM区间下界与各个控制变量之间关系的近似解析表达式,从而将三层优化模型转化为单层优化模型,并采用SBB求解器求出优化控制方案。同时,提出了采用SVSM对控制变量的高阶混合导数以去除近似多项式中的冗余交叉项的方法来提高计算效率。最后,以修改的IEEE 39节点交直流混联系统为例,验证了所提出方法的正确有效性。

关　键　词:交直流混联电网;风电不确定性;静态电压稳定;参数化逼近方法;Galerkin法

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2023.03.010　　**中图分类号:**TM732　　**文章编号:**1673-9140(2023)03-0094-11

An optimal control method for static voltage stability of AC/DC hybrid power grid considering the uncertainty of wind power

TU Sijia[1], YANG Yuerong[2], LIN Shunjiang[2], LIU Wanbin[2],
ZHAO Ligang[1], ZHOU Baorong[1], YAO Wenfeng[1]

(1.State Key Laboratory of HVDC, CSG Electric Power Research Institute, Guangzhou 510663, China; 2.School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Static voltage stability margin (SVSM) is a commonly used voltage stability evaluation index in power system operation. The SVSM will change with the uncertain fluctuation of wind farm output, which may threaten the secure operation of a power system. Therefore, this paper proposes an optimal control model for the SVS of an AC/DC hybrid power grid considering the uncertainty of wind farm output. With the objective of minimizing the total control cost, it is required that the lower bound of the system SVSM fluctuation range meets the predefined safe operation requirements under a given fluctuation range of wind power output. In order to solve the three-layer optimization model, a parametric approximation method is introduced, and the inner and middle layer optimization models are parameterized layer by layer, which helps to obtain the approximate analytical expression of the relationship between the lower bound of the SVSM interval and each control variable. The optimization model is converted into a single-layer optimization model, and the SBB

收稿日期:2021-05-06;**修回日期:**2021-07-06

基金项目:直流输电技术国家重点实验室2020年开放基金项目(SKLHVDC-2020-KF-13)

通信作者:林舜江(1980—),男,博士,副研究员,主要从事电力系统优化与控制研究;E-mail:linshj@scut.edu.cn

solver is used to obtain the optimal control scheme. Meanwhile, to improve the computational efficiency, a method of removing redundant cross terms in the approximate polynomials is proposed by using high-order mixed derivatives of SVSM with respect to control variables. Finally, a modified IEEE 39-bus AC-DC hybrid system is used as an example to verify the correctness and effectiveness of the proposed method.

Key words: AC/DC hybrid power grid; wind power uncertainty; static voltage stability; parameterized approximation method; Galerkin method

近年来,风电等新能源发电技术得到了快速发展,接入电网的容量急剧增大。受风速等自然因素影响,风电场的出力具有较大的不确定性和波动性,给电力系统的安全运行带来了很大挑战[1-2]。静态电压稳定裕度(static voltage stability margin, SVSM)是电力系统运行中一个常用的电压稳定性评估指标,表示系统在当前运行状态下能够承担的最大负荷增长量。风电场出力的不确定波动会导致系统SVSM的相应变化,当采用区间数描述风电场出力的不确定波动时,SVSM不再是一个确定的值,而是一个区间[3]。当系统SVSM区间的下界太小时,将会使系统面临电压失稳的风险。因此,考虑风电场出力不确定波动条件下,如何通过交直流混联电网中的一些调控手段,使得系统SVSM波动区间的下界满足给定的安全运行要求,是一个十分具有研究意义的课题。

目前,关于新能源接入的交直流混联电网静态电压稳定分析问题,已有一些研究。文献[4]建立了直流馈入的高比例新能源受端电网简化模型,并通过判定静态电压稳定性指标推导出新能源极限渗透率,作为受端电网静态电压稳定的临界判据。文献[5]提出了综合无功—电压灵敏度与SVSM的直流受端交流系统电压薄弱区域评估方法,并在计算中计及了负荷静态电压特性。文献[6]针对高比例可再生能源并网给交直流系统静态电压稳定评估带来的挑战,提出一种含多端柔性直流的交直流系统静态电压稳定域构建方法。但是,上述文献中都没有考虑新能源不确定性对交直流混联电网静态电压稳定的影响。在考虑新能源不确定性的交直流混联电网静态电压稳定分析方面,文献[7]提出了一种含风电交直流系统概率连续潮流计算方法,并以此推导出能反映频率波动、风电出力和控制方式等因素的SVSM灵敏度指标。文献[8]提出了交直流混联电网SVSM区间计算的双层最优潮流模型,并结合凸松弛与对偶优化理论来求解该模型。然而,在考虑新能源不确定性的交直流混联电网静态电压稳定优化控制方面,目前鲜有相关研究报道,因此,对于考虑风电场出力不确定性的交直流混联电网静态电压稳定优化控制方法,亟需开展相关研究。

参数化方法指的是将电力系统中某些因变量与自变量的关系抽象出来并作进一步分析。参数化方法主要采用函数逼近法,利用关于参数的显式解析表达式近似表达待研究变量之间的关系。为了方便计算,通常选取形式比较简单的函数作为基函数。在电力系统的参数化问题中,代数多项式具有能够保留非线性信息,便于计算的优点,常被选作基函数[9]。目前,参数化方法在电力系统分析领域中已有所应用[10-11]。在电压稳定方面,文献[12]以鞍结分岔点条件作为电压稳定域的判据方程,结合参数化方法得出了电压稳定域的多项式近似表达式,提高了原有方法的精度,并且在支持域上具有全局的可控精度。文献[13]则在文献[12]的基础上,进一步考虑了发电机无功出力有界的问题,求取出更精确的电压稳定域边界。由于考虑风电场出力不确定波动区间对应的系统SVSM区间的下界和上界与风电场出力及系统中各种控制变量之间的关系比较复杂,通过参数化方法对此关系进行简化近似表达,显然可以为考虑风电场出力不确定性的交直流混联电网静态电压稳定优化控制模型的求解提供一种有效途径。

鉴于此,本文首先建立考虑风电场出力不确定性的交直流混联电网静态电压稳定优化控制模型,模型中考虑常规换相换流器(line-commutated converter, LCC)直流输电和多端电压源换流器(voltage sourced converter, VSC)直流输电系统的

运行特性；然后针对优化控制模型为三层优化模型难以直接求解的问题，引入参数化方法中的Galerkin逼近法，将三层优化模型逐步转化为单层优化模型进行求解。最后，通过IEEE 39节点系统算例验证本文提出方法的可行性与有效性。

1 含风电场的交直流混联电网静态电压稳定优化控制模型

1.1 目标函数

以最小化系统总调控成本为目标，计算如下：

$$\min \sum_{i\in N_\mathrm{G}} c_{\mathrm{u}i}(V_{\mathrm{G}i\mathrm{ref}}-V_{\mathrm{G}i\mathrm{ref}p})^2+\sum_{i\in N_\mathrm{G}} c_{\mathrm{G}i}(P_{\mathrm{G}i0}-P_{\mathrm{G}i0p})^2+\sum_{i\in N_\mathrm{C}} c_{\mathrm{B}i}(Q_{\mathrm{C}i}-Q_{\mathrm{C}ip})^2+\sum_{i\in N_\mathrm{LCC}} c_{\theta i}(\theta_i-\theta_{ip})^2+\sum_{i\in N_\mathrm{VSC}} c_{Mi}(M_i-M_{ip})^2 \tag{1}$$

式中，$P_{\mathrm{G}i0}$为发电机有功出力；$V_{\mathrm{G}i\mathrm{ref}}$为机端电压参考值；$Q_{\mathrm{c}i}$为无功补偿装置出力；$\theta_i$为LCC直流输电换流站的控制角；$M_i$为VSC直流输电换流站的调制度；下标$p$表示控制变量在调节前的值；$c_{\mathrm{u}i}$、$c_{\mathrm{G}i}$、$c_{Bi}$、$c_{\theta i}$、$c_{Mi}$分别为$P_{\mathrm{G}i0}$、$V_{\mathrm{G}i\mathrm{ref}}$、$Q_{\mathrm{c}i}$、$\theta_i$、$M_i$的单位调节成本；$N_\mathrm{G}$、$N_\mathrm{C}$、$N_\mathrm{LCC}$、$N_\mathrm{VSC}$分别为发电机节点集合、无功补偿装置安装节点集合、LCC直流换流站集合以及VSC直流换流站集合。

1.2 约束条件

1）节点功率平衡方程约束。

普通交流节点功率平衡方程如下：

$$\begin{cases} P_{\mathrm{G}i}+P_{\mathrm{W}i}-P_{\mathrm{L}i0}-e_i\sum_{j=1}^{n}(G_{ij}e_j-B_{ij}f_j)-f_i\sum_{j=1}^{n}(G_{ij}f_j+B_{ij}e_j)=0 \\ Q_{\mathrm{G}i}+Q_{\mathrm{W}i}+Q_{\mathrm{c}i}-Q_{\mathrm{L}i0}-f_i\sum_{j=1}^{n}(G_{ij}e_j-B_{ij}f_j)+e_i\sum_{j=1}^{n}(G_{ij}f_j+B_{ij}e_j)=0 \end{cases} \tag{2}$$

式中，$P_{\mathrm{G}i}$、$Q_{\mathrm{G}i}$分别为节点i的发电机有功和无功出力；$P_{\mathrm{W}i}$、$Q_{\mathrm{W}i}$分别为节点i连接的风电场有功和无功出力；$P_{\mathrm{L}i0}$、$Q_{\mathrm{L}i0}$分别为节点i的初始有功和无功负荷；G_{ij}、B_{ij}分别为节点i和j之间的互电导和互电纳；e_i/f_i、e_j/f_j分别为节点i和j电压的实部/虚部；n为系统总节点数。

连接LCC直流换流站交流节点功率平衡方程如下：

$$\begin{cases} P_{\mathrm{G}i}-P_{\mathrm{L}i0}-e_i\sum_{j=1}^{n}(G_{ij}e_j-B_{ij}f_j)-f_i\sum_{j=1}^{n}(G_{ij}f_j+B_{ij}e_j)\pm K_{\mathrm{p}i}U_{\mathrm{d}i}I_{\mathrm{d}i}=0 \\ Q_{\mathrm{G}i}-Q_{\mathrm{L}i0}-f_i\sum_{j=1}^{n}(G_{ij}e_j-B_{ij}f_j)+e_i\sum_{j=1}^{n}(G_{ij}f_j+B_{ij}e_j)-K_{\mathrm{p}i}U_{\mathrm{d}i}I_{\mathrm{d}i}\tan\varphi_i=0 \\ i\in N_\mathrm{LCC} \end{cases} \tag{3}$$

式中，$K_{\mathrm{p}i}$为节点i连接直流输电系统的极对数；$U_{\mathrm{d}i}$和$I_{\mathrm{d}i}$为节点i连接直流换流站的直流侧电压和直流电流；φ_i为节点i连接直流换流站的功率因数角；N_LCC为连接LCC直流换流站的交流节点集合；有功平衡方程的加减号对于整流站取减号，逆变站取加号。

连接VSC直流换流站交流节点功率平衡方程如下：

$$\begin{cases} P_{\mathrm{G}i}-P_{\mathrm{L}i0}-e_i\sum_{j=1}^{n}(G_{ij}e_j-B_{ij}f_j)-f_i\sum_{j=1}^{n}(G_{ij}f_j+B_{ij}e_j)-P_{\mathrm{v}i}=0 \\ Q_{\mathrm{G}i}-Q_{\mathrm{L}i0}-f_i\sum_{j=1}^{n}(G_{ij}e_j-B_{ij}f_j)+e_i\sum_{j=1}^{n}(G_{ij}f_j+B_{ij}e_j)-Q_{\mathrm{v}i}=0 \\ i\in N_\mathrm{VSC} \end{cases} \tag{4}$$

式中，$P_{\mathrm{v}i}$、$Q_{\mathrm{v}i}$为节点i连接VSC直流换流站从交流系统吸收的有功和无功功率；N_VSC为连接VSC直流换流站的交流节点集合。

2）直流输电线路的运行特性约束。

对于LCC直流输电系统，考虑换流变压器和换相电抗的影响，则运行特性约束如下：

$$U_{\mathrm{d}i}=\frac{3\sqrt{2}}{\pi}V_i\cos\theta_i K_{\mathrm{d}i}-\frac{3}{\pi}X_{\mathrm{c}i}I_{\mathrm{d}i} \tag{5}$$

$$\tan\varphi_i=\sqrt{\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi}V_iK_{\mathrm{d}i}\Big/U_{\mathrm{d}i}\right)^2-1} \tag{6}$$

$$U_{\mathrm{dR}i}=U_{\mathrm{dI}i}+I_{\mathrm{d}i}R_\mathrm{dc} \tag{7}$$

式(5)～(7)中，$K_{\mathrm{d}i}$为节点i连接直流换流站的换流

变压器变比；θ_i为节点i连接直流换流站的换流器控制角；X_{ci}为节点i连接直流换流站的换相电抗；R_{dc}为直流线路电阻；U_{dRi}和U_{dIi}为直流线路整流侧和逆变侧的直流电压；V_i为节点i的电压幅值。

对于VSC直流输电系统，忽略换流站等效电阻的影响，则运行特性约束如下：

$$P_{vi}-\frac{\mu_i M_i}{\sqrt{2}}V_i U_{di} Y_i \sin\delta_i=0 \tag{8}$$

$$Q_{vi}+\frac{\mu_i M_i}{\sqrt{2}}V_i U_{di} Y_i \cos\delta_i-V_i^2 Y_i=0 \tag{9}$$

$$U_{di}I_{di}-\frac{\mu_i M_i}{\sqrt{2}}V_i U_{di} Y_i \sin\delta_i=0 \tag{10}$$

$$I_{di}-\sum_{l=1}^{m} g_{il,d}U_{dl}=0 \tag{11}$$

式(8)～(11)中，μ_i为节点i连接直流换流站的直流电压利用率，在PWM调制策略确定时为定值；M_i为节点i连接直流换流站的调制比；V_i为节点i连接直流换流站的交流侧电压；Y_i为节点i连接直流换流站的等效导纳；δ_i为节点i连接的交流节点电压与换流器输入电压之间的相角差；$g_{il,d}$为消去联络节点后直流网络节点电导矩阵中的元素；m为连接VSC直流换流站的交流节点数。

3）并联无功补偿装置出力约束。

并联无功补偿装置是分组投切的，其无功出力需要在给定的离散档位中变化，如下：

$$Q_{ci}=\sum_{\tau=1}^{N_{ci}} q_{i\tau}\sigma_{i\tau},\ \sigma_{i\tau}\in\{0,1\},\ \sum_{\tau=1}^{N_{ci}}\sigma_{i\tau}=1 \tag{12}$$

式中，Q_{ci}为节点i处无功补偿装置的无功出力；N_{ci}为节点i处无功补偿装置的无功出力档位总数；$\sigma_{i\tau}$为0～1变量，用于表征节点i处无功补偿装置是否运行在第τ个档位；$q_{i\tau}$为节点i处无功补偿装置的第τ档无功出力值。

4）变量的上下限约束。

包括发电机节点有功和无功出力的上下限，交流节点电压的上下限，直流线路电压和电流的上下限，LCC直流换流站的控制角的上下限及VSC直流换流站的调制比和电压相角差的上下限，即：

$$\boldsymbol{x}_{\min}\leqslant\boldsymbol{x}\leqslant\boldsymbol{x}_{\max} \tag{13}$$

式中，$\boldsymbol{x}=[\boldsymbol{P}_G,\boldsymbol{Q}_G,\boldsymbol{V},\boldsymbol{U}_d,\boldsymbol{I}_d,\boldsymbol{\theta},\boldsymbol{M},\boldsymbol{\delta}]$。

5）静态电压稳定裕度区间下界的安全约束。

当风电场出力不确定波动时，SVSM有可能随着变化而出现裕度不足的情况，给电力系统的安全运行带来危险。因此，要求SVSM波动区间范围的下界大于安全运行要求的最小值，即

$$\lambda_{mL}\geqslant\lambda_0 \tag{14}$$

式中，λ_{mL}是系统SVSM波动区间范围的下界，λ_0是给定的系统安全运行要求的SVSM最小值。

对每一个风电场，其有功出力不确定波动范围用一个区间数来示，则可基于区间优化理论，将考虑风电场出力不确定波动的系统SVSM区间下界计算描述为以下的双层优化模型[14]：

$$\lambda_{mL}=$$

$$\begin{cases}
\min\limits_{P_w}\max\limits_{x}\lambda \\
\text{s.t.}\begin{cases}
P_{Gi}+P_{Wi}-(P_{Li0}+\lambda b_{Li}^{P})- \\
e_i\sum\limits_{j=1}^{n}(G_{ij}e_j-B_{ij}f_j)-f_i\sum\limits_{j=1}^{n}(G_{ij}f_j+B_{ij}e_j)=0 \\
Q_{Gi}+Q_{Wi}+Q_{ci}-(Q_{Li0}+\lambda b_{Li}^{Q})- \\
f_i\sum\limits_{j=1}^{n}(G_{ij}e_j-B_{ij}f_j)+e_i\sum\limits_{j=1}^{n}(G_{ij}f_j+B_{ij}e_j)=0 \\
P_{Gi}-(P_{Li0}+\lambda b_{Li}^{P})-e_i\sum\limits_{j=1}^{n}(G_{ij}e_j-B_{ij}f_j)- \\
f_i\sum\limits_{j=1}^{n}(G_{ij}f_j+B_{ij}e_j)\pm K_{pi}U_{di}I_{di}=0,\ i\in N_{LCC} \\
Q_{Gi}-(Q_{Li0}+\lambda b_{Li}^{Q})-f_i\sum\limits_{j=1}^{n}(G_{ij}e_j-B_{ij}f_j)+ \\
e_i\sum\limits_{j=1}^{n}(G_{ij}f_j+B_{ij}e_j)-K_{pi}U_{di}I_{di}\tan\varphi_i=0, \\
i\in N_{LCC} \\
P_{Gi}-(P_{Li0}+\lambda b_{Li}^{P})-e_i\sum\limits_{j=1}^{n}(G_{ij}e_j-B_{ij}f_j)- \\
f_i\sum\limits_{j=1}^{n}(G_{ij}f_j+B_{ij}e_j)-P_{vi}=0,\ i\in N_{VSC} \\
Q_{Gi}-(Q_{Li0}+\lambda b_{Li}^{Q})-f_i\sum\limits_{j=1}^{n}(G_{ij}e_j-B_{ij}f_j)+ \\
e_i\sum\limits_{j=1}^{n}(G_{ij}f_j+B_{ij}e_j)-Q_{vi}=0,\ i\in N_{VSC} \\
\text{式(5)～(7), 式(8)～(11)} \\
P_{Gi}=P_{Gi0}+\lambda b_{Gi}^{P} \\
Q_{Gi\min}\leqslant Q_{Gi}\leqslant Q_{Gi\max} \\
(Q_{Gi}-Q_{Gi\min})V_{ai}=0,\ (Q_{Gi}-Q_{Gi\max})V_{bi}=0 \\
V_{Gi}=V_{Giref}+V_{ai}-V_{bi},\ V_{ai}\geqslant 0,\ V_{bi}\geqslant 0 \\
V_{Gi}^2=e_{Gi}^2+f_{Gi}^2
\end{cases} \\
\boldsymbol{P}_{w\min}\leqslant\boldsymbol{P}_w\leqslant\boldsymbol{P}_{w\max}
\end{cases} \tag{15}$$

式中，b_{Li}^{P}、b_{Li}^{Q}分别为节点i负荷有功和无功的增长方式，一般可取$b_{Li}^{P}=P_{Li0}$，$b_{Li}^{Q}=Q_{Li0}$；$Q_{Gi\min}$、$Q_{Gi\max}$分别为节点i处发电机无功出力的最小值和最大值；V_{Gi}、e_{Gi}和f_{Gi}分别为节点i处发电机的机端电压幅值、实部和虚部；V_{Giref}为节点i处发电机机端电压的设定参考值；V_{ai}、V_{bi}为辅助变量，用于修正发电机无功出力到达极限后的机端电压；b_{Gi}^{P}为节点i发电机有功出力增长方式，假定除平衡节点发电机外的其他发电机按照其有功出力裕度占总有功出力裕度的比例来分配负荷有功的总增长量，如下：

$$b_{Gi}^{P}=\frac{P_{Gi\max}-P_{Gi0}}{\sum_{j=1}^{N_g-1}(P_{Gj\max}-P_{Gj0})}\sum_{k=1}^{n}b_{Lk}^{P} \tag{16}$$

其中，N_g为系统中发电机的总数。可以看到，有功出力已经到达上界的发电机，不再承担负荷有功增长量，即其有功增长系数为0。

式(15)中，$\boldsymbol{P}_w$为风电场有功出力向量；$\boldsymbol{P}_{w\min}$和$\boldsymbol{P}_{w\max}$分别为风电场出力波动区间的下界与上界向量。假定风电场以恒功率因数方式运行，即在有功出力不确定波动时，风电场内部通过无功控制器调节无功出力，以保持恒功率因数运行。因此，风电场有功无功出力满足以下方程：

$$Q_{wi}=P_{wi}\tan\varphi_i \tag{17}$$

式中，φ_i为第i个节点所接风电场的功率因数角。

式(1)～(17)构成了所提出的含风电场的交直流混联电网静态电压稳定优化控制模型，可以看到，该模型是一个三层优化模型，包括了计算某一风电场出力对应的SVSM的内层优化问题和计算风电场出力波动区间对应的SVSM区间下界的中层优化问题。该模型采用传统的优化计算方法难以直接求解。因此，本文引入了参数化逼近方法中的Galerkin方法对此问题进行简化近似求解。

2 优化控制模型的求解

参数化方法指的是量化分析某些变量之间的函数关系，在此优化控制问题中，指的是系统SVSM波动范围的下界λ_{mL}与各个控制变量之间的函数关系。可以看出，λ_{mL}与各个控制变量之间的函数关系蕴含在式(15)的双层优化模型中，只要能够求出λ_{mL}与各个控制变量之间的近似解析函数关系，所提出的静态电压稳定优化控制的三层优化模型就转化为单层非线性优化模型，可以直接调用商业优化求解器求解。本文采用Galerkin法求出λ_{mL}与各个控制变量之间关系的近似解析表达式。

2.1 Galerkin法

Galerkin法本质上是将系统方程在赋范空间上进行投影，并使残差最小化从而获得对目标表达式的最优逼近。其原理如下：假设待逼近的函数为$\boldsymbol{x}=\boldsymbol{x}(\boldsymbol{q})$，由隐函数$F(\boldsymbol{q},\boldsymbol{x})=0$决定，其中，$\boldsymbol{q}$为系统的参数变量，$\boldsymbol{x}$为系统的状态变量，$x_t$为$\boldsymbol{x}$的第$t$个分量。选定用于逼近的基底函数为$\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{q})$，则目标逼近表达式为

$$x_t^*=x_t^*(\boldsymbol{q})=\sum\nolimits_{s=1}^{N}c_{ts}\varphi_s(\boldsymbol{q}),t=1,2,\cdots,M \tag{18}$$

式中，M为系统状态变量的维数，N为选定的基底函数的个数，$\varphi_s(\boldsymbol{q})$表示逼近所使用的第$s$个基底函数，$c_{ts}$为第$t$个状态变量的第$s$个基底函数的系数。

定义内积为

$$\langle h_1(\cdot),h_2(\cdot)\rangle=\int_Q h_1(\boldsymbol{q})h_2(\boldsymbol{q})\mathrm{d}Q \tag{19}$$

式中，Q为积分区域。

将目标表达式(18)代入隐函数$F(\boldsymbol{q},\boldsymbol{x})=0$中，并利用式(19)定义的内积将其投影至选定的各个基底函数上，可以得到隐函数$F(\boldsymbol{q},\boldsymbol{x})=0$在各个基底上的投影，并令其等于0，即可得到一系列投影方程组，如下：

$$\int_Q\varphi_s(\boldsymbol{q})F(\boldsymbol{q},\boldsymbol{x}^*(\boldsymbol{q}))\mathrm{d}Q=0 \tag{20}$$

假设隐函数$F(\boldsymbol{q},\boldsymbol{x})=0$的维数和状态变量一样，有$M$维，则式(20)所决定的方程个数为$M\times N$，待求系数$c_{ts}$也有$M\times N$个，因此可以通过求解投影方程组式(20)获得待求目标逼近式(18)的展开式系数c_{ts}。

本文采取多项式函数作为基底函数。在Galerkin法中，要求所有的控制变量均为连续变量，因此

对于离散控制变量 Q_{ci},可以先将其看作连续变量,以求出其与被控量之间的近似解析函数关系,最后在求解转化后的单层优化控制模型时再将其取值限定为离散变量,即可获得满足实际运行要求的最优控制变量值。

2.2 将优化控制模型转化为单层优化模型求解

最内层优化问题指的是式(15)中的 $\max\limits_{x}\lambda$ 问题,该问题即为交直流混联电力系统当前运行状态下的SVSM计算问题。对于每一组确定的($\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}, \boldsymbol{U}_{\mathrm{G}}, \boldsymbol{Q}_{\mathrm{c}}, \boldsymbol{M}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{P}_{\mathrm{w}}$),最内层优化问题的解 $\lambda_{\max}=\max\limits_{x}\lambda$ 为一个确定的值。为求出 $\max\limits_{x}\lambda$ 问题的参数化形式 $\lambda_{\max}(\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}, \boldsymbol{U}_{\mathrm{G}}, \boldsymbol{Q}_{\mathrm{c}}, \boldsymbol{M}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{P}_{\mathrm{w}})$,将最内层优化模型的等式和不等式约束写为 $\boldsymbol{E}(\boldsymbol{q},\boldsymbol{x},\lambda)$ 和 $\boldsymbol{H}(\boldsymbol{q},\boldsymbol{x},\lambda)$,则最内层优化问题为

$$\begin{cases}\max\limits_{x,q}\lambda \\ \text{s.t.}\ \boldsymbol{E}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{q},\lambda)=0 \\ \quad H_{\min}\leqslant \boldsymbol{H}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{q},\lambda)\leqslant H_{\max}\end{cases} \tag{21}$$

式中,$\boldsymbol{q}=(\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}, \boldsymbol{U}_{\mathrm{G}}, \boldsymbol{Q}_{\mathrm{c}}, \boldsymbol{M}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{P}_{\mathrm{w}})$。

通过KKT条件,可以将求解最内层优化问题式(21)的最优解转化为求解以下非线性方程组问题:

$$\begin{cases}\nabla_{x,\lambda}\lambda-\nabla_{x,\lambda}\boldsymbol{E}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{q},\lambda)\boldsymbol{y}(\boldsymbol{q}) \\ -\nabla_{x,\lambda}\boldsymbol{H}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{q},\lambda)(\boldsymbol{z}(\boldsymbol{q})+\boldsymbol{w}(\boldsymbol{q}))=0 \\ \boldsymbol{E}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{q},\lambda)=0 \\ \boldsymbol{H}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{q},\lambda)-\boldsymbol{l}(\boldsymbol{q})-\boldsymbol{H}_{\min}=0 \\ \boldsymbol{H}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{q},\lambda)+\boldsymbol{u}(\boldsymbol{q})-\boldsymbol{H}_{\max}=0 \\ \boldsymbol{LZe}=0,\boldsymbol{UWe}=0 \\ l_i(\boldsymbol{q})\geqslant 0, u_i(\boldsymbol{q})\geqslant 0 \\ z_i(\boldsymbol{q})\geqslant 0, w_i(\boldsymbol{q})\leqslant 0\end{cases} \tag{22}$$

式中,$\boldsymbol{L}=\mathrm{diag}(l_1,l_2,\cdots,l_r)$,$\boldsymbol{U}=\mathrm{diag}(u_1,u_2,\cdots,u_r)$,$\boldsymbol{Z}=\mathrm{diag}(z_1,z_2,\cdots,z_r)$,$\boldsymbol{W}=\mathrm{diag}(w_1,w_2,\cdots,w_r)$,$r$ 为不等式约束 $\boldsymbol{H}(\boldsymbol{q},\boldsymbol{x},\lambda)$ 的维数,$\boldsymbol{e}$ 表示所有元素都为1的 r 维向量。

在方程组(22)中,含有4个不等式,不能直接当做方程组求解。可采用以下方程来代替这4个不等式:$l_i(\boldsymbol{q})=r_i^2(\boldsymbol{q})$,$u_i(\boldsymbol{q})=s_i^2(\boldsymbol{q})$,$z_i(\boldsymbol{q})=t_i^2(\boldsymbol{q})$,$w_i(\boldsymbol{q})=-v_i^2(\boldsymbol{q})$,此时式(22)的方程组变为

$$\begin{cases}\nabla_{x,\lambda}\lambda-\nabla_{x,\lambda}\boldsymbol{E}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{q},\lambda)\boldsymbol{y}(\boldsymbol{q}) \\ -\nabla_{x,\lambda}\boldsymbol{H}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{q},\lambda)(\boldsymbol{z}(\boldsymbol{q})+\boldsymbol{w}(\boldsymbol{q}))=0 \\ \boldsymbol{E}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{q},\lambda)=0 \\ \boldsymbol{H}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{q},\lambda)-\boldsymbol{l}(\boldsymbol{q})-\boldsymbol{H}_{\min}=0 \\ \boldsymbol{H}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{q},\lambda)+\boldsymbol{u}(\boldsymbol{q})-\boldsymbol{H}_{\max}=0 \\ \boldsymbol{LZe}=0,\boldsymbol{UWe}=0 \\ l_i(\boldsymbol{q})=r_i^2(\boldsymbol{q}), u_i(\boldsymbol{q})=s_i^2(\boldsymbol{q}), \\ z_i(\boldsymbol{q})=t_i^2(\boldsymbol{q}), w_i(\boldsymbol{q})=-v_i^2(\boldsymbol{q})\end{cases} \tag{23}$$

此时只要选定一组基底 $\varphi_s(\boldsymbol{q})$,即可将方程组式(23)投影至各个基底上,得到如式(20)的投影方程组,并解出目标表达式 $\lambda_{\max}(\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}, \boldsymbol{U}_{\mathrm{G}}, \boldsymbol{Q}_{\mathrm{c}}, \boldsymbol{M}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{P}_{\mathrm{w}})$ 的各个基底函数的系数。

对内层优化问题进行参数化逼近后,得到解析表达式 $\lambda_{\max}(\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}, \boldsymbol{U}_{\mathrm{G}}, \boldsymbol{Q}_{\mathrm{c}}, \boldsymbol{M}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{P}_{\mathrm{w}})$,则式(15)的双层优化问题可以转化为以下的单层优化问题:

$$\lambda_{\mathrm{mL}}=\begin{cases}\min\limits_{P_{\mathrm{w}}}\lambda_{\mathrm{m}} \\ \text{s.t.}\ \lambda_{\mathrm{m}}=\lambda_{\max}(\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}, \boldsymbol{U}_{\mathrm{G}}, \boldsymbol{Q}_{\mathrm{c}}, \boldsymbol{M}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{P}_{\mathrm{w}}) \\ \quad \boldsymbol{P}_{\mathrm{wmin}}\leqslant \boldsymbol{P}_{\mathrm{w}}\leqslant \boldsymbol{P}_{\mathrm{wmax}}\end{cases} \tag{24}$$

同样地,对式(24)中层优化问题的KKT条件对应的代数方程组再进行参数化求解,即可得到SVSM区间下界与各个控制变量之间关系的解析表达式 $\lambda_{\mathrm{mL}}(\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}, \boldsymbol{U}_{\mathrm{G}}, \boldsymbol{Q}_{\mathrm{c}}, \boldsymbol{M}, \boldsymbol{\theta})$。

在中层优化问题进行参数化逼近后,约束式(14)可直接写成关于控制变量函数的不等式如下:

$$\lambda_{\mathrm{mL}}(\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}, \boldsymbol{U}_{\mathrm{G}}, \boldsymbol{Q}_{\mathrm{c}}, \boldsymbol{M}, \boldsymbol{\theta})\geqslant\lambda_0 \tag{25}$$

从而使得整个优化控制问题转化为可以直接求解的单层优化模型。

因此,转化后的含风电场的交直流混联电网静态电压稳定优化控制的单层优化模型,包括式(1)~(13)和式(25)。该模型是混合整数非线性规模模型,可采用成熟的商业优化软件GAMS中的SBB求解器进行求解[15]。

2.3 通过高阶混合导数去除交叉项

采用多项式作为基底函数,当系统参数的数量增加时,近似多项式中交叉项的数量将会大幅增加,这使得待求系数与对应投影方程数目都大幅增加,算法的计算量也大幅增加。因此,本文通过求取SVSM对控制变量的高阶混合导数来去除近似

多项式中的冗余交叉项,从而降低算法所需的计算时间。

在近似多项式中,交叉项代表着多个自变量对因变量的共同作用。若2个控制变量对SVSM影响的共同作用小到几乎可以忽略,此时所对应的交叉项则可以从近似多项式中删去。以二次交叉项为例,二阶混合导数的绝对值大小可以衡量对应2个变量对SVSM影响的共同作用大小。假设去掉冗余交叉项前的因变量为λ_{m},去掉冗余交叉项后的因变量为λ'_{m},被去除的冗余交叉项集合为S,则有:

$$|\lambda-\lambda'|=\left|\sum_{S}a_{ij}x_ix_j\right|\approx\left|\sum_{S}\frac{\partial^2\lambda}{\partial x_i\partial x_j}x_ix_j\right|\leqslant \sum_{S}\left|\frac{\partial^2\lambda}{\partial x_i\partial x_j}x_ix_j\right|\leqslant\sum_{S}\left|\frac{\partial^2\lambda}{\partial x_i\partial x_j}x_{i\max}x_{j\max}\right| \tag{26}$$

根据式(26),只要选定能接受的最小误差$d=|\lambda-\lambda'|$,将各个交叉项对应的$\left|\dfrac{\partial^2\lambda}{\partial x_i\partial x_j}x_{i\max}x_{j\max}\right|$值从小到大排列,并依次求和,直至其和等于$d$时结束,此时剩余的交叉项为保留项,被求和的交叉项整体的贡献小于最小误差d,因此可以被忽略。高次交叉项情况同理。

3 算例分析

以修改的IEEE 39节点交直流混联系统为例进行仿真计算。该系统是在IEEE 39节点系统基础上将交流线路14-4改为常规LCC直流输电线路,将交流线路11-6和11-12改为三端柔性直流输电系统,并在节点9接入一个风电场,如图1示。风电场有功出力波动范围为[540,1 460] MW,运行功率因数为1.0。5个无功补偿装置的安装节点为21~25,容量的上限和下限为400 Mvar和0 Mvar,每档容量为100 Mvar。常规LCC直流输电线路电阻$R_{\mathrm{dc}}=0.02$ p.u.,换流站的换相电抗为$X_{\mathrm{c}}=0.1$ p.u.;整流侧换流变的变比为1.0,逆变侧换流变的变比为1.05;换流器控制角θ_i的上限和下限为15°和8°。三端VSC直流输电系统中的3个VSC直流线路电阻均为$R_{\mathrm{dc}}=0.01$ p.u.,换流站等效电纳为15 p.u.;调制度M_i取值的上/下限为1和0.8;相角差δ_i取值的上限和下限为5°和0°。交流节点电压的上限和下限为1.1 p.u.和0.9 p.u.。

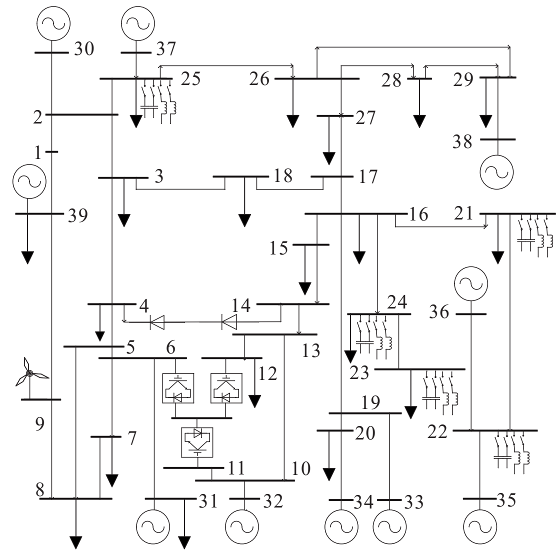

图1　修改的IEEE 39节点系统

Figure 1　Modified IEEE 39 nodes system

3.1 参数化逼近的结果验证

对最内层优化问题进行多项式逼近计算,选择多项式作为基底函数,其逼近展开式如下:

$$\lambda_{\mathrm{m}}=\sum_{s=1}^{N_1}k_s\varphi_s(\boldsymbol{P}_G,\boldsymbol{U}_G,\boldsymbol{Q}_c,\boldsymbol{M},\boldsymbol{\theta},\boldsymbol{P}_w) \tag{27}$$

其中,N_1为最内层参数化所选取的基底函数的数量,由参数的数量确定。当选择三次多项式作为基底函数,由于参数变量包括除平衡节点外9个发电机的当前有功出力和端电压参考值、5个无功补偿装置出力、2个LCC直流换流站的控制角$\boldsymbol{\theta}$、3个VSC直流换流站的占空比和风电场有功出力,总数量为29,故$N_1=C_{29}^0+C_{29}^1+C_{29}^2+C_{29}^3=4\ 090$。同时采用文2.3节方法,给定误差$d=10^{-4}$,去除冗余交叉项,最终剩下841个基底函数。对于去除冗余交叉项前后的2种情况,分别随机选取1 000个样本点作为多项式逼近展开式(27)的精度验证。以每个样本点代入求解确定性优化模型(即式(15)中的$\max\limits_{x}\lambda$内层最优潮流模型)得到的SVSM计算结果为基准,计算多项式逼近展开式得到的SVSM与基准值之间的误差,结果如表1所示。可以看出,所得到的多项式逼近展开式都有着比较高的计

算精度，特别是选择三次多项式逼近时，去除冗余交叉项前的平均误差小于 10^{-4}。并且，随着所选择的多项式次数的增加，逼近展开式的计算精度也越来越高，不过，计算量和计算时间也会相应增加。而采用文 2.3 节的方法去除冗余交叉项后，计算时间比去除交叉项前有了很明显的减少，并且最大误差和平均误差也在可接受范围内，这表明了所提出去除冗余交叉项以提高计算效率方法的有效性。另外，为了提高本文算法的实用性，本文还通过灵敏度计算的方法筛选关键控制变量，进一步降低模型的规模和计算耗时。在风电场出力波动区间中心值对应的静态电压稳定极限点处，计算 SVSM 对于各个控制变量的灵敏度[16]，并选取灵敏度绝对值最大的 10 个变量。由表 1 可以看出，结合灵敏度筛选关键控制变量以及去除交叉项后，最内层参数化的时间大幅减小，而计算的误差相对也还在可接受范围以内，这表明了灵敏度筛选的可行性。

表 1　最内层优化参数化的 SVSM 计算结果与计算时间

Table 1　Parameterized SVSM calculation results and calculation time of the inner-layer optimization

多项式次数	最大误差	平均误差	计算时间/s
2	0.082 6	0.041 5	4 871.85
2(去交叉项)	0.129 3	0.063 6	1 045.94
2(灵敏度筛选)	0.093 3	0.050 3	68.73
3	2.989×10^{-4}	7.515×10^{-5}	48 234.21
3(去交叉项)	8.599×10^{-4}	1.543×10^{-4}	7 229.07
3(灵敏度筛选)	3.043×10^{-4}	8.586×10^{-5}	336.51

接着对最中层优化问题进行多项式逼近计算，同样选择多项式作为基底函数，其逼近展开式如下：

$$\lambda_{\mathrm{mL}}=\sum_{s=1}^{N_2} l_{1s}\varphi_s(\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}},\boldsymbol{U}_{\mathrm{G}},\boldsymbol{Q}_{\mathrm{c}},\boldsymbol{M},\boldsymbol{\theta}) \tag{28}$$

其中，N_2 为中间层参数化所选取的基底函数的数量，由参数变量的数量确定。当选择 3 次多项式作为基底函数，由于参数变量的数量为 28，$N_2=C_{28}^0+C_{28}^1+C_{28}^2+C_{28}^3=3\,683$。同样给定误差 $d=10^{-4}$，去除冗余交叉项，最终剩下 703 个基底函数。分别随机选取 1 000 个样本点作为多项式逼近展开式(28)的精度验证。计算多项式逼近展开式得到的 SVSM 波动区间下界与基准值之间的误差，结果如表 2 所示。可以看出，当选择三次多项式逼近时，所得到的逼近展开式的计算精度比较高；同样，随着所选择的多项式次数的增加，计算精度越来越高，不过计算时间也会相应增加。而采用文 2.3 节的方法去除冗余交叉项后，计算时间同样比去除交叉项前有了很明显的减少，而且取三次多项式的情况下，最大误差和平均误差依然在可接受范围以内。同样，加入灵敏度筛选关键控制变量之后，中间层的计算时间比原来小，而精度则没有受到太大的影响，这证实了灵敏度筛选的可行性和有效性。

表 3 为静态电压稳定优化控制计算时间的对比。可以看出，结合灵敏度筛选关键控制变量以及去除交叉项后，采用三次多项式逼近的整个优化控制计算过程的耗时可以被降至 640.01 s，即只需 10 min 左右，能够满足实际应用的要求。

表 2　中层优化参数化的 SVSM 下界计算结果与计算时间

Table 2　Parameterized lower bound of SVSM calculation results and calculation time of the middle-layer optimization

多项式次数	最大误差	平均误差	计算时间/s
2	0.042 5	0.012 1	3 124.45
2(去交叉项)	0.109 8	0.033 7	889.32
2(灵敏度筛选)	0.056 8	0.029 6	55.46
3	1.858×10^{-4}	4.117×10^{-5}	28 845.32
3(去交叉项)	4.699×10^{-4}	2.332×10^{-4}	5 377.74
3(灵敏度筛选)	2.605×10^{-4}	4.976×10^{-5}	288.95

表 3　计算时间的对比

Table 3　Computation time comparison

多项式次数	近似时间/s	优化时间/s	总时间/s
2	7 996.30	8.35	8 004.65
2(去交叉项)	1 935.26	3.79	1 939.05
2(灵敏度筛选)	124.19	1.56	125.75
3	77 079.53	57.19	77 136.72
3(去交叉项)	12 606.81	34.72	12 641.53
3(灵敏度筛选)	625.46	14.55	640.01

3.2 优化控制结果分析

经过上述两层多项式逼近计算之后，整个优化控制模型转化为单层优化混合整数非线性规模模型，此时可采用SBB求解器进行求解。当采用三次多项式逼近时，给定$\lambda_0=0.20$，优化计算结果如表4所示。可以看出，优化前，系统在风电出力不确定波动情况下的最低SVSM只有0.185 4，不能满足给定的大于0.20的安全运行要求。而优化后，系统在风电出力不确定波动情况下的最低SVSM提升为0.200 2，满足了给定的大于0.20的安全运行要求，这表明了所提方法能够获得在风电出力不确定波动范围内对应的系统SVSM波动范围都满足安全运行要求的优化控制方案。同时可以看出，系统在风电出力为波动区间中心值时的SVSM对比优化前也有了提升，表明了优化控制后系统的整体静态电压稳定程度都有一定的提升。

优化控制方案中各个控制变量的值与优化前比较如表5~7所示。从表5可以看出，优化后发电机30~38的有功出力均有了一定程度的提升，以减小风电场附近平衡发电机39的有功出力，从而保留更大的有功调节能力以应对风电场出力的不确定波动，使得系统SVSM波动区间下界上升。从表5、6可以看出，优化后系统的发电机机端电压与无功补偿装置出力大体上都是增加的。这是因为这两者的提升可以给交直流混联电网提供更多的无功功率支撑，提升系统SVSM水平。从表7可以看出，优化后LCC直流换流站的控制角减小，VSC直流换流站的调制比增大，从而增大直流电压，减小直流线路的有功网损，提高系统能够承担的负荷增长量，即提升系统SVSM水平。

表4　优化前、后系统的SVSM对比

Table 4　Comparison of the normal SVSM and the lowest SVSM of the system before and after optimization

风电中心值的SVSM		SVSM区间下界	
优化前	优化后	优化前	优化后
0.237 1	0.264 4	0.185 4	0.200 2

表5　优化前、后发电机有功出力与机端电压对比

Table 5　Comparison of generator active output and terminal voltage before and after optimization　p.u.

发电机节点编号	有功出力		机端电压	
	优化前	优化后	优化前	优化后
30	2.50	2.64	1.047	1.051
31	10.00	10.45	1.030	1.036
32	6.50	6.80	0.983	0.992
33	6.32	6.61	0.997	1.005
34	5.08	5.32	1.012	1.019
35	6.50	6.80	1.049	1.026
36	5.60	5.87	1.063	1.066
37	5.40	5.66	1.027	1.033
38	8.30	8.68	1.026	1.032

表6　优化前、后无功补偿装置出力对比

Table 6　Comparison of reactive power compensation device output before and after optimization

无功补偿装置节点	优化前无功出力/p.u.	优化后无功出力/p.u.
21	0	2
22	0	1
23	0	1
24	0	0
25	0	1

表7　优化前、后LCC控制角与VSC调制比结果对比

Table 7　Comparison of LCC control angle and VSC modulation ratio before and after optimization

节点	LCC控制角θ/(°)		VSC调制比M	
	优化前	优化后	优化前	优化后
4	11.25	8.00	—	—
14	10.67	8.00	—	—
6	—	—	0.842	0.860
11	—	—	0.828	0.833
12	—	—	0.826	0.816

表8为给定不同的λ_0取值下优化控制的计算结果对比。可以看出，当安全阈值λ_0取0.15时，由于原系统的SVSM区间下界为0.185 4，因此不需要调整控制变量即可满足要求，此时的控制成本为0。而随着给定λ_0的上升，优化控制后系统的SVSM区间范围下界均能够满足给定的安全运行要求。同时可以看出，随着阈值λ_0的上升，控制成

本也不断上升，这是因为系统需要调节更多的参数使得SVSM区间范围下界满足逐步提高的安全阈值要求。

表8　不同λ_0值下的优化控制计算结果对比

Table 8　Comparison of optimal control calculation results under different λ_0 values

λ_0	λ_{mL}	控制成本
0.15	0.185 4	0.000
0.20	0.200 2	4.02 1
0.25	0.251 1	5.845
0.30	0.300 3	7.22 6

3.3　不同负荷水平下的优化控制效果比较

由于在电力系统的日常运行中，负荷不是一个确定的值，而是一个随着时间发生变化的量。当负荷随时间发生变化时，优化控制方案也需要相应地发生改变来确保SVSM满足安全运行要求。当安全阈值λ_0取0.2时，负荷随时间变化的不同水平下的优化控制结果如表9所示。可以看出，随着负荷水平的上升，所提出的静态电压稳定优化控制方法都能够使得SVSM区间下界上升至大于给定的阈值，满足系统安全运行要求，不过需要付出的控制成本也会相应增大。从计算时间上看，本文所提出的方法能够在15 min内完成计算，能够满足实际运行的要求。

表9　不同负荷水平下的优化结果对比

Table 9　Comparison of optimization results under different load levels

负荷百分比	优化前的SVSM区间下界	优化后的SVSM区间下界	控制成本	计算时间/s
1.000	0.185 4	0.200 2	4.021	640.01
1.025	0.149 5	0.200 2	5.744	636.55
1.050	0.119 8	0.201 0	8.226	652.49
1.075	0.743 3	0.200 1	9.271	644.87
1.100	0.065 1	0.200 7	10.723	678.11

4　结语

提出了考虑风电场出力不确定波动的交直流混联电网静态电压稳定优化控制方法，并通过修改的IEEE 39节点交直流混联系统的算例分析得到如下结论：

1）所建立的考虑风电场出力不确定波动的交直流混联电网静态电压稳定优化控制模型，能够获得在风电出力不确定波动范围内对应的系统SVSM波动范围都满足安全运行要求的优化控制方案。

2）通过多项式逼近的Galerkin方法对内层和中层优化模型逐层进行参数化逼近，可以获得具有较高精度的SVSM区间下界与各个控制变量之间关系的解析表达式，从而将三层优化模型转化为单层优化模型求解。

3）采用高阶混合导数去除近似多项式中的冗余交叉项，从而有效降低运算规模，提高模型求解的计算效率。

当风电场出力的波动范围较大时，本文所提出的方法有可能会出现无法求解出满足系统安全运行的控制方案，此时只能通过切除部分风机来减小风电场出力的波动范围，以确保系统在风电场出力不确定波动下的安全运行。因此，如何在本文所提出的优化控制模型基础上加入切除风机的控制，将是值得继续深入研究的问题。另外，当应用于实际大电网时，本文所提出的方法可能会出现运算时间过长的问题，因此如何提升本文方法应用于实际大电网时的计算效率则是下一步研究方向。

参考文献：

[1]　马喜平，何世恩，姚寅，等．计及风速不确定性及相关性的风电场分区虚拟惯量估计[J]．电力系统保护与控制，2022,50(10):123-131.

MA Xiping, HE Shien, YAO Yin, et al. Virtual inertia estimation of wind farm zones with wind speed uncertainty and correlation[J]. Power System Protection and Control,2022,50(10):123-131.

[2]　鲍颜红，张金龙，衣立东，等．含大规模风电电力系统的安全稳定风险预防控制方法[J]．电力系统自动化，2022,46(13):187-194.

BAO Yanhong, ZHANG Jinlong, YI Lidong, et al.

Prevention and control method of security and stability risk for power system with large-scale wind power integration[J].Automation of Electric Power Systems,2022,46(13):187-194.

[3] LIN S J,YANG Y R,LIU M B,et al.Static voltage stability margin calculation of power systems with high wind power penetration based on the interval optimisation method[J].IET Renewable Power Generation,2020,14(10):1728-1737.

[4] 赵伟,黄子洋,潘艳,等.直流馈入的高比例新能源受端电网静态电压稳定分析[J].华北电力大学学报(自然科学版),2022,49(6):11-19.
ZHAO Wei,HUANG Ziyang,PAN Yan,et al.Static voltage stability analysis of receiving-end grid with DC infeed high penetration renewable energy[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition),2022,49(6):11-19.

[5] 潘学萍,李乐,黄华,等.直流馈入的高比例新能源受端电网静态电压稳定分析[J].电力自动化设备,2021,39(3):1-8.
PAN Xueping, LI Le, HUANG Hua, et al. Method for evaluating voltage weak area of AC power system at DC receiving end considering sensitivity and static voltage stability margin[J].Electric Power Automation Equipment,2021,39(3):1-8.

[6] 姜涛,李雪,李国庆,等.含多端柔性直流的交直流电力系统静态电压稳定域构建方法[J].电工技术学报,2022,37(7):1746-1759.
JIANG Tao,LI Xue,LI Guoqing,et al.A predictor-corrector algorithm for forming voltage stability region of hybrid AC/DC power grid with inclusion of VSC-MTDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7):1746-1759.

[7] 马瑞,刘振磊,贺平平,等.考虑源荷频率特性的含风电交直流系统概率连续潮流方法[J].电力系统自动化,2020,44(6):27-36.
MA Rui, LIU Zhenlei, HE Pingping, et al. Probabilistic continuous power flow method for AC/DC systems with wind power considering frequency characteristics of source and load[J].Automation of Electric Power Systems,2020,44(6):27-36.

[8] 陈刚,刘万彬,杨悦荣,等.考虑新能源不确定波动的交直流混联电网静态电压稳定裕度区间计算[J].电网技术,2023,47(3):1127-1137.
CHEN Gang, LIU Wanbin, YANG Yuerong, et al. Calculation of static voltage stability margin interval for AC/DC hybrid power system considering the uncertainty of renewable energy[J].Power System Technology,2023,47(3):1127-1137.

[9] ZHOU Y Z, WU H, GU C H, et al. Global optimal polynomial approximation for parametric problems in power systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2019,7(3):500-511.

[10] XIA B Q,WU H,QIU Y W,et al.A Galerkin method-based polynomial approximation for parametric problems in power system transient analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2019,34(2):1620-1629.

[11] ZHOU Y Z, WU H, GU C H, et al. A novel method of polynomial approximation for parametric problems in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2017,32(4):3298-3307.

[12] QIU Y W, WU H, ZHOU Y Z, et al. Global parametric polynomial approximation of static voltage stability region boundaries[J].IEEE Transactions on Power Systems,2017,32(3):2362-2371.

[13] QIU Y W,WU H,SONG Y H,et al.Global approximation of static voltage stability region boundaries considering generator reactive power limits[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(5):5682-5691.

[14] LIN S J,YANG Y R,LIU M B,et al.Static voltage stability margin calculation of power systems with high wind power penetration based on the interval optimization method[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(10):1728-1737.

[15] GAMS.GAMS User's Guide[EB/OL].[2021-02-03].https://www. gams. com/latest/docs/UG_ModelSolve. html#UG_ModelSolve_SolveStatement.

[16] 卢苑,林舜江,刘明波,等.考虑风电场出力波动区间的电力系统静态电压稳定裕度计算[J].电力系统自动化,2018,42(8):92-100.
LU Yuan,LIN Shunjiang,LIU Mingbo,et al.Computation of static voltage stability margin for power system considering fluctuation interval of wind farm output[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(8):92-100.