

引用格式:黄松强,陈明佳,杨海亮,等.基于MC-MSDARL和PSO-BA的直流换流站无功控制优化方法[J].电力科学与技术学报,2024,39(6):43-52.  
Citation: HUANG Songqiang, CHEN Mingjia, YANG Hailiang, et al. Optimization method for reactive power control of DC converter stations based on MC-MSDARL and PSO-BA [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 43-52.

# 基于 MC-MSDARL 和 PSO-BA 的直流 换流站无功控制优化方法

黄松强<sup>1</sup>, 陈明佳<sup>1</sup>, 杨海亮<sup>1</sup>, 孙上元<sup>1</sup>, 王永平<sup>2</sup>, 王杨正<sup>2</sup>

(1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司柳州局, 广西 柳州 545006; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:**随着直流输电工程规模的不断扩大,交直流互联系统给电网暂态电压恢复带来了一定的挑战。为了解决换流站受电压波动影响导致换流变分接开关频繁动作的问题,提出一种基于多通道融合、多尺度动态自适应残差学习(multi channel fusion and multi-scale dynamic adaptive residual learning, MC-MSDARL)和粒子群蝙蝠算法(particle swarm optimization-bat algorithm, PSO-BA)的直流换流站无功控制优化方法。首先,开展换流站暂态过压特性研究,分析交流滤波器、无功补偿设备以及调相机对暂态过压的影响;然后,通过多尺度动态自适应残差卷积方式动态自动更新卷积核大小,提高模型学习能力,映射直流系统运行状态和电压稳定的关系,构建电压暂态稳定预测模型;最后,建立减小电压波动和降低网络损耗的直流换流站无功控制优化模型,利用 PSO-BA 进行模型求解。通过 PSASP 搭建直流电网进行仿真验证,实验结果表明,所提方法提高了电压暂态稳定能力,有效解决了换流变分接开关频繁动作的问题。

**关键词:**直流输电工程;换流站;卷积神经网络;粒子群蝙蝠算法;无功控制

**DOI:** 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.06.005 **中图分类号:** TM723 **文章编号:** 1673-9140(2024)06-0043-10

## Optimization method for reactive power control of DC converter stations based on MC-MSDARL and PSO-BA

HUANG Songqiang<sup>1</sup>, CHEN Mingjia<sup>1</sup>, YANG Hailiang<sup>1</sup>, SUN Shangyuan<sup>1</sup>,  
WANG Yongping<sup>2</sup>, WANG Yangzheng<sup>2</sup>

(1. Liuzhou Bureau of EHV Transmission Company, China Southern Power Grid Co., Ltd., Liuzhou 545006, China;

2. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** As the scale of direct current (DC) transmission projects continues to expand, the alternating current (AC) -DC interconnection system has brought certain challenges to the transient voltage recovery capability of the power grid. In order to reduce frequent operations of tap changers of converter transformers caused by voltage fluctuations in converter stations, an optimization method for reactive power control of DC converter stations based on multi-channel fusion and multi-scale dynamic adaptive residual learning (MC-MSDARL) and particle swarm optimization-bat algorithm (PSO-BA) is proposed. Firstly, research is conducted on the transient overvoltage characteristics of the converter stations, and the impact of AC filters, reactive power compensation equipment, and phase-shifting cameras on transient overvoltage is analyzed. Then, the multi-scale dynamic adaptive residual convolution method is used to dynamically update the size of the convolution kernel, improve the model's learning ability, map the relationship between the operating state of the DC system and voltage stability, and construct a transient voltage stability prediction model. Finally, an optimization model for reactive power control of DC converter stations is established to reduce

收稿日期:2023-09-28;修回日期:2023-12-11

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(CGJKJXM20220102)

通信作者:黄松强(1989—),男,高级工程师,主要从事电力系统稳定分析、直流输电技术研究;E-mail:hsongqiang12@126.com

voltage fluctuations and network losses, and the PSO-BA is used to solve the model. PSASP is employed to build a DC power grid for simulation verification, and the experimental results show that the proposed method improves the transient voltage stability capability and effectively reduces frequent operations of tap changers of converter transformers.

**Key words:** direct current transmission project; converter station; convolutional neural network; particle swarm optimization-bat algorithm; reactive power control

随着近年来直流输电技术的广泛应用,大容量直流功率外送和分布式电源接入集中的特征在电网中体现得越来越明显,“强直弱交”的问题日益凸显<sup>[1-3]</sup>。交流电网结构薄弱、分布式电源接入比例较大导致无功功率对电网电压支撑不足,电压波动对直流电网安全稳定带来了一定的挑战<sup>[4-13]</sup>。单双极闭锁、换相失败、线路故障等扰动会造成换流站暂态过压,换流站变压器为了使直流电压保持在合理范围内,会频繁动作,生成的电弧严重影响触头寿命,进而严重影响变压器的安全运行<sup>[14-17]</sup>。研究直流输电线路无功优化控制技术可提高电压调节能力,进而提升电网的安全稳定运行水平<sup>[18-20]</sup>。

关于直流无功优化控制的研究已经受到关注。文献[21-22]针对调相机在不同状态下的自动电压控制策略进行了研究,通过提高无功储备和调节静态无功补偿装置的方式实现了暂态电压恢复。文献[23]提出基于轨迹灵敏度的电网暂态电压稳定性分析技术;当电压失稳时,文献[24]通过协调调相机、直流功率以及切负荷进行电压失稳紧急控制,控制过程以代价最小、灵敏度最优为原则。文献[25]研究稳态无功输出对电压恢复的影响,结果表明,减少补偿电容数量和提高发电机无功的方式有利于电压快速恢复。文献[26]提出基于调相机输出的无功优化方法,提高了换流站暂态电压稳定性。文献[27]将调相机同换流站无功设备、发电机无功输出结合起来,实现电压稳定控制。

随着直流输电线路规模提升,调节设备数量快速增加,上述物理建模方法更加复杂,计算时间更长,应对短时电压波动的无功优化方法效果欠佳。随着通信技术和传感技术近年来的发展,利用数据驱动进行无功优化的方法获得广泛关注。文献[28-29]通过历史数据实现模型的训练,学习运行状态和无功策略之间的关系。深度学习具有很强的非线性学习能力,在无功优化中得到了一定的应用。文献[30]提出基于深度Q网络的无功优化方法,实现电网不平衡下的无功最优控制。文献[31]提出基于极限学习机(extreme learning machine, ELM)的无功设备补偿策略。文献[32]提出基于深

度信念网络(deep belief network, DBN)的无功调度策略,学习电网运行状态和无功控制关系。卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)具有特征学习能力强、参数共享的优势,基于此,文献[33-35]将CNN应用于无功优化中,通过调节本地光伏输出功率实现无功控制。然而,面对直流换流站无功控制优化问题时,CNN结构复杂、卷积核尺寸固定,模型训练效果欠佳。

本文将多通道融合、多尺度动态自适应残差学习(multi channel fusion and multi-scale dynamic adaptive residual learning, MC-MSDARL)和粒子群蝙蝠算法(particle swarm optimization-bat algorithm, PSO-BA)结合起来,提出一种基于MC-MSDARL和PSO-BA的直流换流站无功控制优化方法。本文分析换流站暂态过压特性,对交流滤波器、无功补偿设备以及调相机对暂态过压的影响进行研究;通过多尺度动态自适应残差卷积方式,动态地自动更新卷积核大小,提高模型学习能力,映射直流系统运行状态和电压稳定的关系,构建电压暂态稳定预测模型;建立减小电压波动和降低网络损耗的直流换流站无功控制优化模型,利用PSO-BA进行模型求解;通过PSASP程序搭建直流电网进行仿真验证,实验结果表明,所提方法提高电压暂态稳定能力,有效解决换流变分接开关频繁动作的问题。

## 1 直流电网暂态过电压特性

### 1.1 特性分析

换流站过压主要是由交流电网短路容量和交换无功变化量决定的,计算如下:

$$\Delta U = \Delta Q / S_C \quad (1)$$

式中, $\Delta U$ 为换流站电压变化; $S_C$ 为短路容量; $\Delta Q$ 为交换无功变化量。

$$\Delta Q = \Delta Q_{\text{conv}} + \Delta Q_{\text{rpc}} \quad (2)$$

式中, $\Delta Q_{\text{conv}}$ 为故障前的无功消耗变化; $\Delta Q_{\text{rpc}}$ 为无功补偿装置无功变化,调相机无功变化为次暂态时的出力变化。静止无功补偿装置无功变化和电压平方变化有关,其计算公式如下:

$$\Delta Q_{ACF} = (U_H^2 - U^2) Q_{ACF} \quad (3)$$

式中,  $\Delta Q_{ACF}$  为静止无功补偿装置无功变化;  $U$  为故障发生之前的电压;  $U_H$  为故障发生之后的暂态电压;  $Q_{ACF}$  为静止无功补偿装置无功。

## 1.2 暂态过压影响分析

### 1) 无功补偿分布。

无功补偿分布包含无功补偿设备数量以及交流滤波器补偿容量。从式(2)、(3)可知,发生故障时消耗的无功容易引发暂态过压现象,静止无功补偿装置的无功被动地随着电压变化而变化,因此无功补偿设备和交流滤波器对暂态过压具有一定的影响,但影响不大。

### 2) 调相机。

调相机等效为电势不变的电压源,发出的无功计算如下:

$$Q_{sc} = \frac{U(E_q'' - U)}{X_d'' + X_T} \quad (4)$$

式中,  $Q_{sc}$  为调相机的无功输出;  $E_q''$ 、 $X_d''$  分别为调相机电势和次暂态电抗;  $X_T$  为升压变压器阻抗。

调相机无功变化如下:

$$\Delta Q_{sc} = \frac{U^2 - U_H^2 + E_q''(U_H - U)}{X_d'' + X_T} \quad (5)$$

式中,  $\Delta Q_{sc}$  为调相机无功变化。

调相机进相运行时,能够有效抑制暂态过压;调相机滞相运行时,可代替部分滤波器起到无功补偿的作用,也能够有效抑制暂态过压。

## 2 电压暂态稳定预测

传统的电压暂态稳定预测主要是通过机理建模得出的,然而该方法预测时间长、准确率低、在线使用效果较差。人工智能的方法不需要复杂的机理建模便可实现非线性映射,可挖掘数据特征建立直流系统运行状态和电压暂态稳定之间的关系。本文通过优化交流滤波器、无功补偿设备以及调相机输出来提高电压稳定性,研究基于MC-MSDARL直流系统电压稳定预测方法。

### 2.1 预测模型输入

电压暂态稳定的标志是受到故障扰动通过无功控制后电压能够恢复到允许的范围。直流系统无功控制和运行状态有关,当系统运行状态确定时,就会得出电压暂态稳定性情况,因此本文基于深度学习将运行状态和电压暂态稳定性的关系映射出来。预测模型输入如表1所示,模型输入相量维度为  $2k+4$ ,其中  $k$  为直流系统节点个数。

表1 电压暂态稳定预测模型输入

Table 1 Input of transient voltage stability prediction model

编号	内容
1~ $k$	节点有功功率
$k+1$ ~ $2k$	节点无功功率
$2k+1$	母线电压平均幅值
$2k+2$	母线电压平均相位
$2k+3$	换流阀触发角
$2k+4$	换流阀熄弧角

### 2.2 电压暂态稳定预测建模

#### 1) 多尺度动态自适应卷积。

常规的CNN卷积核尺寸固定,对时间尺度的复杂电网数据特征提取能力不足,本文采用多尺度动态自适应卷积方式提高数据挖掘能力。多尺度动态自适应卷积过程如图1所示。

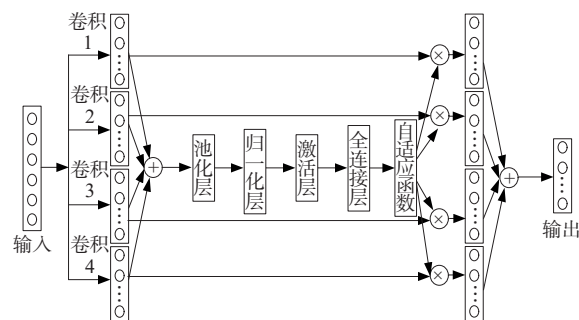


图1 多尺度动态自适应卷积过程

Figure 1 Process of multi-scale dynamic adaptive convolution

利用多尺度卷积能够提高模型计算效率和增强多时间尺度数据挖掘能力。特征融合输入相量经过池化、归一化以及激活操作后得到新的特征表达式为

$$Z = f(\Re(X_{\max})) \quad (6)$$

式中,  $Z$  为激活层后的输出特征;  $X_{\max}$ 、 $\Re$ 、 $f$  分别为最大池化、归一化、激活操作。

通过全连接和自适应函数操作得到各个分量权重大小,过程为

$$\begin{cases} a_s = \frac{e^{A,Z}}{e^{A,Z} + e^{B,Z} + e^{C,Z} + e^{D,Z}} \\ b_s = \frac{e^{B,Z}}{e^{A,Z} + e^{B,Z} + e^{C,Z} + e^{D,Z}} \\ c_s = \frac{e^{C,Z}}{e^{A,Z} + e^{B,Z} + e^{C,Z} + e^{D,Z}} \\ d_s = \frac{e^{D,Z}}{e^{A,Z} + e^{B,Z} + e^{C,Z} + e^{D,Z}} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $a_s$ 、 $b_s$ 、 $c_s$ 、 $d_s$  和  $A_s$ 、 $B_s$ 、 $C_s$ 、 $D_s$  分别为各个输入分量权重大小和权重系数。

各个分量对应的卷积核相乘的结果再相加,可输出最终特征向量,自适应动态调整所有卷积核权值,计算过程为

$$\begin{cases} Y = a_s X_1 + b_s X_2 + c_s X_3 + d_s X_4 \\ a_s + b_s + c_s + d_s = 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中, $Y$ 为输出向量; $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 为输入。

## 2) 多尺度动态自适应残差网络。

常规的CNN容易发生梯度爆炸或消失的问题,本文引入残差网络,形成如图2所示的多尺度动态自适应残差结构。

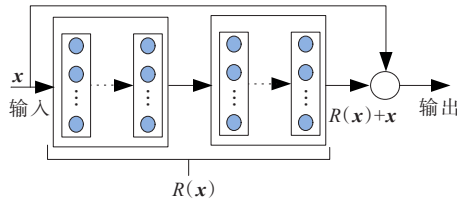


图2 多尺度动态自适应卷积过程

Figuer 2 Process of multi-scale dynamic adaptive convolution

残差网络结构层数为2,计算过程为

$$F(x) = M_2(M_1(x)) + x = R(x) + x \quad (9)$$

式中, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为输入数据; $R(x)$ 、 $F(x)$ 分别为残差卷积神经网络输出和整个网络输出; $M_1(x)$ 、 $M_2(x)$ 分别为第1层、第2层多尺度动态自适应卷积函数。

以 $M_1(x)$ 为例,通过式(8)可知:

$$M_1(x) =$$

$$a_s w_1 x + b_s w_2 x + c_s w_3 x + d_s w_4 x = W_1 x \quad (10)$$

式中, $w_i (i=1, 2, 3, 4)$ 为各个多尺度动态自适应卷积的权值矩阵。

每层残差结构计算为

$$F(x) = R(x, \{W_i\}) + x \quad (11)$$

从式(11)可知,加深残差网络结构,并没有提高网络参数,也没有提高计算量,可有效解决梯度爆炸或消失的问题。

本文研究的基于MC-MSDARL直流系统电压稳定预测方法的模型求解过程如下。

1) 数据预处理。对输入数据——节点有功功率、节点无功功率、母线电压平均幅值、母线电压平均相位、换流阀触发角、换流阀熄弧角进行归一化处理。

2) 确定MC-MSDARL模型结构。确定各个神经元数量和模型层数,通过Relu激活函数把部分神经元设置为0,避免网络计算过程中的过拟合问题。

3) 确定网络参数。将训练集输入至模型,前向

传播MC-MSDARL。暂态电压大于等于0.9 p.u.时,说明系统电压稳定,此时网络输出 $y=1$ ;否则,系统电压失稳,此时网络输出 $y=0$ 。计算网络的输出电压稳定预测和实际电压状态的误差损失函数,根据损失函数最小原则反向更新网络参数,最后形成基于MC-MSDARL的直流系统电压稳定预测模型。

## 3 无功优化方法

### 3.1 无功优化模型建立

构建网络损耗最低、电压偏移最低的无功优化模型如下:

$$\begin{aligned} \min f = & \sum_{i=1}^{N_G} P_{G,i} - \sum_{j=1}^{N_L} P_{L,j} - \sum_{k=1}^{N_D} s_{P,k} P_{d,k} + \\ & \lambda \sum_{i=1}^{N_U} \left( \frac{U_i - U_{i,\lim}}{U_{i,\max} - U_{i,\lim}} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $P_{G,i}$ 为第 $i$ 个发电机有功功率; $P_{L,j}$ 为第 $j$ 个负荷有功功率; $P_{d,k}$ 为第 $k$ 个换流站的直流功率; $s_{P,k}$ 为换流站状态系数,若为整流站, $s_{P,k}$ 取值为1,若为逆变站, $s_{P,k}$ 取值为-1; $U_i$ 、 $U_{i,\lim}$ 、 $U_{i,\max}$ 分别为节点 $i$ 的电压幅值、越限阈值、最大值; $\lambda$ 为电压越限的惩罚因子,通常值取得较大,本文取为1000; $N_G$ 、 $N_L$ 、 $N_D$ 、 $N_U$ 分别为发电机、负荷、换流站以及电压平衡节点。

几种约束表达式如下。

1) 电压约束:

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (13)$$

式中, $U_{i,\min}$ 为节点 $i$ 的电压幅值最小值。

2) 潮流约束:

$$\begin{cases} P_{G,i} - P_{L,i} - s_{P,i} P_{d,i} - P_i = 0, & i \in S_{AC} \\ Q_{G,i} + Q_{cr,i} - Q_{L,i} - s_{Q,i} Q_{d,i} - Q_i = 0, & i \in S_{AC} \end{cases} \quad (14)$$

式中, $P_{d,i}$ 为第 $i$ 个节点换流站的直流功率; $Q_{G,i}$ 为第 $i$ 个节点的无功电源; $Q_{cr,i}$ 为第 $i$ 个节点的无功补偿容量; $Q_{L,i}$ 为第 $i$ 个节点的无功负荷; $Q_{d,i}$ 为第 $i$ 个节点换流站的无功功率; $S_{AC}$ 为所有节点集合; $P_i$ 、 $Q_i$ 分别为节点 $i$ 的有功功率、无功功率,计算公式如下:

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^{N_B} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}), & i \in S_{AC} \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^{N_B} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}), & i \in S_{AC} \end{cases} \quad (15)$$

式中, $N_B$ 为所有节点个数; $\delta_{ij}$ 为第 $i$ 个节点和第 $j$ 个节点之间的相角差值; $G_{ij}$ 为导纳矩阵实部; $B_{ij}$ 为导纳矩阵虚部。

无功补偿容量计算如下:

$$Q_{cr,i} = s_{cr,i} N_{cr,i} U_i^2 \frac{Q_{crN,i}}{U_{crN,i}^2}, i \in S_{CR} \quad (16)$$

式中,  $s_{cr,i}$  为无功补偿系数,若无功补偿装置为电抗器,那么该值取为 1,若无功补偿装置为电容器/滤波器,那么该值取为 -1;  $N_{cr,i}$  为补偿装置数量;  $U_{crN,i}$  为无功补偿装置额定电压;  $Q_{crN,i}$  为无功补偿装置额定容量;  $S_{CR}$  为所有补偿节点的集合。

3) 换流器特性约束:

$$\begin{cases} U_{d,i} - \frac{3\sqrt{2}}{\pi} k_{b,i} k_{dT,i} U_i \cos \theta_{d,i} + \\ \frac{3}{\pi} k_{b,i} X_{c,i} I_{d,i} = 0, & i \in S_D \\ S_{d,i} - \frac{3\sqrt{2}}{\pi} k_{p,i} \eta k_{dT,i} U_i I_{d,i} = 0, & i \in S_D \\ S_{d,i}^2 = P_{d,i}^2 + Q_{d,i}^2, & i \in S_D \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $U_{d,i}$ 、 $I_{d,i}$ 、 $\theta_{d,i}$ 、 $k_{dT,i}$ 、 $S_{d,i}$  分别为第  $i$  个节点换流站的直流电压、直流电流、控制角、变压器变比、视在功率;  $k_{b,i}$ 、 $k_{p,i}$  分别为换流器数量、极数;  $X_{c,i}$  为换相的电抗;  $\eta$  为换相重叠系数,取值为 0.995。

变压器变比计算如下:

$$k_{dT,i} = \frac{U_{N,i}}{U_{N,i}(1 + T_{ap,i} \Delta U_i)}, i \in S_D \quad (18)$$

式中,  $U_{N,i}$ 、 $U_{N,i}$  分别为低压、高压侧的额定电压;  $T_{ap,i}$ 、 $\Delta U_i$  分别为第  $i$  个节点换流站变压器挡位和调压步长。

4) 控制角约束:

$$\theta_{d,i,\min} \leq \theta_{d,i} \leq \theta_{d,i,\max} \quad (19)$$

式中,  $\theta_{d,i,\max}$ 、 $\theta_{d,i,\min}$  分别为第  $i$  个节点控制角上、下限值。

5) 无功电源调节能力约束:

$$Q_{G,i,\min} \leq Q_{G,i} \leq Q_{G,i,\max} \quad (20)$$

式中,  $Q_{G,i,\max}$ 、 $Q_{G,i,\min}$  分别为第  $i$  个节点无功输出上、下限值。

6) 投切死区约束:

$$\begin{cases} Q_{dexc,aim,i} - Q_{dz,i} \leq Q_{dexc,i} \leq Q_{dexc,aim,i} + Q_{dz,i} \\ Q_{dexc,i} = Q_{cr,i} - Q_{d,i} \end{cases} \quad (21)$$

式中,  $Q_{dexc,aim,i}$  为理想无功功率;  $Q_{dz,i}$  为补偿设备投切死区。

### 3.2 无功优化模型求解

粒子群算法和蝙蝠算法是常见的目标优化算法,粒子群算法容易陷入局部最优,收敛速度慢,蝙蝠算法探索能力强,然而最优解求解能力较差。本文结合二者各自优势,将 PSO-BA 用于求解直流系

统无功优化模型。

1) 粒子群算法。

粒子的速度和位置更新公式如下:

$$\begin{cases} v_{id}^{t+1} = \omega v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^b - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd}^b - x_{id}^t) \\ x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \end{cases} \quad (22)$$

式中,  $x_{id}^t$ 、 $v_{id}^t$  分别为粒子  $i$  在  $t$  时刻第  $d$  维位置和速度;  $\omega$  为惯性因子;  $r_1$ 、 $r_2$  为 0、1 之间的随机数;  $c_1$ 、 $c_2$  为认知参数;  $p_{id}^b$ 、 $p_{gd}^b$  分别为粒子  $i$  第  $d$  维的个体最佳位置、全局最佳位置。

2) 蝙蝠算法。

蝙蝠算法通过蝙蝠回声进行定位,不使用交叉和变异的行为,而使用探索的行为保持平衡寻找最优解。

所有的蝙蝠通过变化频率和响度的方式进行猎物搜寻,更新如下:

$$\begin{cases} f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min}) \beta \\ v_i^{t+1} = v_i^t + (x_i^t - G_b) f_i \\ x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \end{cases} \quad (23)$$

式中,  $x_i^t$ 、 $v_i^t$  分别为蝙蝠  $i$  在  $t$  时刻的位置和速度;  $f_i$  为蝙蝠  $i$  的飞行频率;  $f_{\min}$ 、 $f_{\max}$  分别为蝙蝠飞行频率的最小、最大值;  $\beta$  为 0、1 之间均匀分布的随机数;  $G_b$  为最靠近的解。

3) PSO-BA。

粒子群算法和蝙蝠算法结合起来的 PSO-BA 中,粒子位置和速度更新如下:

$$\begin{cases} v_{id}^{t+1} = \alpha [\omega v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^b - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd}^b - x_{id}^t)] \\ x_{id}^{t+1} = (1 - r) x_{id}^t + r p_{id}^b + v_{id}^{t+1} \end{cases} \quad (24)$$

式中,  $\alpha$  为相关参数;  $r$  为 0、1 之间的随机数;  $x_{id}^t$ 、 $v_{id}^{t+1}$  分别为粒子  $i$  在  $t$  时刻的位置和  $t+1$  时刻的速度;  $p_{id}^b$  为粒子  $i$  的最佳位置。

4) 求解流程。

对无功优化控制结果,即交流滤波器投切容量、无功补偿设备投切数量以及调相机输出容量设置为 PSO-BA 的粒子,求解流程如图 3 所示,具体步骤如下。

1) 对 PSO-BA 的粒子位置、速度、迭代次数、种群规模等所有参数进行初始化。

2) 设置各个无功设备出力、交流滤波器投切容量、无功补偿设备投切数量以及调相机输出容量。

3) 根据系统运行状态,基于 MC-MSDARL 模型预测电压扰动后的稳定情况。如果电压稳定,那

么计算无功优化目标函数的适应度值,根据适应度找到粒子最佳位置,更新粒子;如果电压失稳,那么粒子不更新。

4) 更新所有粒子速度和位置,判断是否收敛或者达到最大迭代次数,如果没有达到,返回步骤2),否则输出最后各个无功设备出力。

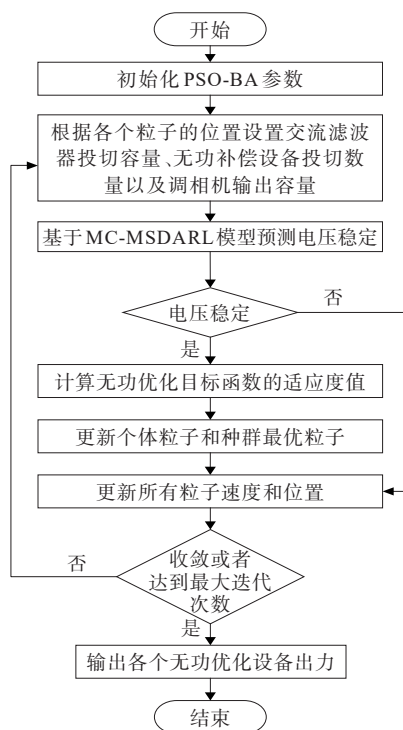


图3 无功优化控制流程

Figure 3 Reactive power control optimization process

## 4 仿真验证

### 4.1 直流输电系统模型参数

本文使用 PSASP 仿真软件搭建某地区特高压直流输电系统模型进行暂态计算,地理接线图如图4所示。等值电路图如图5所示,节点总数为85,发电机和并联电容器节点数分别为85和18。整个直流系统额定功率为10 000 MW,额定电压为800 kV,系统各个元器件等值参数如表2所示。

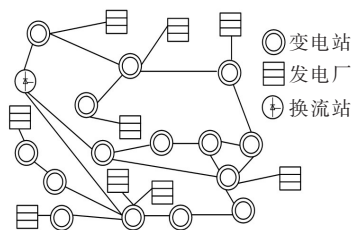


图4 特高压直流系统地理接线图

Figure 4 Geographic wiring diagram of ultra-high voltage DC system

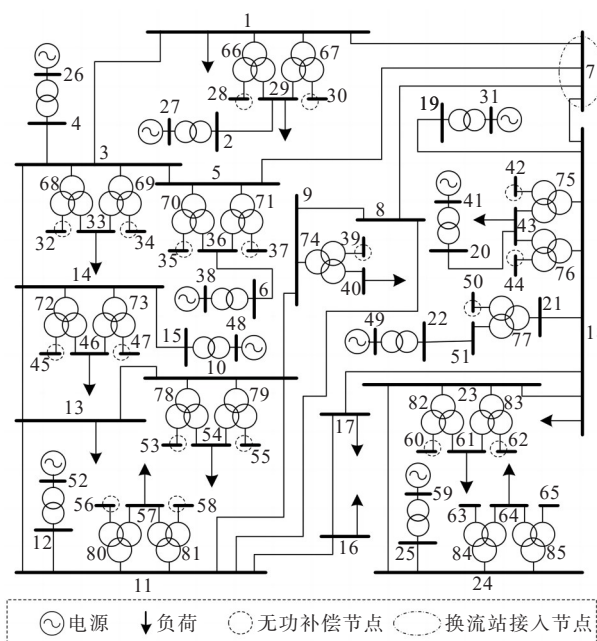


图5 直流系统等值电路图

Figure 5 Equivalent circuit diagram of DC system

表2 无功设备参数

Table 2 Parameters of reactive power compensation equipment

元件名称	参数
调相机	额定容量: -150/300 MVar, 台数: 2
并联电容器	额定容量: 300 MVar
交流滤波器	额定容量: 240 MVar
换流器	触发角: 12.5°~17.5°
换流变压器	额定容量: 1 528 MV·A, 短路电压百分数: 21%

### 4.2 MC-MSDARL 电压稳定预测

基于 MC-MSDARL 的直流系统电压稳定预测模型的输入为如下运行参数:85个节点有功功率、85个节点无功功率、母线电压平均幅值、母线电压平均相位、换流阀触发角、换流阀熄弧角。网络的输出为电压稳定预测结果,1表示稳定,0表示不稳定。因此网络输入数据维度为 $174 \times 1$ ,输出维度为 $1 \times 1$ 。

模型的评价指标主要包含准确率、漏警率和误警率,计算公式如下:

$$\begin{cases} A_{CC} = \frac{T_s + T_{us}}{T_s + F_s + T_{us} + F_{us}} \\ L_A = \frac{F_s}{T_s + F_s + T_{us} + F_{us}} \\ F_A = \frac{F_{us}}{T_s + F_s + T_{us} + F_{us}} \end{cases} \quad (26)$$

式中, $A_{CC}$ 为准确率; $L_A$ 为漏警率; $F_A$ 为误警率; $T$ 为预测正确的样本个数; $F$ 为预测错误的样本个数;

下标  $s$  代表预测稳定的样本;下标  $us$  代表预测不稳定的样本。

为了确定 MC-MSDARL 神经元数量,把网络神经元数量从 50 个增加至 300 个,分别记录其准确率  $A_{CC}$ 。记录结果如图 6 所示,神经元数量为 200 个时,预测准确率最高,故神经元数量最终确定为 200 个。

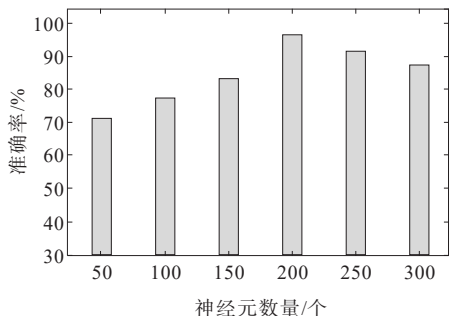


图 6 电压稳定预测准确率和神经元数量之间的关系

Figure 6 Relationship between accuracy of voltage stability prediction and number of neurons

损失函数变化如图 7 所示,若迭代次数大于 100,损失函数变化不大,仅为 0.22,说明此时网络趋于稳定,故后续训练过程网络迭代次数为 100。

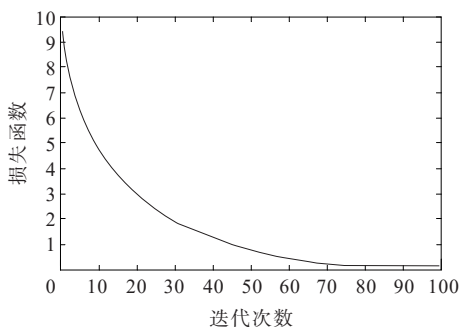


图 7 损失函数变化

Figure 7 Changes in loss function

将本文所提的 MC-MSDARL 和 CNN、DBN 进行比较,得出不同方法的预测结果如表 3 所示。从表 3 中可知,本文方法准确率最高,同时漏警率和误警率最低,说明了本文方法能够很好地预测直流系统电压稳定性。

表 3 无功设备参数

Table 3 Parameters of reactive power compensation equipment

方法	准确率/%	漏警率/%	误警率/%
本文方法	98.67	0.68	0.65
CNN	95.32	2.83	1.85
DBN	90.46	5.97	3.57

### 4.3 无功控制优化

为了验证本文所提 PSO-BA 无功优化效果,将

本文方法和粒子群算法、蝙蝠算法进行对比,分别设置直流双极闭锁、故障再次启动失败、换相失败 3 种扰动,换流站电压变化如图 8~10 所示。可以看出本文方法相比于粒子群算法和蝙蝠算法,更加有效地抑制了暂态过电压现象,并且对扰动后的电压稳定恢复效果最好。

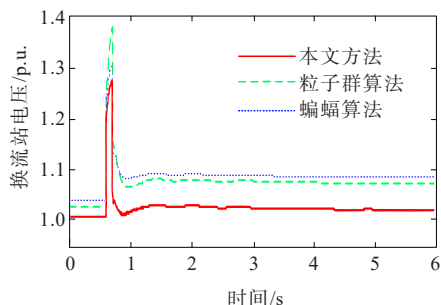


图 8 直流双极闭锁下的电压恢复效果

Figure 8 Voltage recovery effect under DC bipolar blocking

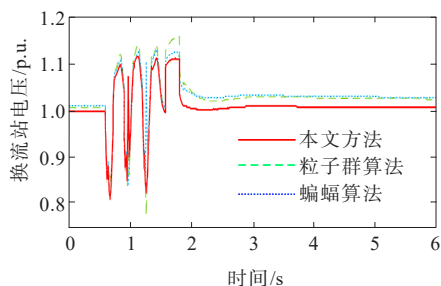


图 9 故障再次启动失败下的电压恢复效果

Figure 9 Voltage recovery effect in case of failure to restart due to faults

网损率计算公式如下:

$$P_{loss} = \frac{P_T - P_Y}{P_Y} \quad (27)$$

式中,  $P_{loss}$  为网损率;  $P_T$  为实际网损;  $P_Y$  为优化方法的网损。

不同方法的网损率结果如图 11 所示。从图 11 中可得,本文方法网损率最低,说明在直流系统无功优化方面,本文方法效果最好。

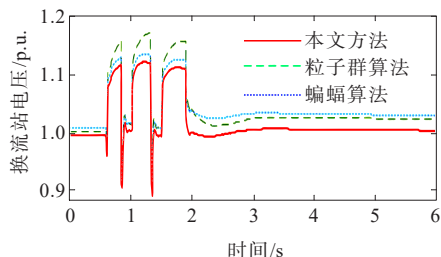


图 10 换相失败下的电压恢复效果

Figure 10 Voltage recovery effect under commutation failure

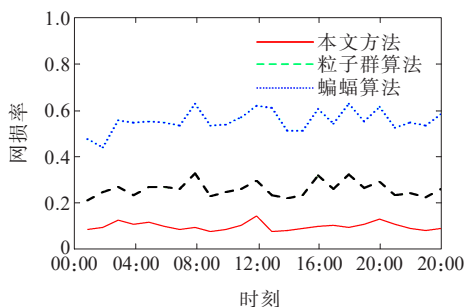


图 11 网损率结果

Figuer 11 Result of network loss rate

为了验证本文方法对换流变分接开关动作次数具有很好的抑制效果,各种方法的开关动作次数结果如表4所示。从表4中可知,未采取无功电压控制时,开关动作15次,经过不同方法无功优化后,动作次数均减少,其中本文方法对开关频繁动作抑制效果最好,减少了7次动作,验证了所提方法的有效性。

表 4 不同方法的换流变分接开关动作次数对比

Table 4 Comparison of operations of tap changer of converter transformer using different methods

方法	动作次数/次
不进行无功优化控制	15
本文方法	8
粒子群算法	10
蝙蝠算法	13

## 5 结语

本文提出一种基于MC-MSDARL和PSO-BA的直流换流站无功控制优化方法,主要取得以下成果。

1) 开展了换流站暂态过压特性研究,分析了交流滤波器、无功补偿设备以及调相机对暂态过压的影响。

2) 通过多尺度动态自适应残差卷积方式动态自动更新卷积核大小,提高模型学习能力,映射直流系统运行状态和电压稳定的关系,构建电压暂态稳定预测模型。

3) 建立减小电压波动和降低网络损耗的直流换流站无功控制优化模型,利用PSO-BA进行模型求解。

4) 通过PSASP搭建直流电网模型进行仿真验证,实验结果表明,本文所提方法提高了电压暂态稳定能力,有效解决了换流变分接开关频繁动作的问题。

## 参考文献:

- [1] 马光,张伊宁,陈哲,等.含大规模风电的交直流混联系统风险评估方法[J].电网技术,2019,43(9):3241-3252.  
MA Guang, ZHANG Yining, CHEN Zhe, et al. Risk assessment method for hybrid AC/DC system with large-scale wind power integration[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3241-3252.
- [2] 李明节.大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J].电网技术,2016,40(4):985-991.  
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids [J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.
- [3] 耿世平,余敏,郭晓鹏,等.基于柔性变电站的交直流配电技术经济评估[J].电力科学与技术学报,2022,37(1):140-150.  
GENG Shiping, YU Min, GUO Xiaopeng, et al. Technical and economic evaluation of AC and DC distribution based on flexible substation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1): 140-150.
- [4] 陈睿康,李凤婷,尹纯亚,等.基于改进VDCOL的直流系统后续换相失败抑制策略[J].电力工程技术,2022,41(2):2-9.  
CHEN Ruikang, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Suppression strategy for subsequent commutation failure of DC system based on improved VDCOL[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 2-9.
- [5] 陈光宇,吴文龙,戴则梅,等.计及故障场景集的风光储混合系统区域无功储备多目标优化[J].电力系统自动化,2022,46(17):194-204.  
CHEN Guangyu, WU Wenlong, DAI Zemei, et al. Multi-objective optimization of regional reactive power reserve in hybrid system with wind, photovoltaic and energy storage considering fault scenario set[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(17): 194-204.
- [6] 莫静山,颜伟,文旭,等.考虑换流站独立控制约束的交直流系统静态无功优化方法[J].电力系统自动化,2021,45(15):77-84.  
MO Jingshan, YAN Wei, WEN Xu, et al. Optimization method for static reactive power of AC/DC system considering independent control constraints of converter station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(15): 77-84.
- [7] 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.



- [8] 郭培,陈波,高云超,等.基于XGBOOST-PSO提高受端电网电压暂态稳定的发电机无功优化方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(13):148-158.  
GUO Pei, CHEN Bo, GAO Yunchao, et al. A generator reactive power optimization method based on XGBOOST-PSO to improve the voltage transient stability of a receiving terminal network[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13): 148-158.
- [9] 艾红杰,黄金海,吴金波,等.陕北-武汉特高压直流输电工程无功控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(14):149-156.  
AI Hongjie, HUANG Jinhai, WU Jinbo, et al. Reactive power control strategy for the Shanbei-Wuhan UHVDC transmission project[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 149-156.
- [10] 秦艳辉,尹纯亚,段青熙,等.直流近区系统故障下的暂态电压特性分析及支撑策略研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(17):169-177.  
QIN Yanhui, YIN Chunya, DUAN Qingxi, et al. Research on transient voltage characteristics and support strategy under a fault occurred in the near-zone of HVDC sending system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(17): 169-177.
- [11] 张艳梅,娄彦涛,孙小平,等.柔性直流输电系统的功率模块涡流损耗及其温升分析[J].高压电器,2023,59(2):69-80.  
ZHANG Yanmei, LOU Yantao, SUN Xiaoping, et al. Analysis of eddy current loss and temperature rise in power module of VSC-HVDC[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(2): 69-80.
- [12] 贺静波,庄伟,许涛,等.暂态过电压引起风电机组连锁脱网风险分析及对策[J].电网技术,2016,40(6):1839-1844.  
HE Jingbo, ZHUANG Wei, XU Tao, et al. Study on cascading tripping risk of wind turbines caused by transient overvoltage and its countermeasures[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1839-1844.
- [13] 陈国平,李明节,许涛,等.关于新能源发展的技术瓶颈研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1):20-27.  
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-27.
- [14] 汤奕,郑晨一,楼伯良,等.抑制连续换相失败的直流功率控制策略[J].电网技术,2019,43(10):3514-3522.  
TANG Yi, ZHENG Chenyi, LOU Boliang, et al. Research on DC power control strategy for mitigating continuous commutation failure[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3514-3522.
- [15] 孙华东,张振宇,林伟芳,等.2011年西北电网风机脱网事故分析及启示[J].电网技术,2012,36(10):76-80.  
SUN Huadong, ZHANG Zhenyu, LIN Weifang, et al. Analysis on serious wind turbine generators tripping accident in Northwest China power grid in 2011 and its lessons[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 76-80.
- [16] 常海军,霍超,刘福锁,等.提高弱送端电网暂态电压稳定水平的调相机优化配置研究[J].电力系统保护与控制,2019,47(6):90-95.  
CHANG Haijun, HUO Chao, LIU Fusuo, et al. Research on optimal allocation method of synchronous condensers for improving transient voltage stability level of weak sending-end power grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 90-95.
- [17] 梁贵书,晏阔,高飞,等.变压器混合式有载分接开关熄弧方法的仿真及试验研究[J].高电压技术,2014,40(10):3156-3163.  
LIANG Guishu, YAN Kuo, GAO Fei, et al. Study on simulation and experiments of method of extinction hybrid on-load tap changer in transformers[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3156-3163.
- [18] BENSLIMANE A, BOUCHNAIF J, ESSOUFI M, et al. Comparative study of semiconductor power losses between CSI-based STATCOM and VSI-based STATCOM, both used for unbalance compensation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 1-14.
- [19] 杨欢欢,朱林,蔡泽祥,等.直流控制对直流系统无功动态特性的影响分析[J].电网技术,2014,38(10):2631-2637.  
YANG Huanhuan, ZHU Lin, CAI Zexiang, et al. Influence of HVDC control on HVDC reactive power dynamic characteristic[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2631-2637.
- [20] 全少理,郭勇,杨卓,等.基于灵敏度分析的交直流配电网无功补偿策略[J].电力科学与技术学报,2021,36(5):104-112.  
QUAN Shaoli, GUO Yong, YANG Zhuo, et al. Reactive power compensation strategy for AC/DC hybrid distribution network based on the sensitivity analysis[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(5): 104-112.
- [21] 巩伟峥,肖洋,夏潮,等.华东电网调相机AVC控制策略研究[J].电网技术,2020,44(8):3106-3113.  
GONG Weizheng, XIAO Yang, XIA Chao, et al. Study on AVC control strategy of synchronous condenser in East China grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 3106-3113.
- [22] 李锴,邵德军,徐友平,等.基于新一代调相机的多目标无功电压协调控制系统研究[J].电网技术,2019,43(8):2961-2967.  
LI Kai, SHAO Dejun, XU Youping, et al. Research on coordinated multi-objective reactive voltage control system based on new type synchronous condenser[J].

- Power System Technology,2019,43(8):2961-2967.
- [23] 续昕,张恒旭,李常刚,等.基于轨迹灵敏度的紧急切负荷优化算法[J].电力系统自动化,2016,40(18):143-148.  
XU Xin, ZHANG Hengxu, LI Changgang, et al. Emergency load shedding optimization algorithm based on trajectory sensitivity[J].Automation of Electric Power Systems,2016,40(18):143-148.
- [24] 赵晋泉,汤建军,吴迪,等.直流馈入受端电网暂态电压与频率稳定紧急协调控制策略[J].电力系统自动化,2020,44(22):45-53.  
ZHAO Jinquan, TANG Jianjun, WU Di, et al. Emergency coordination control strategy for transient voltage and transient frequency stability in HVDC infeed receiving-end power grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(22):45-53.
- [25] 郑超,汤涌,马世英,等.网源稳态调压对暂态无功支撑能力的影响研究[J].中国电机工程学报,2014,34(1):115-122.  
ZHENG Chao, TANG Yong, MA Shiyong, et al. Study on the influence of steady-state voltage regulation schemes on transient reactive power supporting capability[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(1):115-122.
- [26] 陈波,熊华强,舒展,等.含同步调相机的直流换流站稳态无功协调控制策略[J].电力自动化设备,2020,40(11):156-164.  
CHEN Bo, XIONG Huaqiang, SHU Zhan, et al. Steady-state reactive power coordinated control strategy for DC converter station with synchronous condenser[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(11):156-164.
- [27] 王少雄,潘学萍,颜君凯,等.大容量调相机参与下特高压交直流电力系统稳态电压协同控制[J].电力系统保护与控制,2020,48(24):120-127.  
WANG Shaoxiong, PAN Xueping, YAN Junkai, et al. Coordinated control of steady-state voltage for UHVDC/AC power systems with large-scale synchronous condenser integration[J]. Power System Protection and Control,2020,48(24):120-127.
- [28] 马志侠,张林鎰,邱朝洁,等.基于CEEMD-SSA-LSTM的园区综合能源系统两阶段优化调度[J].高电压技术,2023,49(4):1430-1440.  
MA Zhixia, ZHANG Linxuan, QIU Chaojie, et al. Two-stage optimal scheduling of the park integrated energy system based on CEEMD-SSA-LSTM[J]. High Voltage Engineering,2023,49(4):1430-1440.
- [29] 管霖,黄济宇,蔡韬涵,等.图深度学习技术在电力系统分析与决策领域的应用与展望[J].高电压技术,2022,48(9):3405-3422.  
GUAN Lin, HUANG Jiyu, CAI Zihan, et al. Application and prospect of graph deep learning technique in power system analysis and decision[J]. High Voltage Engineering,2022,48(9):3405-3422.
- [30] ZHANG Y, WANG X N, WANG J H, et al. Deep reinforcement learning based volt-VAR optimization in smart distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2021,12(1):361-371.
- [31] 蔡昌春,程增茂,张关应,等.基于数据驱动的配电网无功优化[J].电网技术:2018,42(4):1217-1225.  
CAI Changchun, CHENG Zengmao, ZHANG Guanying, et al. Reactive power optimization of distribution network based on data-driven method[J]. Power System Technology, 2018,42(4):1217-1225.
- [32] 邵美阳,吴俊勇,石琛,等.基于数据驱动和深度置信网络的配电网无功优化[J].电网技术,2019,43(6):1874-1885.  
SHAO Meiyang, WU Junyong, SHI Chen, et al. Reactive power optimization of distribution network based on data driven and deep belief network[J]. Power System Technology,2019,43(6):1874-1885.
- [33] ZHAO J L, ZHANG Z Q, YU H, et al. Cloud-edge collaboration-based local voltage control for DGs with privacy preservation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2023,19(1):98-108.
- [34] LIAO W L, CHEN J J, LIU Q, et al. Data-driven reactive power optimization for distribution networks using capsule networks[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2022,10(5):1274-1287.
- [35] SUN X Z, QIU J, TAO Y C, et al. A multi-mode data-driven volt/var control strategy with conservation voltage reduction in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(2): 1073-1085.