

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240749

# 基于 PSO-ELM 的可植入 UPQC 的“源-网-荷-储” 系统最优控制策略

高波, 刘川, 韩建, 李泽文, 韦宝泉

(华东交通大学, 江西 南昌 330000)

**摘要:** 针对传统“源-网-荷-储”(source network load storage, SNLS)系统的可再生能源渗透率低及电能质量差等问题, 提出了一种可植入统一电能质量调节器(unified power quality conditioner, UPQC)的 SNLS 系统最优控制方案。该方案通过基于粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)的极限学习机(extreme learning machine, ELM)方法实现。在多目标优化运行方案中: 第一个优化目标为最大化光伏阵列发电量; 第二、三个优化目标分别为最小化负荷电压偏差和最大化网侧功率因数; 第四个优化目标则为最大化变换器的利用率。由于多目标优化问题不易实时求解, 提出了一种基于优化目标优先权顺序的分层优化思想, 将多目标优化问题简化为若干个单目标优化问题。然后, 通过将求解的所有最优解集训练为 PSO-ELM 代理模型, 以实现所提策略的快速精确执行。最后, 通过仿真验证了所提方法的有效性。算例表明所提策略可提升可再生能源的消纳率与系统变换器的利用率, 并优化电能质量。

**关键词:** 统一电能质量调节器; “源-网-荷-储”系统; 光伏; PSO-ELM

## Optimum control for UPQC-embedded source-network-load-storage system using PSO-ELM

GAO Bo, LIU Chuan, HAN Jian, LI Zewen, WEI Baoquan  
(East China Jiaotong University, Nanchang 330000, China)

**Abstract:** To address the issues of low renewable energy penetration and poor power quality in traditional source-network-load-storage (SNLS) systems, an optimum control scheme for an SNLS system embedded with a unified power quality conditioner (UPQC) is presented. The proposed scheme is implemented using the particle swarm optimization (PSO) based extreme learning machine (ELM) algorithm. In the multi-objective optimization operation scheme: the first optimization objective is to maximize the power generation of photovoltaic (PV) arrays; the second and third optimization objectives are to minimize the load voltage deviation and maximize the network side power factor, respectively; and the fourth optimization objective is to maximize the utilization rate of the converter. Since the multi-objective optimization problems are difficult to solve in real-time, a hierarchical optimization approach based on the priority order of optimization objectives is presented to simplify the multi-objective optimization problem into several single-objective ones. Then, by training all the optimum solution sets obtained as an PSO-ELM surrogate model, the proposed strategy can be executed quickly and accurately. Finally, the effectiveness of the proposed scheme is verified through simulations. The case studies show that the proposed strategy can improve the absorption rate of renewable energy and the utilization rate of converters, and optimize power quality.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52407101, No. 52467006 and No. 52367015).

**Key words:** unified power quality conditioner (UPQC); source-network-load-storage (SNLS); photovoltaic (PV); particle swarm optimization-based extreme learning machine (PSO-ELM)

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(52407101, 52467006, 52367015); 江西省自然科学基金项目资助(20232BAB214061, 2023BAB214065)

## 0 引言

由于大量的间歇性可再生能源(renewable energy source, RES)并网与高功率电力电子负荷投切, 配电网中电能质量问题变得日益严重<sup>[1-3]</sup>。譬如: RES 的波动性输出功率难以满足实时负荷需求; 由于变流器容量的约束, 电能质量问题无法得到很好的抑制。为了同时缓解 RES 消纳率较低与电能质量较差等问题<sup>[4-5]</sup>, 统一电能质量调节器(unified power quality conditioner, UPQC)被认为是一种应用广泛且极具潜力的解决方案<sup>[6-8]</sup>。与动态电压恢复器(dynamic voltage restorer, DVR)<sup>[9]</sup>和静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)<sup>[10]</sup>相比, 尽管 UPQC 所需开关设备更多且投资成本高, 但其可以抑制电压波动并提供无功补偿, 且能为 RES 提供更多的有功功率流通过径。与 O-UPQC<sup>[11]</sup>相比, 传统 UPQC 仅含一个直流电容器, 投资成本更低。图 1 为不同补偿装置的性能对比分析。

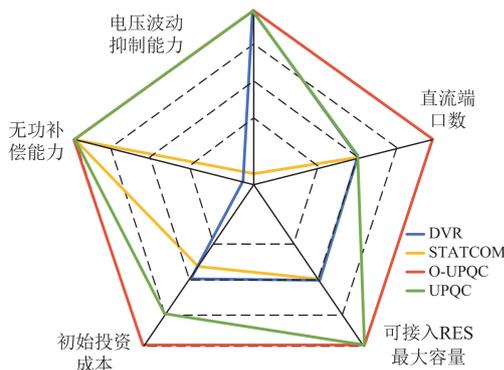


图 1 不同补偿装置的对比分析

Fig. 1 Comparison for different compensation devices

一方面, 在负荷电压和无功补偿方面, 有学者通过控制负荷电压与公共耦合点电压的相角来实现电能质量补偿的目的。根据串联侧变换器输出有功功率与无功功率的类型及份额, 相角控制方案可分为 UPQC-P<sup>[12-13]</sup>、UPQC-Q<sup>[14-15]</sup>、UPQC-S<sup>[16-17]</sup>和 UPQC-VA<sub>min</sub><sup>[18]</sup> 4 类。虽然上述 4 种方案可以实现不同的目标, 如提高串联侧变换器的利用率或使 UPQC 的总视在功率最小等, 但这些方案均未考虑到串联侧变换器与并联侧变换器的容量、电压和电流等约束。

另一方面, 有学者建议将光伏(photovoltaic, PV)阵列集成于 UPQC 系统来解决光伏阵列的并网问题。但这些研究主要集中于 PV-UPQC 的控制和容量设计方面, 很少考虑 PV-UPQC 的最优运行方案<sup>[19-20]</sup>。

为充分挖掘 UPQC 的潜力, 有学者同时考虑了多个额外的优化目标, 包括容量设计、电能质量控

制、功率损耗等。文献[21]提出了一种在线运行优化方案, 通过确定变负荷需求下 O-UPQC 的最优无功功率分布, 以最大限度地减小 UPQC 功率损耗。此外, 文献[22]提出了一种粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法, 同时降低了 UPQC 的电压偏差与功率损耗。文献[23]提出了一种基于分层优化思想的多目标优化运行方案, 同时实现了负荷电压偏差、电网发出无功功率和总视在功率的最小化。目前, 相关学者提出了多种多目标优化算法, 其中包括线性加权法<sup>[24]</sup>和进化算法<sup>[25-26]</sup>。由于多目标优化问题的解是帕累托前沿, 因而在实施最优决策之前, 必须依据设计者的偏好从帕累托前沿中选择合适的解。故上述多目标优化算法无法保证其在数字控制系统中的实时性。总体而言, 尽管所提优化方案可以同时实现多个优化目标, 但相应的多目标优化算法难以在实时数字控制系统中实现。

为此, 本文以可植入 UPQC 的“源-网-荷-储”(source network load storage, SNLS)系统为对象, 提出了一种基于 PSO 的极限学习机(extreme learning machine, ELM)方法的 SNLS-UPQC 系统最优运行方案。为了提高 RES 消纳率, 改善电能质量, 本研究同时考虑了最大化光伏阵列发电量、最小化负荷电压偏差、最大化电网侧功率因数、最大化变换器利用率 4 个优化目标。为快速实现最优决策, 根据优化目标的优先级, 将多目标优化问题简化为若干个单目标优化问题, 并将所有最优解训练为一个 PSO-ELM 模型。ELM 算法学习速度快、泛化能力强<sup>[27]</sup>, 已成为机器学习领域中的重要研究方向之一, 但由于 ELM 学习效果不稳定, 本文采用 PSO 算法训练 ELM 模型, 可使 ELM 的神经网络收敛速度更快, 精度更高<sup>[28]</sup>。

本研究的主要贡献如下:

- 1) 提出了一种 SNLS-UPQC 系统的最优控制方案, 可以同时提升 RES 渗透率和电能质量;
- 2) 采用多目标优化的方式来实施所提优化控制方案, 基于分层优化思想, 将多目标优化问题简化为若干个单目标优化问题;
- 3) 利用 PSO-ELM 训练多目标最优决策的代理模型, 便于控制的实时实施。

## 1 SNLS-UPQC 系统阐述

### 1.1 SNLS-UPQC 系统功能

图 2 为 SNLS-UPQC 系统的拓扑, 该系统主要由源(交流公共电网与光伏阵列)、网(交直流电网)、荷(负荷)、储(储能电池)和 UPQC 5 部分组成。UPQC 主要由串、并联侧变换器和直流电容器组成。串联

侧变换器通过 LC 滤波器向电网注入电压  $v_{SRz}$  ( $z \in \{a, b, c\}$ ) 以维持负荷电压  $v_{Lz}$  的稳定, 并联侧变换器向系统注入电流  $i_{SHz}$  以维持电网电流  $i_{Sz}$  为正弦波形, 并保证三相平衡, 且与电网电压  $v_{Sz}$  的基波同相。此外,

UPQC 还在直流侧为光伏阵列和储能电池提供灵活的电力电子接口。因此, 交流电网、负荷、光伏阵列、储能电池、UPQC 共同组成了一个复杂且灵活的交直流互联系统。

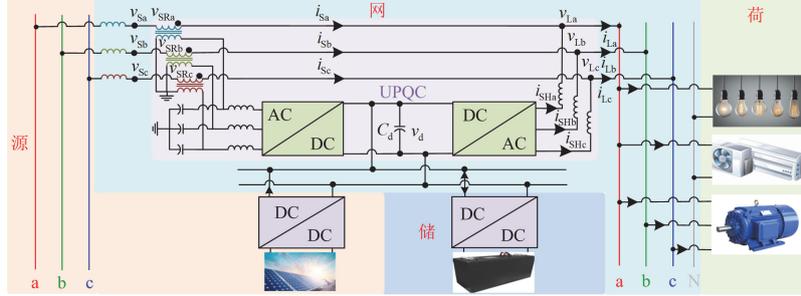


图 2 SNLS-UPQC 系统拓扑

Fig. 2 Topology of SNLS-UPQC system

### 1.2 SNLS-UPQC 系统数学模型

SNLS-UPQC 系统的电压和电流相量图如图 3 所示。图中:  $\dot{V}_S = V_S \angle 0^\circ$  和  $\dot{I}_S$  分别表示电网电压、电流相量;  $\gamma$  为电网电压与电流相量的夹角;  $\dot{V}_{SR} = V_{SR} \angle \varphi_{SR}$  和  $\dot{I}_{SH}$  分别为串联注入电压和并联注入电流相量;  $\varphi_{SR}$  为串联注入电压的角度;  $\dot{V}_L = V_L \angle \delta$  和  $\dot{I}_L$  分别为负荷电压、电流相量;  $\delta$  为负荷电压的角度;  $\varphi_L$  为负荷功率因数角。

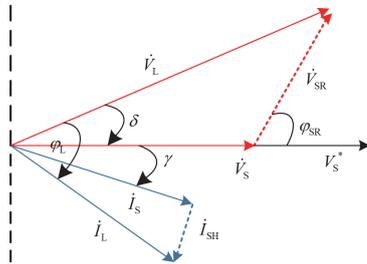


图 3 SNLS-UPQC 系统电压电流相量图

Fig. 3 Phasor diagram of SNLS-UPQC system

#### 1.2.1 功率流模型

由图 3 可知, 负荷电压相量表示为

$$V_L \angle \delta = V_S \angle 0^\circ + V_{SR} \angle \varphi_{SR} \quad (1)$$

式中,  $V_S = kV_S^*$ , 其中  $V_S^*$  为电网额定电压,  $k$  为实际电网与额定电网电压幅值的比值。

由式(1)可知, 串联注入电压幅值  $V_{SR}$  为

$$V_{SR} = \sqrt{V_L^2 + (kV_S^*)^2 - 2kV_S^*V_L \cos \delta} \quad (2)$$

式中,  $V_L$  为负荷电压有效值。

电网产生的复功率  $\dot{S}_S$  为

$$\dot{S}_S = 1.5 \dot{V}_S \cdot \tilde{\dot{I}}_S = P_S + jQ_S = |\dot{S}_S| \angle (-\gamma) \quad (3)$$

式中:  $P_S$  与  $Q_S$  分别为电网产生的有功功率与无功功

率; 上标“~”表示为复共轭;  $|\dot{S}_S|$  为电网视在功率。

由于负荷有功功率  $P_L$  将完全由电网、光伏阵列与储能电池提供, 负荷无功功率  $Q_L$  由 UPQC 与电网提供, 负荷复功率  $\dot{S}_L$  可以描述为

$$\dot{S}_L = P_L + jQ_L \quad (4)$$

其中,

$$\begin{cases} P_L = P_S + P_{PV} + P_{BA} \\ Q_L = Q_S + Q_{UPQC} \end{cases}$$

式中:  $P_{PV}$ 、 $P_{BA}$  与  $P_S$  分别为光伏阵列、储能电池与电网侧的输出功率;  $Q_{UPQC}$  与  $Q_S$  分别为 UPQC 与电网侧产生的无功功率。

电网侧功率因数  $\xi$  定义为

$$\xi = P_S / \sqrt{P_S^2 + Q_S^2} \quad (5)$$

串联侧变换器产生的复功率  $\dot{S}_{SR}$  为

$$\dot{S}_{SR} = 1.5(V_L \angle \delta - kV_S^* \angle 0^\circ) \cdot \tilde{\dot{I}}_S \quad (6)$$

依据式(6), 串联侧变换器的视在功率  $|\dot{S}_{SR}|$  写为

$$|\dot{S}_{SR}| = \frac{|\dot{S}_S|}{kV_S^*} \sqrt{V_L^2 + (kV_S^*)^2 - 2kV_S^*V_L \cos \delta} \quad (7)$$

根据基尔霍夫定律,  $\dot{I}_{SH}$  可表示为

$$\dot{I}_{SH} = I_L \angle (\delta - \varphi_L) - I_S \angle \gamma \quad (8)$$

其中,

$$\begin{cases} \varphi_L = \tan^{-1} \left( \frac{Q_L}{P_L} \right) \\ I_L = \frac{2\sqrt{P_L^2 + Q_L^2}}{3V_L} \end{cases}$$

并联侧变换器产生的复功率  $\dot{S}_{SH}$  表示为

$$\dot{S}_{SH} = 1.5V_L \angle \delta \cdot [I_L \angle (\varphi_L - \delta) - I_S \angle -\gamma] \quad (9)$$

因此, 并联侧变换器产生的总视在功率为

$$|\dot{S}_{SH}| = \sqrt{|\dot{S}_L|^2 + \left( \frac{V_L |\dot{S}_S|}{kV_S^*} \right)^2} - \frac{2V_L |\dot{S}_L| |\dot{S}_S| \cos(\delta - \varphi_L - \gamma)}{kV_S^*} \quad (10)$$

### 1.2.2 SNLS-UPQC 系统利用率

为充分利用AC/DC变换器与DC/DC变换器, 需尽可能提高串联侧变换器、并联侧变换器和DC/DC变换器的利用率。本节主要分析负荷、光伏阵列、储能电池、串联侧变换器和并联侧变换器输出功率变化工况下SNLS-UPQC系统的利用率。

依据式(7)与式(10), 系统总视在功率 $|\dot{S}_O|$ 可表示为

$$|\dot{S}_O| = |\dot{S}_{SR}| + |\dot{S}_{SH}| + P_{PV} + |P_{BA}| \quad (11)$$

系统利用率 $\eta$ 可表示为

$$\eta = \frac{|\dot{S}_O|}{|\dot{S}_{SR}^*| + |\dot{S}_{SH}^*| + P_{PV}^* + P_{BA}^*} \quad (12)$$

式中, 上标“\*”为相关变量的额定值。

## 2 SNLS-UPQC 系统最优控制

SNLS-UPQC系统的最优控制主要通过求解本节所述的多目标优化问题来实现。

### 2.1 优化问题与约束

为同时提高可再生能源渗透率、改善电能质量及提升SNLS-UPQC系统变换器的利用率, 本研究的优化目标主要包括: 1) 最大化光伏阵列发电量; 2) 最小化负荷电压偏差; 3) 最大化电网侧功率因数; 4) 最大化变换器利用率。

因此, 优化问题可描述为

$$\min \begin{cases} F_1 = |P_{PV} - P_{PV,max}| \\ F_2 = |V_L - V_S^*| \\ F_3 = -\xi \\ F_4 = -\eta \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} 0 \leq P_{PV} \leq P_{PV,max} \\ P_{BA,max}^- \leq P_{BA} \leq P_{BA,max}^+ \\ 0 \leq V_{SR} \leq V_{SR}^* \\ 0 \leq I_{SH} \leq I_{SH}^* \\ |\dot{S}_{SR}| \leq |\dot{S}_{SR}^*| \\ |\dot{S}_{SH}| \leq |\dot{S}_{SH}^*| \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $P_{PV,max}$  为PV阵列可发出的最大功率;  $P_{BA,max}^-$

及  $P_{BA,max}^+$  分别为储能电池的最大充电和放电功率;

$I_{SH}$  为并联侧变换器注入电流。

### 2.2 简化的多目标优化问题

一般地, 普通用户敏感负荷的渗透率较低, 故认为其经济效益的优先权高于电能质量和系统效率。此外, 最大化变换器利用率可提高SNLS-UPQC系统效率, 故其被分配为最低的优先权。因此, 式(13)中优化目标的优先权顺序可设计为: 1) 最大化光伏阵列发电量; 2) 最小化负荷电压偏差; 3) 最大化电网侧功率因数; 4) 最大化变换器利用率。基于上述优先权顺序, 所提多目标优化问题可简化为以下单目标优化问题。

#### 2.2.1 优化问题 A

在本工况下, 假定多目标优化问题的前3个优化目标都能实现, 也即光伏阵列按照最大发电功率输出有功, 负荷电压幅值为额定值, 电网功率因数为1。则优化问题式(13)、式(14)可以表示为式(15)、式(16)。

$$\min F_4 = -\eta \quad (15)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} P_{PV} = P_{PV,max} \\ V_L = V_S^* \\ \xi = 1 \\ P_{BA,max}^- \leq P_{BA} \leq P_{BA,max}^+ \\ 0 \leq V_{SR} \leq V_{SR}^* \\ 0 \leq I_{SH} \leq I_{SH}^* \\ |\dot{S}_{SR}| \leq |\dot{S}_{SR}^*| \\ |\dot{S}_{SH}| \leq |\dot{S}_{SH}^*| \end{cases} \quad (16)$$

#### 2.2.2 优化问题 B

本工况假定前两个优化目标都能实现, 即光伏阵列以最大发电功率输出有功, 负荷电压保持在期望值。则优化问题式(13)、式(14)可表示为式(17)、式(18)。

$$\min F_3 = -\xi \quad (17)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} P_{PV} = P_{PV,max} \\ V_L = V_S^* \\ P_{BA,max}^- \leq P_{BA} \leq P_{BA,max}^+ \\ 0 \leq V_{SR} \leq V_{SR}^* \\ 0 \leq I_{SH} \leq I_{SH}^* \\ |\dot{S}_{SR}| \leq |\dot{S}_{SR}^*| \\ |\dot{S}_{SH}| \leq |\dot{S}_{SH}^*| \end{cases} \quad (18)$$

### 2.2.3 优化问题 C

在该运行工况下, 假定仅有第1个优化目标能实现, 也即光伏阵列以最大发电功率输出有功, 则优化问题式(13)、式(14)可表示为式(19)、式(20)。

$$\min F_2 = |V_L - V_S^*| \quad (19)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} P_{PV} = P_{PV,max} \\ P_{BA,max}^- \leq P_{BA} \leq P_{BA,max}^+ \\ 0 \leq V_{SR} \leq V_{SR}^* \\ 0 \leq I_{SH} \leq I_{SH}^* \\ |\dot{S}_{SR}| \leq |\dot{S}_{SR}^*| \\ |\dot{S}_{SH}| \leq |\dot{S}_{SH}^*| \end{cases} \quad (20)$$

### 2.2.4 优化问题 D

在该工况下, 所有优化目标都无法精确实现。则优化问题式(13)、式(14)可表示为

$$\min F_1 = |P_{PV} - P_{PV,max}| \quad (21)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} 0 \leq P_{PV} \leq P_{PV,max} \\ P_{BA,max}^- \leq P_{BA} \leq P_{BA,max}^+ \\ 0 \leq V_{SR} \leq V_{SR}^* \\ 0 \leq I_{SH} \leq I_{SH}^* \\ |\dot{S}_{SR}| \leq |\dot{S}_{SR}^*| \\ |\dot{S}_{SH}| \leq |\dot{S}_{SH}^*| \end{cases} \quad (22)$$

此时, 光伏阵列的最大发电量受串、并联侧变换器和储能电池的容量约束。因此欲获取最多的光伏阵列发电量, 光伏阵列产生的能量应尽可能通过串联侧变换器或并联侧变换器注入电网和储能电池。

## 2.3 最优控制的执行

本节主要介绍了最优运行方案的PSO-ELM模型的设计, 包括训练数据的提取、模型结构设计与训练步骤(见图4)。

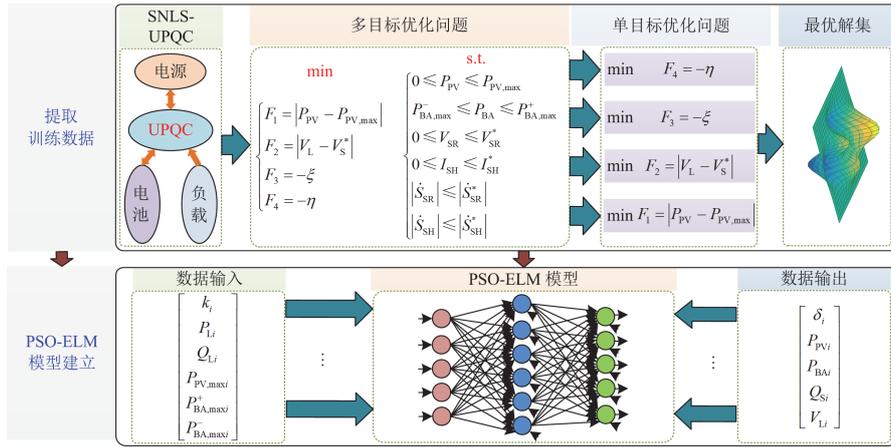


图4 基于 PSO-ELM 的 SNLS-UPQC 系统优化运行方案流程图

Fig. 4 Flowchart of the PSO-ELM based optimal operation scheme of SNLS-UPQC

### 2.3.1 提取训练数据

为训练所提 PSO-ELM 模型, 需要大量的训练数据。本文中所提最优运行模型的训练数据主要包括输入  $[k P_L Q_L P_{PV,max} P_{BA,max}^- P_{BA,max}^+]^T$  和输出  $[\delta Q_S V_L P_{PV} P_{BA}]^T$ , 其中输出为优化问题的解。依据优化问题式(13)、式(14), 当输入给定时, 输出便可确定。为保障数据的高保真性, 每个输入都选择 20 个值。因此需要 64 000 000 次计算来测试所有组合, 当执行完所有数据的提取后, 所提取的输入、输出数据可用于训练 PSO-ELM 模型。

### 2.3.2 PSO-ELM 结构与训练流程

一般地, 对于任意  $N$  个训练样本  $(x_i, y_i)$  而言,  $x_i = [x_{i1} x_{i2} \dots x_{im}] \in \mathbb{R}^n$ ,  $y_i = [y_{i1} y_{i2} \dots y_{im}] \in \mathbb{R}^m$ 。当定义激活函数为  $g(x)$ , 隐藏节点数为  $L$  时, 则单隐层

前馈神经网络(single-hidden layer feedforward neural network, SLFN)可写为

$$y_j = \sum_{i=1}^L \beta_i g(\omega_i x_j + b_i) \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (23)$$

式中:  $\omega_i = [\omega_{i1} \omega_{i2} \dots \omega_{im}]^T$ 、 $\beta_i = [\beta_{i1} \beta_{i2} \dots \beta_{im}]^T$  分别为连接输入节点与第  $i$  个隐藏节点的权向量;  $b_i$  为隐藏节点偏移量,  $b_i = [b_{i1} b_{i2} \dots b_{im}]^T$ 。相应地, 式(23)可表示为

$$Y = H \cdot \beta \quad (24)$$

其中,

$$H = \begin{bmatrix} g(\omega_1 x_1 + b_1) & \dots & g(\omega_L x_1 + b_L) \\ \vdots & & \vdots \\ g(\omega_1 x_N + b_1) & \dots & g(\omega_L x_N + b_L) \end{bmatrix}_{N \times L};$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1^T \\ \vdots \\ \beta_L^T \end{bmatrix}_{N \times m}; Y = \begin{bmatrix} y_1^T \\ \vdots \\ y_L^T \end{bmatrix}_{N \times m}$$

式中,  $H$  为神经网络隐藏层输出矩阵。

对于 PSO-ELM 模型而言, SLFN 模型的结构是特定的。此外, 由于向量  $\omega_i$  和隐藏节点偏移量  $b_i$  可以依据概率分布进行选择, 故  $\omega_i$  和  $b_i$  是固定的, 那么  $H$  矩阵是已知的。也即可通过式(25)找到满足以下条件的 SLFN 模型的最小方差解  $\hat{\beta}$ 。

$$\begin{aligned} & \|H(\omega_1 \cdots \omega_L \ b_1 \cdots b_L)\hat{\beta} - Y\| = \\ & \min_{\beta} \|H(\omega_1 \cdots \omega_L \ b_1 \cdots b_L)\beta - Y\| \end{aligned} \quad (25)$$

在 ELM 方法的框架内, 最后只需在式(25)中估计  $\beta$ 。显然, 使用 ELM 模型估计输出权重可以分为以下 3 个步骤。

步骤 1: 随机设置输入权值和偏移量;

步骤 2: 生成输出矩阵  $H$ ;

步骤 3: 计算输出权重,  $\beta = H^{-1} \times Y$ ,  $H^{-1}$  是矩阵  $H$  的 Moore-Penrose 广义逆矩阵。

对 ELM 而言, 由于初始权重矩阵与偏移量是随机生成的, 易造成 ELM 训练效果不稳定。本文采用 PSO 对 ELM 进行优化。利用 PSO 优化 ELM 需先采用归一化方法处理原始数据  $\sigma_s$ 。归一化处理后的数据  $\chi_s$  可写为

$$\chi_s = \frac{\sigma_s - \sigma_{\min}}{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}} \quad (26)$$

式中,  $\sigma_{\max}$  与  $\sigma_{\min}$  分别为原始数据的最大值与最小值。随后随机设置模型输入输出节点数、隐藏节点等参数, 并随机给定种群规模、每个粒子位置和起始速度, 并将均方差误差函数作为适应度函数。适应度函数  $F_{\text{fit}}$  可写为

$$F_{\text{fit}} = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N (\zeta_{\text{real}} - \zeta_s)^2 \quad (27)$$

式中,  $\zeta_{\text{real}}$ 、 $\zeta_s$  分别为期望样本输出值与模型实际预测值。多次更新后获取问题最优解。进一步地, 对各个粒子适应函数值进行比较, 找出各个粒子的最优值, 也即为问题的最优解。

训练完 PSO-ELM 模型后, 对于 SNLS-UPQC 系统给定的任意输入, 便可实现系统最优运行的精确输出估计。

### 3 验证

本节采用多个仿真案例来验证所提最优运行方案的合理性。相关参数如表 1 所示。

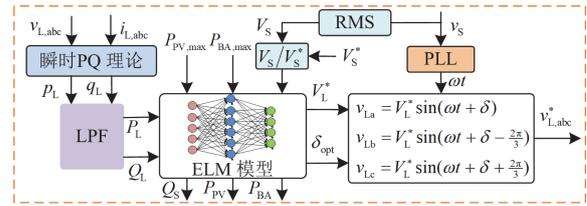
表 1 仿真案例中最优控制方案所用参数

Table 1 Parameters used in the case studies for the optimal operation scheme

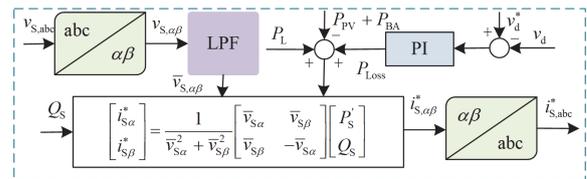
符号	描述	值
$V_s^*$	电网额定电压幅值	311 V
$\omega$	电网角频率	314 rad/s
$L_{\text{SR}}$	串联滤波器电感值	3 mH
$C_{\text{SR}}$	串联滤波器电容值	80 $\mu\text{F}$
$L_{\text{SH}}$	并联滤波器电感值	4 mH
$v_d$	直流端口额定电压	800 V
$C_d$	直流端口电容值	4000 $\mu\text{F}$
$P_L$	负荷有功功率需求	10 kW
$Q_L$	负荷无功功率需求	10 kvar
$ \hat{S}_{\text{SR}}^* $	串联侧变换器的伏安容量	8.085 kVA
$ \hat{S}_{\text{SH}}^* $	并联侧变换器的伏安容量	7.0 kVA
$P_{\text{PV}}^*$	PV 侧 DC/DC 变换器额定容量	6 kW
$P_{\text{BA}}^*$	电池侧 DC/DC 变换器额定容量	3 kW

### 3.1 SNLS-UPQC 系统优化控制设计

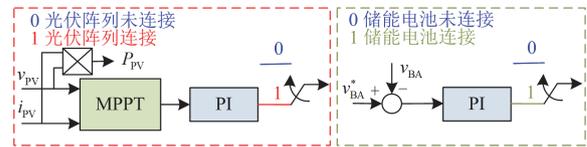
图 5 为串、并联侧变换器和光伏阵列、储能电池的控制框图。整体控制可分为以下 4 个部分。



(a) 串联侧控制



(b) 并联侧控制



(c) 光伏阵列控制

(d) 储能电池控制

图 5 SNLS-UPQC 系统控制图

Fig. 5 Control of the SNLS-UPQC system

#### 3.1.1 串联侧变换器控制设计

测量负荷电压  $v_{L,abc}$  与电流  $i_{L,abc}$  以提取瞬时负荷功率 ( $p_L, q_L$ ), 并利用滤波器获得基波分量  $P_L$  与  $Q_L$ 。基于 PSO-ELM 模型, 可确定系统的最优运行

方案。最终通过合成  $v_{L,abc}^*$  来控制串联侧变换器。

### 3.1.2 并联侧变换器控制设计

在图 5 中, PI 控制器用于将直流电压  $v_d$  维持在期望值  $v_d^*$ 。其输入无功功率参考由 PSO-ELM 模型的输出直接给定。通过  $\alpha\beta/abc$  变换, 得到公共电网参考电流  $i_{s,abc}^*$ , 并最终实现并联侧变换器的控制。

### 3.1.3 光伏阵列控制设计

当光伏阵列连接到 SNLS-UPQC 系统中时,  $v_d^*$  通过采用最大功率点跟踪技术实现<sup>[29-30]</sup>; 当光伏阵列断开时, 光伏阵列侧的 DC/DC 变换器停止工作。当系统以优化问题 D 运行时, 光伏阵列的输出功率由最优运行条件决定。

### 3.1.4 储能电池控制设计

储能电池主要由 PI 控制器控制。特别地, 当电池充满电时停止充电; 相反, 当电池完全放电时停止放电。

## 3.2 SNLS-UPQC 最优控制仿真结果

为了验证所提优化控制方案的性能, 本文采用多种优化算法来求解含约束的单目标问题, 并与所提优化算法的结果进行对比分析。

图 6 为不同算法下 SNLS-UPQC 系统运行的最优解。在优化问题 A 和优化问题 B 中, 所有算法均可达到预期结果。但相较于其他算法, 如自由能微扰(free energy perturbation, FEP)、可行性规则结合目标函数信息算法(feasibility rules combined with objective function information, FROFI)、差分进化算法(differential evolution, DE)、模拟退火算法(simulated annealing, SA)而言, PSO 算法收敛速度更快、精度更高。

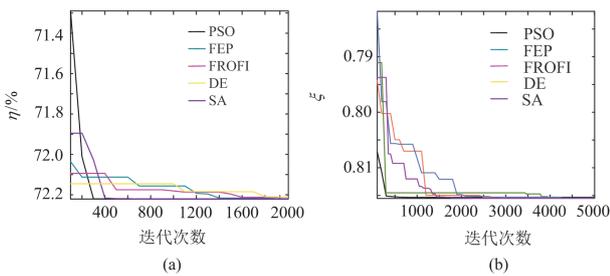


图 6 优化问题 A 与 B 两种不同情形下不同算法的解

Fig. 6 Solutions with different algorithms under optimization problem A and optimization problem B

为了阐述所建立 PSO-ELM 代理模型的优越性, 将其与人工神经网络、支持向量机、ELM 的运行结果进行了比较。并以模型预测值与实际值的平均绝对偏差和平均绝对百分比偏差作为评价指标, 分别对 PSO-ELM、ELM、人工神经网络和支持向

量机构建的模型进行评价。如表 2 所示, PSO-ELM 模型效率最高且具有最低的平均绝对偏差和平均绝对百分比偏差。

表 2 4 种不同算法的比较结果

算法类型	平均绝对偏差	平均绝对百分比偏差/%	消耗时间/s
人工神经网络	0.0153	4.85	72.7983
支持向量机	0.0112	4.01	8.9634
ELM	0.0072	2.31	2.2671
PSO-ELM	0.0043	1.52	1.6513

## 3.3 仿真结果分析

为阐述所提 SNLS-UPQC 系统的最优控制策略的有效性, 本节给出不同的电压比、负荷、光伏阵列和储能电池等参数下系统的最优运行结果, 具体可见表 3。

表 3 不同条件下的优化运行结果

		$k$			
		0.4	0.8	1.2	1.6
1	$\delta/\text{rad}$	0.145	0.268	0.424	0.280
	$V_L/V$	<b>217.4</b>	311	311	311
	$\xi$	0.959	1	1	0.875
	$\eta/\%$	—	<b>72.22</b>	81.94	—
	$P_{PV,\max} = 0 \text{ kW}$ $P_{BA,\max} = 0 \text{ kW}$				
2	$\delta/\text{rad}$	0.2702	0.571	0	-0.226
	$V_L/V$	<b>268.3</b>	311	311	311
	$\xi$	1	1	<b>0.700</b>	<b>0.525</b>
	$P_{PV}/\text{kW}$	4	4	4	4
	$\eta/\%$	—	78.93	—	—
3	$\delta/\text{rad}$	0.270	0.7	0.168	-0.126
	$V_L/V$	<b>311</b>	311	311	311
	$\xi$	1	1	<b>0.816</b>	<b>0.612</b>
	$P_{PV}/\text{kW}$	6	6	6	6
	$P_{BA}/\text{kW}$	-1.19	-1.76	-2.98	-2.99
$\eta/\%$	92.46	83.54	—	—	

### 3.3.1 案例 1

在案例 1 中, 光伏阵列和储能电池都被断开。

图 7 为 SNLS-UPQC 系统在最优运行方案下的波形。图 7(a) 的仿真结果主要包括电网与负荷电压、电流和负荷电压相角、直流电压等, 其中, 电网与负荷电压、电流波形中红线代表 a 相、绿线代表 b 相、蓝线表示 c 相。由图 7(a) 可知, 除  $t \in [0.36, 0.44] \text{ s}$  ( $k = 0.4$ ) 外, 负荷电压始终等于额定值。当  $t \in [0.2, 0.36] \text{ s}$  ( $k = 0.8, 1.2$ ) 时, 系统处于优化问题 A 工况;  $k = 0.4$  时, 系统处于优化问题 C 运行工况;  $k = 1.6$

时, 系统处于优化问题 B 工况。优化问题 C 工况中负荷电压幅值小于 311 V。 $k=1.6$  时, 电网发出的无功约为 5.53 kvar。为满足负荷的有功需求, 电网电流随着  $k$  值变化而变化, 直流电压随着  $k$  值的变化略有波动。此外, 当系统处于优化问题 C 工况时, 串、并联侧变换器都以额定伏安容量运行。当系统处于优化问题 B 工况时, 只有并联侧变换器在额定伏安容量条件下工作。

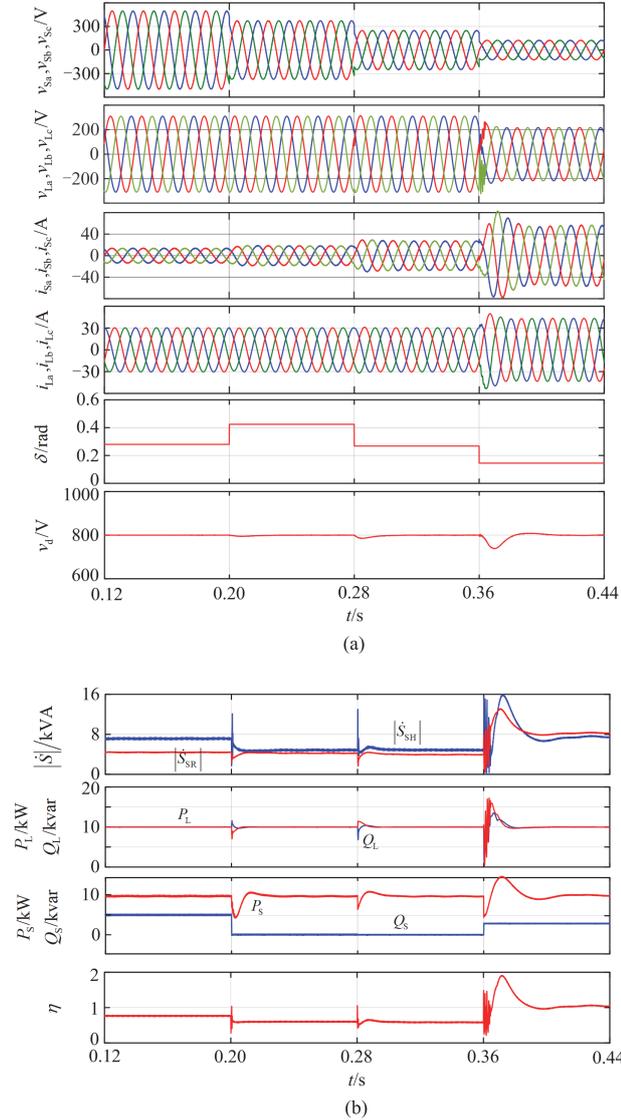


图 7 案例 1 工况下最优运行方案的仿真波形

Fig. 7 Simulation waveforms of proposed scheme in case 1

### 3.3.2 案例 2

在案例 2 中, 只有光伏阵列与 UPQC 相连。

图 8 为案例 2 工况下 SNLS-UPQC 系统的相应波形。如图 8(a)所示, 其中, 电网与负荷电压、电流波形中红线代表 a 相、绿线代表 b 相、蓝线表示 c 相。

除  $t \in [0.36, 0.44]$  s ( $k=0.4$ ) 外(见表 3), 负荷电压幅值均等于额定值。依据图 8(b)可知, 当  $t \in [0.12, 0.28]$  s 时, 电网和光伏阵列同时为负荷供电, 光伏阵列最大输出有功为 4 kW, 系统处于优化问题 B 运行工况, 当  $k=1.6$  时, 电网发出的无功为 9.73 kvar; 当  $k=1.2$  时, 电网发出 6.12 kvar 的无功功率。当  $t \in [0.28, 0.36]$  s ( $k=1$ ) 时, 系统处于优化问题 A 工况。当  $k=0.4$  时, 系统处于优化问题 C 工况, 串联侧变换器以额定伏安容量运行。此外, 光伏阵列始终以最大输出功率运行。

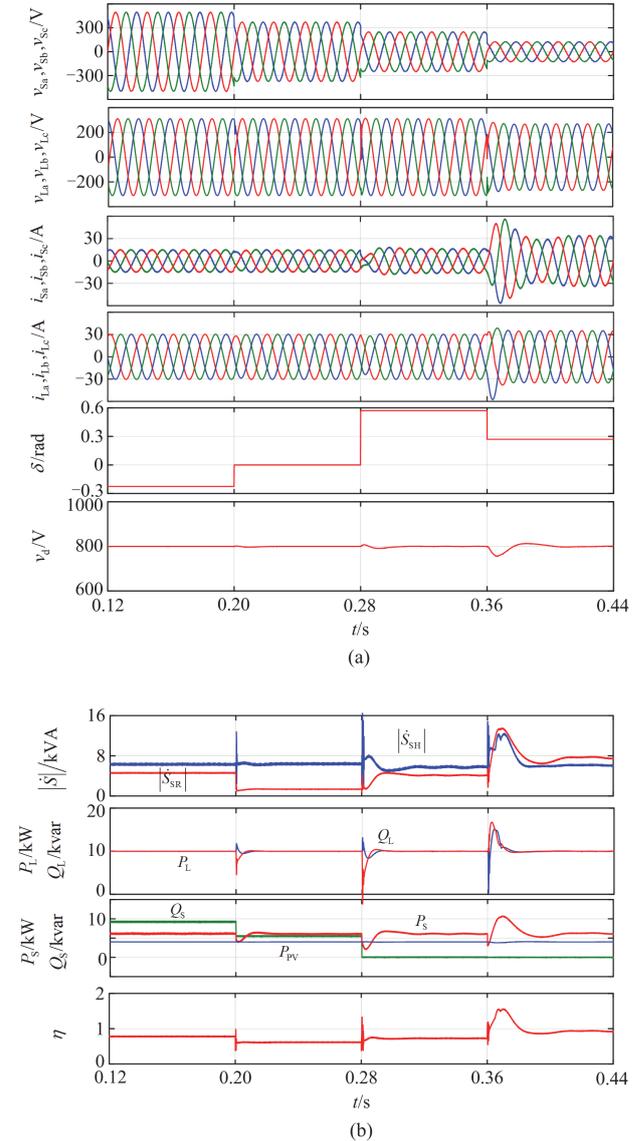


图 8 案例 2 工况下最优运行方案的仿真波形

Fig. 8 Simulation waveforms of proposed scheme in case 2

### 3.3.3 案例 3

在案例 3 中, 光伏阵列和储能电池都接入到 SNLS-UPQC 系统中。

案例 3 的仿真波形如图 9 所示。图 9(a)中，电网与负荷电压、电流波形中红线代表 a 相、绿线代表 b 相、蓝线表示 c 相。由图 9 可知，前两个优化目标能够实现，即负荷电压幅值总是等于额定值，并且光伏以最大输出功率 6 kW 运行。当  $t \in [0.12, 0.28)$  s 时，系统处于优化问题 B 运行工况，其中并联型变换器以额定伏安容量运行。当  $t \in [0.28, 0.44)$  s 时，系统处于优化问题 A 运行工况，即所有优化目标都能够实现。由于储能电池的接入，SNLS-UPQC 系统性能更好。譬如：与案例 2 相比，负荷电压更接近额定值，且  $Q_S$  更小。

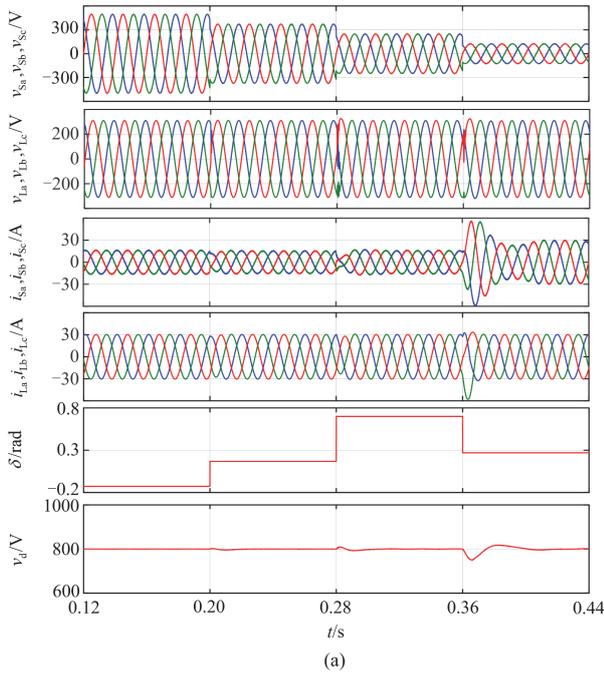


图 9 案例 3 工况下最优运行方案的仿真波形

Fig. 9 Simulation waveforms of proposed scheme in case 3

### 3.4 UPQC-P 与所提优化方案对比分析

为了进一步验证所提最优控制方案的有效性，

将所提方案的运行结果与 UPQC-P 方案的运行结果进行对比分析。

图 10、图 11 给出了系统在基于 PSO-ELM 模型的 UPQC-P 最优控制方案下的运行结果。在案例 1 与案例 3 中，最优控制方案在降低负荷电压偏差、提高电网功率因数和系统利用率方面性能更好。此外，在案例 3 中，由于加入了 UPQC，两种方案下 RES 的消纳率都可以达到 100%。与案例 1 相比，光伏的接入有助于提高负荷电压补偿范围，案例 3 中负荷电压始终保持在额定值。故所提最优控制方案在提高 RES 消纳率、电能质量和系统利用率方面具有较好的性能。

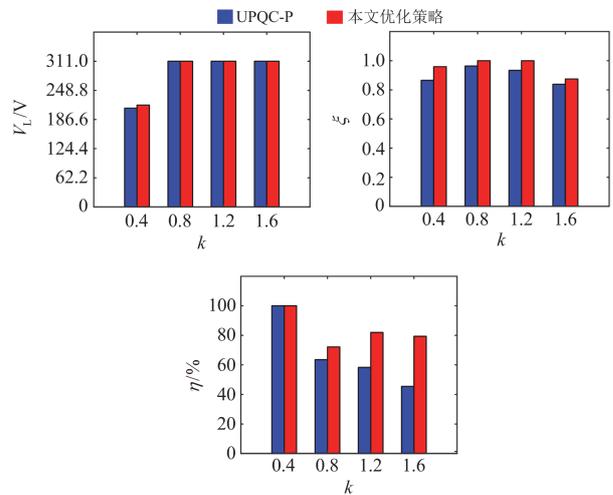


图 10 UPQC-P 与所提优化方案在案例 1 情形下的运行结果

Fig. 10 Operation results under UPQC-P and proposed schemes in case 1

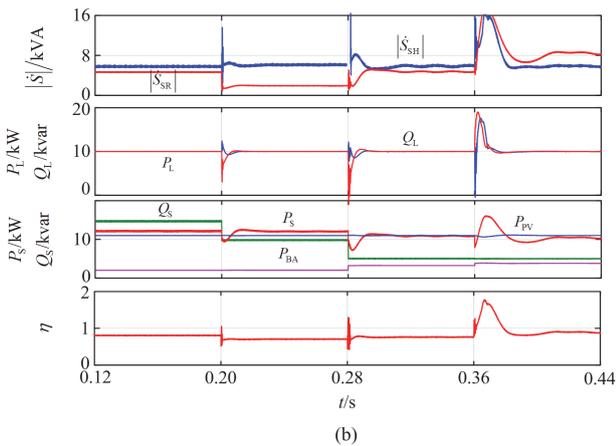


图 9 案例 3 工况下最优运行方案的仿真波形

Fig. 9 Simulation waveforms of proposed scheme in case 3

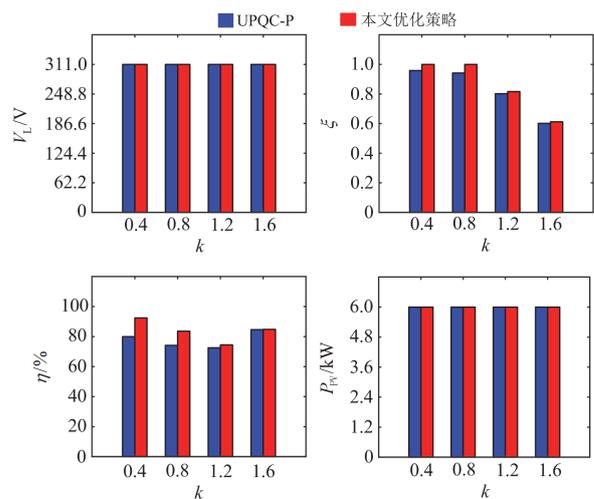


图 11 UPQC-P 与所提优化方案在案例 3 情形下的运行结果

Fig. 11 Operation results under UPQC-P and proposed schemes in case 3

## 4 结论

本研究提出了基于 PSO-ELM 的 SNLS-UPQC 系统的最优控制策略,致力于缓解 RES 消纳率低、电能质量较差、变换器利用率低等问题。本文基于分层优化思想,将多目标优化问题简化为多个单目标优化问题,并利用 PSO 算法求解单目标优化问题,并将所有最优解训练为 PSO-ELM 模型。

与其他方法相比,所提基于 PSO-ELM 的优化运行方案在提高 SNLS-UPQC 系统的 RES 消纳率、电能质量和系统利用率方面具有较好的性能。所提优化运行方案的优点如下:

1) 所提基于 PSO-ELM 的最优运行方案在求解含约束的多目标优化问题时有更好的性能;

2) 本文提出的优化思路同样适用于其他 SNLS 系统。

### 参考文献

- [1] SINGH Y, SINGH B, MISHRA S. Control strategy for multiple residential solar PV system in distribution network with improved power quality[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2023, 59(3): 3686-3699.
- [2] 钟浩,舒栋,张磊,等. 考虑电能质量的配电网增值服务双层优化模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(23): 16-25.  
ZHONG Hao, SHU Dong, ZHANG Lei, et al. A two-layer optimization model of value-added service in a distribution network considering power quality[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(23): 16-25.
- [3] 于芑,刘兴华,孙树敏,等. 高可再生能源渗透率海岛微电网运行控制[J]. *电网技术*, 2018, 42(3): 779-788.  
YU Peng, LIU Xinghua, SUN Shumin, et al. Study on operation control of island microgrid with high renewable energy penetration[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(3): 779-788.
- [4] LIU X, LIU Y, LIU J, et al. Optimal planning of AC-DC hybrid transmission and distributed energy resource system: Review and prospects[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2019, 5(3): 409-422.
- [5] SUN X, QIU J, YI Y, et al. Cost-effective coordinated voltage control in active distribution networks with photovoltaics and mobile energy storage systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2022, 13(1): 501-513.
- [6] 倪福银,李正明. 统一电能质量调节器的研究发展综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(20): 177-187.  
NI Fuyin, LI Zhengming. Overview of unified power quality conditioner research development[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(20): 177-187.
- [7] 王帅,荆龙,吴学智,等. 统一电能质量调节器在新能源发电场的虚拟同步特性分析[J]. *电网技术*, 2020, 44(1): 159-167.  
WANG Shuai, JING Long, WU Xuezhong, et al. Research on virtual synchronization characteristics of unified power quality conditioner in renewable energy farms[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(1): 159-167.
- [8] 张震霄,年珩,李培,等. 储能型统一电能质量调节器电压补偿能力分析及其提升方法[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(23): 151-159.  
ZHANG Zhenxiao, NIAN Heng, LI Pei, et al. Voltage compensation capability analysis and improvement method for unified power quality conditioner with energy storage[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(23): 151-159.
- [9] 刘子维,涂春鸣,姜飞,等. 线间多功能 DVR 的工作机理及仿真分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(21): 41-47.  
LIU Ziwei, TU Chunming, JIANG Fei, et al. Mechanism and simulation analysis of multi-functional interline DVR[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(21): 41-47.
- [10] 吴娜,赵成勇,许建中. 储能型 STATCOM 的优化电压支撑控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(1): 145-155.  
WU Na, ZHAO Chengyong, XU Jianzhong. Optimized voltage support control strategy for energy storage STATCOM[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(1): 145-155.
- [11] SHUBH L, SANJIB G. An on-line operational optimization approach for open unified power quality conditioner for energy loss minimization of distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(6): 4784-4795.
- [12] KHADKIKAR V. Enhancing electric power quality using UPQC: a comprehensive overview[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(5): 2284-2297.
- [13] 杨慎林,黄爱红,刘宇. 一种新型统一电能质量控制器设计原理及控制方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2015, 27(增刊 1): 142-147.  
YANG Shenlin, HUANG Aihong, LIU Yu. A novel design method and control strategy of unified power quality conditioner[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2015, 27(S1): 142-147.
- [14] BASU M, DAS S, DUBEY G. Performance study of UPQC-Q for load compensation and voltage sag mitigation[C]// *IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society*, November 5-8, 2002, Seville, Spain: 698-703.
- [15] LEE W, LEE D, LEE T. New control scheme for a unified power-quality compensator-Q with minimum active power injection[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, 25(2): 1068-1076.

- [16] GUNDEBOINA V, CHILIP R, ARYA S. Power quality enhancement using UPQC-S with multiple adaptive noise cancellation filters[C] // 2022 IEEE 2nd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation, August 4-6, 2022, Hyderabad, India: 1-5.
- [17] ARYA S, ALAM S J, RAY P. Control algorithm based on limit cycle oscillator-FLL for UPQC-S with optimized PI gains[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(3): 649-661.
- [18] AMBATI B B, KHIDKIKAR V. Optimal sizing of UPQC considering VA loading and maximum utilization of power-electronic converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(3): 1490-1498.
- [19] 张国荣, 张铁良, 丁明, 等. 具有光伏并网发电功能的统一电能质量调节器仿真[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(14): 82-86.  
ZHANG Guorong, ZHANG Tieliang, DING Ming, et al. Simulation research on unified power quality conditioner with PV grid connected generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(14): 82-86.
- [20] PATEL A, YADASV S K, MATHUR H D, et al. Optimum sizing of PV based UPQC-DG with improved power angle control[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 182(1): 106259.
- [21] LAKSHMI S, GANGULY S. An on-line operational optimization approach for open unified power quality conditioner for energy loss minimization of distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4784-4795.
- [22] GANGULY S. Multi-objective planning for reactive power compensation of radial distribution networks with unified power quality conditioner allocation using particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1801-1810.
- [23] HAN J, LI X, SUN Y, et al. Optimal operation of UPQC under VA capacity constraints based on hierarchical optimization[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 122(1): 106168.
- [24] 郑旭彬, 李梦达, 王洋, 等. 一种新型并网逆变器 LCL 滤波器参数优化策略[J]. 电子测量技术, 2022, 45(8): 14-20.  
ZHENG Xubin, LI Mengda, WANG Yang, et al. A novel parameter optimization strategy for LCL filters for grid-tied inverters[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(8): 14-20.
- [25] 李福东, 曾旭华, 魏梅芳, 等. 基于聚类分析和混合自适应进化算法的短期风电功率预测[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 151-158.  
LI Fudong, ZENG Xuhua, WEI Meifang, et al. Short-term wind power forecasting based on cluster analysis and a hybrid evolutionary-adaptive methodology[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 151-158.
- [26] 齐郑, 徐希茜, 熊巍, 等. 基于变时段设计改进多目标差分进化算法的风/光/火/储日前优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(16): 62-71.  
QI Zheng, XU Xixi, XIONG Wei, et al. An improved multi objective differential evolution algorithm based on variable time period design for a wind/photovoltaic/thermal/storage system day ahead optimization scheduling[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(16): 62-71.
- [27] 马御棠, 束洪春, 钱国超, 等. 基于频域介电谱曲线分解的氧化锌避雷器老化状态评估[J]. 电工技术学报, 2024, 39(3): 901-913.  
MA Yutang, SHU Hongchun, QIAN Guochao, et al. Method for evaluating the aging state of ZnO arrester based on curve decomposition of frequency domain dielectric spectrum[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(3): 901-913.
- [28] 缪家森, 成丽珉, 吕宏水. 基于 PSO-ELM 的储能锂电池荷电状态估算[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 165-169, 199.  
MIAO Jiasen, CHENG Limin, LÜ Hongshui, et al. Estimation of state of charge of energy storage lithium battery based on PSO-ELM[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 165-169, 199.
- [29] 王志豪, 李自成, 王后能, 等. 基于 RBF 神经网络的光伏系统 MPPT 研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 85-91.  
WANG Zhihao, LI Zicheng, WANG Houneng, et al. MPPT study of solar PV power system based on RBF neural network algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 85-91.
- [30] 谢佳伟, 应展烽, 李德明. 突散发热故障时的光伏 MPPT 变换器控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(11): 170-178.  
XIE Jiawei, YING Zhanfeng, LI Deming. A control method for a photovoltaic MPPT converter with a sudden heat dissipation fault[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(11): 170-178.

收稿日期: 2024-06-17; 修回日期: 2024-10-22

作者简介:

高波(1990—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新能源并网、稳定性分析电能质量控制; E-mail: gbgaobo@163.com

韩建(1993—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电能质量控制、新能源并网优化运行及稳定性分析。E-mail: hanj947@163.com

(编辑 许威)