

# 基于 NSGA-II 的 UPQC 多目标 PI 控制器 参数优化研究

黄 雄<sup>1\*</sup>, 吴天杰<sup>1</sup>, 陈锐忠<sup>1</sup>, 罗 杰<sup>1</sup>, 林少佳<sup>1</sup>, 宋平平<sup>1</sup>, 刘 剑<sup>2</sup>

(1. 海南电网有限责任公司 琼海供电局, 海南 琼海 571442;

2. 湖南大学设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410006)

## Research on Parameter Optimization of UPQC Multi-Objective PI Controller Based on NSGA-II

HUANG Xiong<sup>1\*</sup>, WU Tianjie<sup>1</sup>, CHEN Ruizhong<sup>1</sup>, LUO Jie<sup>1</sup>, LIN Shaojia<sup>1</sup>,  
SONG Pingping<sup>1</sup>, LIU Jian<sup>2</sup>

(1. Qionghai Power Supply Bureau, Hainan Electric Power Grid Co., Ltd., Qionghai 571442, China;

2. Hu'nan University Design and Research Institute Co., Ltd., Changsha 410006, China)

**Abstract:** [ **Objective** ] This study investigates the multi-objective optimization of proportional integral (PI) controller parameters for the unified power quality conditioner (UPQC) using the non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II). UPQC is a crucial power quality enhancement device capable of effectively mitigating voltage fluctuations, harmonics, and imbalances in the grid. Its performance is highly dependent on the optimal configuration of controller parameters. Traditional optimization methods fail to satisfy the system's multi-objective performance requirements and are susceptible to local optima. To overcome these challenges, this paper introduces a multi-objective optimization approach based on NSGA-II, aiming to identify a controller parameter configuration that concurrently optimizes harmonic suppression, voltage stability, and dynamic response speed. [ **Methods** ] The study utilizes NSGA-II for multi-objective optimization. This algorithm achieves global optimization of the multi-objective function through fast non-dominated sorting and crowding degree calculation. NSGA-II possesses strong global search capabilities and rapid convergence characteristics, enabling it to swiftly and accurately identify the optimal solution for UPQC controller parameter optimization. In the optimization process, harmonic suppression, voltage stability, and dynamic response speed are prioritized as the main optimization objectives. By

precisely adjusting the PI controller parameters, the optimal control strategy is derived. [ **Results** ] The effectiveness and accuracy of the proposed strategy are verified through grid voltage compensation simulation and DC/AC side voltage simulation. In the grid voltage compensation simulation, the proposed strategy is compared with the nonlinear proportional integral-model predictive control (PI-MPC) strategy. The proposed strategy compensates the voltage waveform to be closer to a sine wave, with a smoother and more uniform waveform, and lower harmonic content compared to the nonlinear PI-MPC strategy. In the DC/AC side voltage simulation, the proposed strategy achieves shorter adjustment time, lower overshoot, and quicker recovery time when the system is disturbed, exhibiting stronger robustness than other strategies. [ **Conclusion** ] The PI controller parameter optimization strategy based on NSGA-II can effectively enhance the performance of UPQC under complex operating conditions, improving the system's power quality and response efficiency. Compared to traditional methods, this optimization strategy not only improves power quality but also demonstrates better stability and faster adjustment capabilities in dynamic response processes.

**Key words:** parameter optimization; proportional integral controller; non-dominated sorting genetic algorithm II; unified power quality conditioner; power quality

基金项目: 海南电网科技项目(070400KC23090013)

Hainan Electric Power Grid Technology Project (070400KC  
23090013)

**摘要:** [ **目的** ] 本文研究了基于非支配排序遗传算法 II (NSGA-II) 的统一电能质量调节器 (UPQC) 多目标比例

积分(PI)控制器参数优化问题。UPQC作为一种重要的电力质量改善装置,能够有效抑制电网电压波动、谐波及不平衡等问题,但其性能依赖于控制器参数的合理配置。针对传统优化方法难以满足系统的多目标性能需求,且容易陷入局部最优的问题,本文提出了一种基于NSGA-II的多目标优化策略,旨在寻求一种能够同时优化谐波抑制、电压稳定性和动态响应速度的控制器参数配置方案。【方法】本文采用NSGA-II进行多目标优化,该算法通过快速非支配排序和拥挤度计算来实现多目标函数的全局优化。NSGA-II具有良好的全局搜索能力和快速收敛特性,因此优化UPQC控制器的参数时,能够快速而准确地找到最优解。在优化过程中,以谐波抑制、电压稳定性和动态响应速度作为主要优化目标,通过精确调整PI控制器参数,求得最优的控制策略。【结果】通过电网电压补偿仿真和直流、交流侧电压仿真来验证本文所提策略的有效性和准确性。在电网电压补偿仿真中,将本文策略与非线性比例积分-模型预测控制(PI-MPC)策略进行对比,本文所提策略实际补偿电压波形更趋于正弦曲线,且波形较为光滑平顺,谐波含量比非线性PI-MPC策略更小。在直流、交流侧电压仿真中,本文策略比其他策略的调节时间更短且超调量更低,在系统发生扰动时恢复时间更短,具有更强的鲁棒性。【结论】基于NSGA-II的PI控制器参数优化策略能够有效提升UPQC在复杂工况下的性能表现,提高系统的电能质量和响应效率。与传统方法相比,该优化策略不仅提升了电力质量,而且在动态响应过程中表现出更优的稳定性和更快速的调节能力。

**关键词:** 参数优化;比例积分控制器;非支配排序遗传算法II;统一电能质量调节器;电能质量

## 0 引言

以新能源为主要发展趋势的新型电力系统,用电侧非线性负荷的频繁使用导致电网出现谐波、电压波动及电压不平衡等电能质量扰动问题<sup>[1-3]</sup>,进而导致电力设备故障或损坏,甚至影响区域电网的安全稳定运行<sup>[4-6]</sup>。统一电能质量调节器(Unified Power Quality Conditioner, UPQC)作为一种电能质量管理装置,能够同时解决电压和电流的多种电能质量问题,主要包括电压骤降、骤升、闪变、中断、不平衡以及谐波等。UPQC主要由串联有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)和并联APF组成,通过二者协同作用来改善电网和负载侧的电能质量<sup>[7-9]</sup>。为充分发挥UPQC稳定电网电能质量的作用,需对UPQC进

行有效控制<sup>[8]</sup>。比例积分(Proportional Integral, PI)控制器因具有结构简单、响应快速和实现容易等优点,被广泛应用于UPQC的控制系统,以实现电能质量的高效调节<sup>[11-14]</sup>。

UPQC消除电能质量扰动的能力与PI控制器参数的合理配置关联较大。传统PI控制器调节方法,如Ziegler-Nichols方法<sup>[15]</sup>,在动态和非线性环境下可快速响应、高效调节,但由于其参数设置通常较为激进,导致系统持续振荡甚至不稳定。传统的PI调节方法通常依赖于系统的数学建模<sup>[16]</sup>,此方法计算复杂,且无法准确捕捉系统在实际运行条件下的动态行为。此外,这些方法通常需要在在线调节过程中放宽PI控制器的输出限制,严重影响硬件安全。

优化技术已成为调节复杂系统中PI控制器控制参数、实现高效电能质量补偿的重要途径。其中,粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法因其简单、易于实施以及能够在高维空间中找到最优解而被广泛用于PI控制器参数的优化<sup>[17-19]</sup>。但PSO算法及其改进算法在优化PI控制器参数时存在易陷入局部最优、收敛速度不稳定以及多样性保持能力不足等缺点,不适用于多目标、动态控制场景。遗传算法<sup>[20]</sup>和差分进化<sup>[21]</sup>算法因具有较强的全局搜索能力,适合复杂非线性系统,能够优化UPQC的PI控制器参数以提高补偿性能,但这两类方法对参数(如交叉概率、变异率)较为敏感,计算复杂度较高,且需要结合其他算法才能应付多目标和实时性较高的优化任务。此外,神经网络<sup>[22-23]</sup>因其强大的非线性建模能力和自动优化能力,常用于PI控制器参数的优化,但该类方法存在依赖大量高质量数据、优化过程缺乏可解释性等缺点,难以在实际中广泛应用。模糊模型<sup>[24]</sup>在动态变化的电力系统中处理多目标PI控制器参数优化问题优势明显,但此类方法存在计算复杂度较高、规则设计依赖经验以及缺乏理论保障等缺陷,难以设计出针对性的最优模糊控制器。本文针对上述方法的局限性,提出了一种新的自适应Volterra最小均方/四阶(Least Mean Square/Fourth, LMS/F)算法用于UPQC多目标PI控制器参数的优化,以提高配电系统非线性负荷等复杂电网环境下的电能质量。本

文采用非支配排序遗传算法 II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II) 对 PI 控制器参数进行多目标优化。NSGA-II 在多目标优化、全局搜索、高效收敛和多样性维护等方面具有明显优势, 将其用于 UPQC 的 PI 控制器参数优化, 可使 UPQC 具有较好的控制性能, 满足系统对多重性能指标的要求。

本文首先使用 Volterra LMS/F (V-LMS/F)<sup>[15]</sup> 算法提取基本的有效和无功分量, 并从失真信号中提取参考信号; 然后采用 NSGA-II 对 PI 控制器参数进行优化, 以此获取 PI 控制器增益的最优值; 最后基于 Matlab/Simulink 建立仿真模型对本文方法的有效性和准确性进行分析和验证。

## 1 UPQC 机理及控制模型

图 1 为典型的三相四线制 UPQC 拓扑结构图, 由波纹滤波器  $R_f$  和  $C_f$ 、串联注入变压器、普通直流电容  $C_{dc}$ 、可控 APF、串联接口电感  $L_{se}$ 、并联接口电感  $L_{sh}$  及非线性负载组成。当系统发生接地故障时图中锯齿形变压器提供中性电流补偿, APF 根据源电流和负载电流之间的差异将补偿电流注入交流电源中。

本文采用抗干扰性能强的自适应 V-LMS/F 算法对 UPQC 进行控制, 采用该算法得到参考电源电流和参考负载电压, 并根据参考信号生成控制正弦脉宽调制 (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM) 开关状态的脉冲信号。

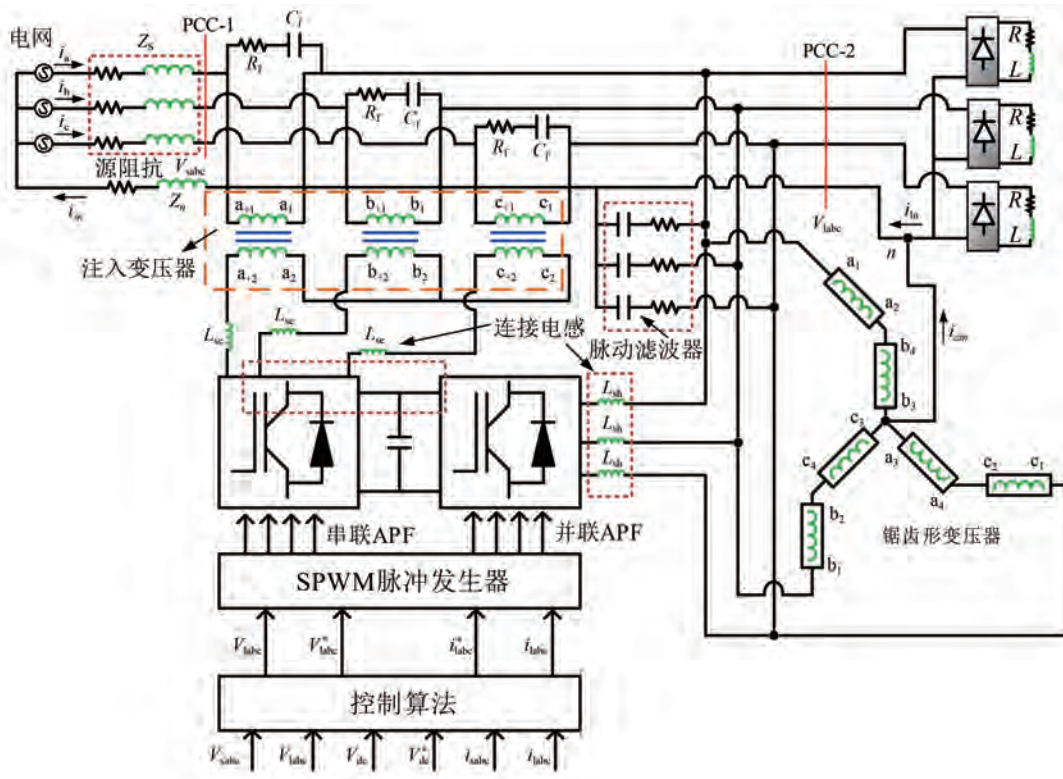


图 1 典型的三相四线制 UPQC 拓扑结构图

Fig. 1 Typical three-phase four-wire UPQC topology diagram

### 1.1 V-LMS/F 算法

V-LMS/F 算法的代价函数  $L_k$  的数学表达式为<sup>[22]</sup>

$$L_k = \frac{1}{2}e_k^2 - \frac{1}{2}\varepsilon \cdot \ln(e_k^2 + \varepsilon) \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon$  为一正阈值参数, 用于控制函数的收敛速度和性能;  $e_k$  为产生的误差值。

$L_k$  对应的 LMS/F 权值向量  $\mathbf{W}$  的更新方程为

$$\mathbf{W}_{k+1}(n+1) = \mathbf{W}_k(n) + \mu \frac{e_k^3(n)}{e_k^2(n) + \varepsilon} \mathbf{X}_k(n) \quad (2)$$

式中:  $\mu$  为步长控制参数, 用于调节函数的收敛速度和性能;  $\mathbf{X}_k(\cdot)$  为具有脉冲响应的物理系统输入向量。

$\varepsilon$  阈值设定对于平衡 LMS 算法和 LMF 算法

至关重要。当  $\varepsilon \gg e_k^2$  时,式(2)作为步长为  $\mu/\varepsilon$  的常规 LMF 算法工作;当  $\varepsilon \ll e_k^2$  时,式(2)作为步长为  $\mu$  的常规 LMS 算法工作。

Volterra 滤波器作为非线性系统使用最为广泛的滤波器,其自适应滤波级数  $\hat{W}_k(\cdot)$  展开易于扩展至适合任何模型。因此,本文采用 Volterra 滤波器展开的结构和 LMS/F 算法通过加权向量  $\mathbf{W}(0)=[0, 0, 0, 0, 0]$  和输入向量  $\mathbf{X}_k=[X, \dots, x_{k-M}x_k^2, \dots, x_{k-1}]$  来构造 V-LMS/F 算法,具体为

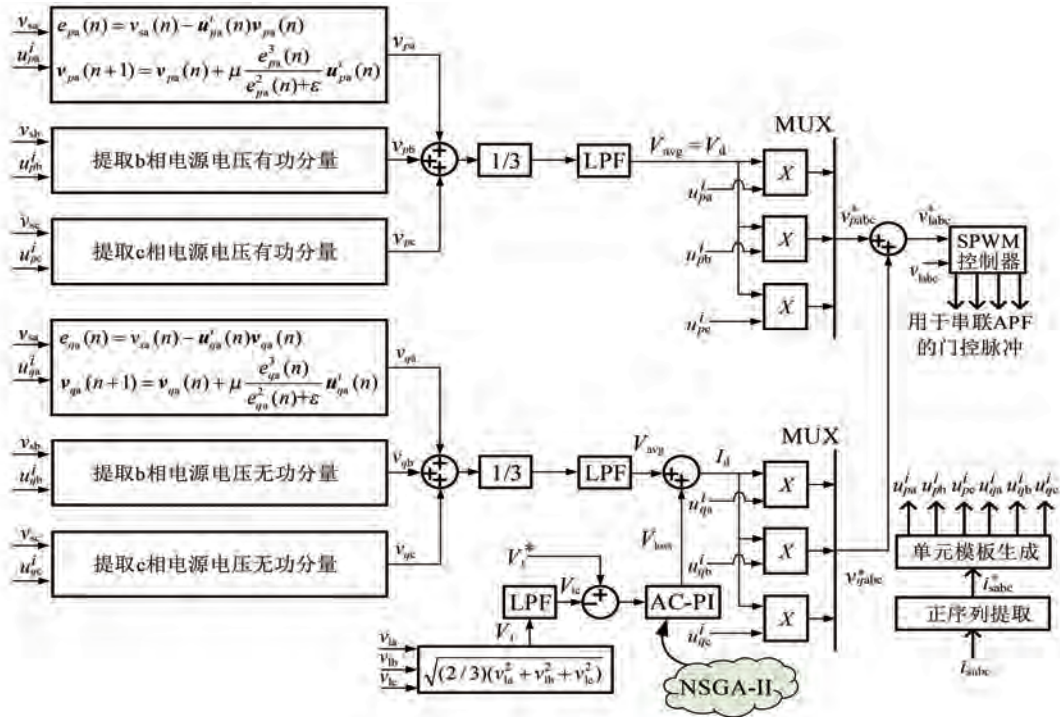


图 2 UPQC 参考信号生成控制框图一

Fig. 2 UPQC reference signal generation control block diagram one

### (1) PCC 信号的基本分量估计

通过式(3)来估计含噪声电力信号中的基本分量或权重,即将 V-LMS/F 算法的输出  $v_{pa}(n)$ 、 $v_{pb}(n)$  和  $v_{pc}(n)$  作为 a、b 和 c 相位的有功分量权重向量。V-LMS/F 算法提取 a 相有源电压有功分量  $e_{pa}(n)$  的表达式为

$$\begin{cases} e_{pa}(n) = v_{sa}(n) - \mathbf{u}_{pa}^i(n) \mathbf{v}_{pa}(n) \\ \mathbf{v}_{pa}(n+1) = \mathbf{v}_{pa}(n) + \mu \frac{e_{pa}^3(n)}{e_{pa}^2(n) + \varepsilon} \mathbf{u}_{pa}^i(n) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{u}_{pa}^i(\cdot)$  为同相电压信号。

同样地,利用 V-LMS/F 算法提取 a 相有源电压无功分量  $e_{qa}(n)$  的表达式为

$$\hat{\mathbf{W}}_{k+1}(n+1) = \hat{\mathbf{W}}_k(n) + \mu \frac{e_k^3(n)}{e_k^2(n) + \varepsilon} \mathbf{X}_k(n) \quad (3)$$

式中:  $e_k = d_k - \mathbf{W}_k \mathbf{X}_k$ ,  $d_k$  为期望的系统输出,  $\mathbf{W}_k$  为滤波系数矢量。

### 1.2 控制信号预处理和同步信号生成

图 2 为 UPQC 参考信号生成控制框图一,包括共耦合点 (Point of Common Coupling, PCC) 信号的基本分量估计、单元模板生成的正序列分量估计以及单元模板生成的确定三部分。

$$\begin{cases} e_{qa}(n) = v_{sa}(n) - \mathbf{u}_{qa}^i(n) \mathbf{v}_{qa}(n) \\ \mathbf{v}_{qa}(n+1) = \mathbf{v}_{qa}(n) + \mu \frac{e_{qa}^3(n)}{e_{qa}^2(n) + \varepsilon} \mathbf{u}_{qa}^i(n) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{u}_{qa}^i(\cdot)$  为正交电压信号。

同理可得被测信号 b、c 相位的有功和无功分量。由图 2 可知,将提取的各相电压信号有功和无功分量相加的平均值作为低通滤波器 (Low Pass Filter, LPF) 的输入。

### (2) 单元模板生成的正序分量估计

在电压谐波条件下,为了正确估计同步单元模板,需要电网的正序电压。由于获取原始信号中各谐波处的正序列分量差异较大,因此,本文应

用文献[25]中所提出的数学变换方法提取 a、b、c 三相电压信号的正序分量。并以此从感应电网电流获得电源电流  $i_{sabc}^+$  的正序分量,用于生成同步单元模板。同样地,求出电源电压  $v_{sabc}^+$  的正序分量,用于生成同步单元模板。

### (3) 单元模板生成

PCC 电压幅值  $V_s^+ = \{ (2/3) [(v_{sa}^+)^2 + (v_{sb}^+)^2 + (v_{sc}^+)^2] \}^{1/2}$  是系统不平衡条件的重要组成部分。同相电压信号 ( $u_{pa}^v$ 、 $u_{pb}^v$  和  $u_{pc}^v$ ) 和正交电压信号 ( $u_{qa}^v$ 、 $u_{qb}^v$  和  $u_{qc}^v$ ) 作为单元模板的输出,根据式(4)和式(5)从各相位 PCC 电压生成对称分量,且主要用于并联 APF 门控脉冲生成。同样地,同相电压信号 ( $u_{pa}^i$ 、 $u_{pb}^i$  和  $u_{pc}^i$ ) 和正交电压信号 ( $u_{qa}^i$ 、 $u_{qb}^i$  和  $u_{qc}^i$ ) 作为单元模板的输出,从电源电流计算出,且用于串联 APF 门控脉冲生成。此外,PCC 电流幅值  $I_s^+$  的计算方法与  $V_s^+$  相同<sup>[26]</sup>。

### 1.3 UPQC 控制策略

图 3 为 UPQC 参考信号生成控制框图二,包括参考电源电流的产生、参考负载电压的产生。

#### (1) 参考电源电流的产生。

电源电流的总有效分量  $I_d$  为负载电流的平均有效分量的总和  $I_{avg}$ ,但由于电能质量扰动的干扰,需额外增加电流有源损耗分量  $I_{loss}$  来稳定直流链路电容  $C_{dc}$ 。 $I_d$ 、 $I_{avg}$  和  $I_{loss}$  的关系式为

$$I_d = I_{avg} + I_{loss} \quad (6)$$

根据图 3 所示的 UPQC 控制框图,得到直流母线 PI 控制器输出为

$$I_{loss}(t) = I_{loss}(t-1) + K_{pd}[V_{dce}(t) - V_{dce}(t-1)] + K_{id}V_{dce}(t) \quad (7)$$

式中: $I_{loss}(t)$  为  $t$  时刻电源电流的有源部分。 $K_{pd}$  和  $K_{id}$  为 PI 控制器增益; $V_{dce}$  为参考直流电压  $V_{dc}^*$  和实际直流电压  $V_{dc}$  之间的误差。

三相电源电流的有功分量  $i_{pa}^*$ 、 $i_{pb}^*$  和  $i_{pc}^*$  的计算式为

$$\begin{cases} i_{pa}^* = I_d \times u_{pa}^v \\ i_{pb}^* = I_d \times u_{pb}^v \\ i_{pc}^* = I_d \times u_{pc}^v \end{cases} \quad (8)$$

设电源电流的无功分量  $i_{qabc}^*$  为零,参考电源电流  $i_{sabc}^*$  与电网电压同相,且系统中无零序分量。参考电源电流  $i_{sabc}^*$  通过式(9)得出:

$$\begin{cases} i_{sa}^* = i_{pa}^* + 0 \\ i_{sb}^* = i_{pb}^* + 0 \\ i_{sc}^* = i_{pc}^* + 0 \end{cases} \quad (9)$$

电流误差为参考电源电流  $i_{sa}^*$ 、 $i_{sb}^*$  和  $i_{sc}^*$  与感测栅极电源电流  $i_{sa}$ 、 $i_{sb}$  和  $i_{sc}$  的差值,并将该误差作为并联 APF 开关脉冲的 SPWM 模块的输入。

#### (2) 参考负载电压产生。

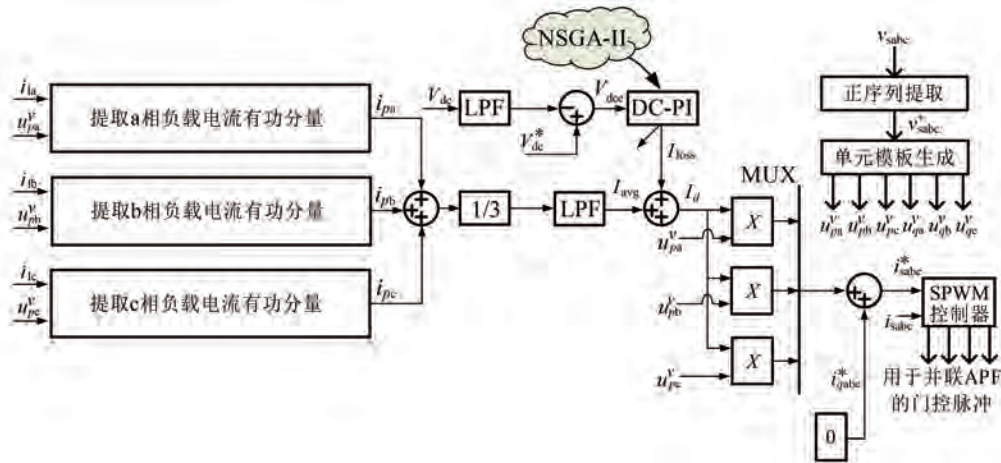


图 3 UPQC 参考信号生成控制框图二

Fig. 3 UPQC reference signal generation control block diagram two

为确保电源电流和负载电压相一致性,负载电压总有效分量  $V_d$  需等于电源电压的平均有效分量  $V_{avg}$ ,即:

$$V_d = V_{avg} \quad (10)$$

同样地,负载电压的总无功分量  $V_q$  为  $V_{avg}$  和维持终端电压的附加损耗无功分量  $V_{loss}$  总和,即:

$$V_q = V_{avg} + V_{loss} \quad (11)$$

此外, $V_{loss}$  同时需考虑串联变流器通过变压

器的电压,得到交流母线 PI 控制器输出为

$$V_{\text{loss}}(t) = V_{\text{loss}}(t-1) + K_{\text{pt}} [V_{\text{te}}(t) - V_{\text{te}}(t-1)] + K_{\text{it}} V_{\text{te}}(t) \quad (12)$$

式中:  $V_{\text{loss}}(t)$  为  $t$  时刻负载电压的有源部分;  $K_{\text{pt}}$  和  $K_{\text{it}}$  为交流母线 PI 控制器增益;  $V_{\text{te}}$  为 PCC 负载侧参考终端电压  $V_{\text{t}}^*$  和实际终端电压  $V_{\text{t}}$  的误差,  $V_{\text{t}}^*$  表达式为

$$V_{\text{t}}^* = \sqrt{(2/3) [(v_{\text{la}})^2 + (v_{\text{lb}})^2 + (v_{\text{lc}})^2]} \quad (13)$$

三相同相参考负载电压  $v_{\text{pabc}}^*$  为

$$\begin{cases} v_{\text{pa}}^* = V_{\text{d}} \times u_{\text{pa}}^i \\ v_{\text{pb}}^* = V_{\text{d}} \times u_{\text{pb}}^i \\ v_{\text{pc}}^* = V_{\text{d}} \times u_{\text{pc}}^i \end{cases} \quad (14)$$

正交参考负载电压  $v_{\text{qabc}}^*$  为

$$\begin{cases} v_{\text{qa}}^* = V_{\text{q}} \times u_{\text{qa}}^i \\ v_{\text{qb}}^* = V_{\text{q}} \times u_{\text{qb}}^i \\ v_{\text{qc}}^* = V_{\text{q}} \times u_{\text{qc}}^i \end{cases} \quad (15)$$

参考负载电压  $v_{\text{la}}^*$ 、 $v_{\text{lb}}^*$  和  $v_{\text{lc}}^*$  通过叠加有功和无功分量计算得出:

$$\begin{cases} v_{\text{la}}^* = v_{\text{pa}}^* + v_{\text{qa}}^* \\ v_{\text{lb}}^* = v_{\text{pb}}^* + v_{\text{qb}}^* \\ v_{\text{lc}}^* = v_{\text{pc}}^* + v_{\text{qc}}^* \end{cases} \quad (16)$$

电压误差为参考负载电压  $v_{\text{la}}^*$ 、 $v_{\text{lb}}^*$  和  $v_{\text{lc}}^*$  与感测电网负载电压  $v_{\text{la}}$ 、 $v_{\text{lb}}$  和  $v_{\text{lc}}$  的差值,并将该误差作为串联 APF 开关脉冲的 SPWM 模块的输入。

## 2 基于 NSGA-II 的 PI 控制器

NSGA-II 作为一种多目标遗传算法主要用于优化具有多个目标的复杂问题<sup>[27]</sup>。在本文的 UPQC 系统中,采用 NSGA-II 对 PI 控制器增益  $K_{\text{pd}}$ 、 $K_{\text{id}}$ 、 $K_{\text{pt}}$  和  $K_{\text{it}}$  等多个指标进行调优。该算法在遗传算法的基础上引入了非支配排序和拥挤度的概念,能有效寻找帕累托最优解集。

### 2.1 快速非支配排序和拥挤度计算

NSGA-II 通过快速非支配排序和拥挤度计算来实现。快速非支配排序基于非支配排序,通过快速排序减少计算时间。非支配排序将候选解划分为多个级别,各级别均包含一组互相不支配解。若某解在各目标函数上都至少与另一个解相等,

并且在至少一个目标函数上更优,那么称其为另一个解的“支配者”,非支配关系和支配区域的示意图如图 4 所示。

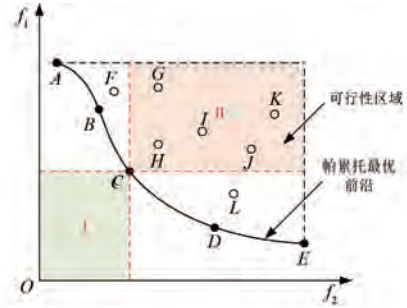


图 4 非支配关系和支配区域的示意图

Fig. 4 Schematic diagram of non-dominated relationship and dominant region

图 4 中,实心点  $C$  为目标函数的解,经过该点且与两个目标空间坐标轴平行的虚线将区域分为 I 和 II。区域 I 内任意解均支配解  $C$ ; 区域 II 内的所有解均被解  $C$  所支配。实心点  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  和  $E$  均处在帕累托最优前沿上,为非支配的帕累托最优解。处于解区域的空心点  $F$ 、 $G$ 、 $H$ 、 $I$ 、 $J$ 、 $K$  和  $L$  均远离最优前沿,且直接或间接接受帕累托最优前沿上的最优解支配。非支配排序将多组互不支配的解集合按顺序划分层次。对于  $n$  个集合,其非支配排序可以表示为  $\text{rank}_1, \text{rank}_2, \dots, \text{rank}_n$  (集合  $\text{rank}_i$  中的任意解支配  $\text{rank}_j$  中的任意解,  $i < j$ )。

在 NSGA-II 中,为评估处于同一帕累托前沿上各解的优劣,通常定义拥挤度作为参考因素。拥挤度的思想是让求得的帕累托最优解在目标空间中尽量分散,即让解在最优前沿上尽可能地均匀分布。拥挤度计算示意图如图 5 所示。

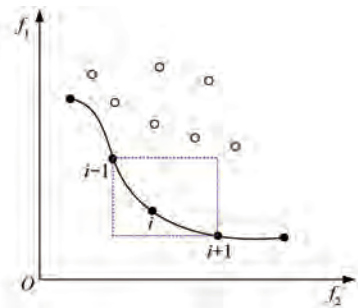


图 5 拥挤度计算示意图

Fig. 5 Diagram of crowding calculation

通过计算与最优前沿解  $i$  相邻的两个解  $i-1$  和  $i+1$  的目标函数值经归一化后的绝对值之差,

得到  $i$  的拥挤度,具体表达式为

$$dist_k(i) = \frac{f_k(i+1) - f_k(i-1)}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} \quad (17)$$

式中:  $f_k^{\max}$  和  $f_k^{\min}$  分别为单个前沿中在第  $k$  个目标函数上的极大值和极小值,极值间拥挤度定义为无穷大。

遍历所有目标函数并将各目标函数上已归一化的拥挤度通过式 (18) 相加得到第  $i$  个个体的拥挤度,即:

$$dist(i) = \sum_k dist_k(i) \quad (18)$$

通过式 (18) 得到各个体的拥挤度,再按拥挤度从大至小的原则对同一最优前沿上的解依次排序。

## 2.2 遗传算子

NSGA-II 的进化更新主要包括选择、变异和交叉三种遗传算子。

选择算子模拟自然界中的优胜劣汰法则,其基本原则是适应度高的个体被遗传到下一代的概率更大。本文采用二进制随机联赛选择方法,该方法在具有较大随机性的同时,大概率保证了让最优个体进入子代、最差个体被淘汰。

NSGA-II 采用模拟二进制交叉算子,第  $k+1$  代的两个个体计算式为

$$\begin{cases} p_{k+1}^1 = \frac{[(1-\beta_k)p_k^1 + (1-\beta_k)p_k^2]}{2} \\ p_{k+1}^2 = \frac{[(1-\beta_k)p_k^1 + (1-\beta_k)p_k^2]}{2} \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $p_{k+1}^1, p_{k+1}^2$  为交叉后的第  $k+1$  代个体;  $p_k^1, p_k^2$  为第  $k$  代个体;  $\beta_k$  为第  $k$  代均匀分布因子,其计算式为

$$\begin{cases} \beta_k = (2u_k)^{\frac{1}{\eta+1}}, u_k \leq 0.5 \\ \beta_k = [(2u_k)^{\frac{1}{\eta+1}}]/1, u_k > 0.5 \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $u_k$  为在  $[0, 1)$  上均匀分布的随机数;  $\eta$  为交叉分布指数,通常取值为  $20 \sim 30$ ,  $\eta$  的值影响生成的子代个体与父代个体的远近,本文设置  $\eta = 25$ 。

本文 NSGA-II 的变异算子采用多项式变异算子,第  $k+1$  代个体的计算式为

$$p_{k+1} = p_k + \delta_k (p_k^{\max} - p_k^{\min}) \quad (21)$$

$$\delta_k = \begin{cases} (2r_k)^{\frac{1}{\eta+1}} - 1, r_k \leq 0.5 \\ 1 - [2(1-r_k)^{\frac{1}{\eta+1}}]^{\frac{1}{\eta+1}}, r_k > 0.5 \end{cases} \quad (22)$$

式中:  $p_k, p_{k+1}$  分别为变异前、后的个体;  $p_k^{\max}, p_k^{\min}$  分别为决策变量的上、下界;  $r_k$  为在  $[0, 1)$  上均匀分布的随机数;  $\eta_m$  为变异分布指数,其值越大表示子代个体离父代个体越近,本文取  $\eta_m = 10$ 。

## 2.3 NSGA-II 流程

NSGA-II 流程如图 6 所示。首先将  $N$  个个体种群初始化,再进行非支配排序和拥挤度计算来生成第一代子代。然后,采用精英选择策略生成新的种群,精英选择策略是一种产生子代种群的优化算法,用于在群体中选择最优个体以完成进化和优化,示意图如图 7 所示。

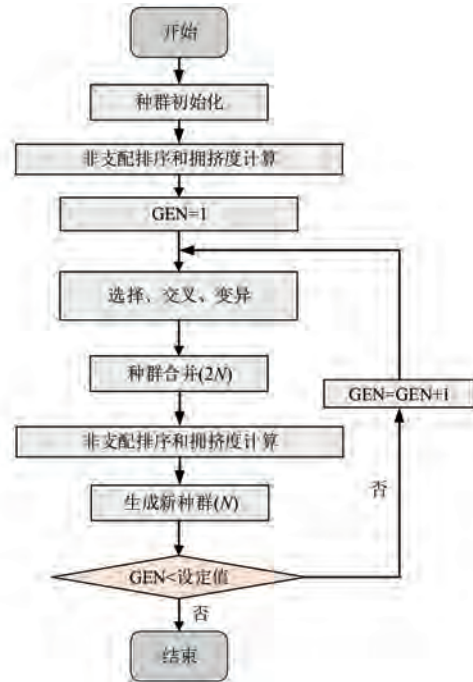


图 6 NSGA-II 流程图

Fig. 6 NSGA-II flow chart

图 7 中,  $P_t$  和  $Q_t$  分别为第  $t$  次迭代时父代种群和子代种群,种群规模均为  $N$ 。将二者合并得到种群规模为  $2N$  的合并种群  $R_t$ 。再对  $R_t$  进行快速非支配排序,得到所有不同等级的非支配解集  $F_1, F_2, \dots$ ,按照需要计算每个非支配解集中所有个体的拥挤度,并采用拥挤度比较算法创建新的种群  $P_{t+1}$ 。精英选择策略具体步骤如下:

(1) 从当前种群中选择适应性最强的个体,

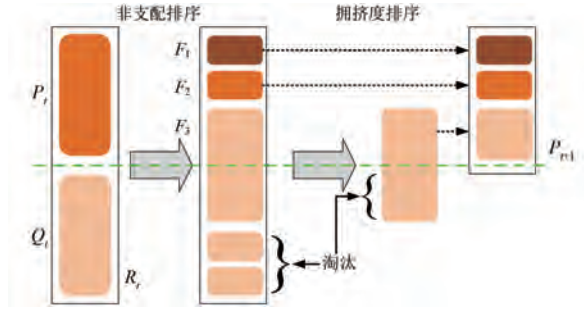


图 7 精英选择策略示意图

Fig. 7 Elite selection strategy diagram

将其称为“精英”个体;

(2) 将精英个体复制若干次,加入下一代种群中;

(3) 用遗传算子(如交叉、变异)对下一代种群进行交叉和变异;

(4) 重复步骤(1)~步骤(3),直到满足停止条件为止。

通过精英选择策略,种群中的优秀个体可在进化过程中得到保留和强化,进而促进算法收敛,达到优化效果。

对于本文 PI 控制器,其中一个用于控制直流链路电压(即直流 PI 控制器),另一个用于控制交流链路终端电压(即交流 PI 控制器),PI 控制器的优化模型对应的函数为

$$\min F = \{f_1, f_2\} \quad (23)$$

式中: $F$  为总目标函数; $f_1$  和  $f_2$  为目标函数,其表达式为

$$f_{i=1,2}(K) = \min \{ ITAE [ (1 - e^{-\rho}) (M_p + E_{ss}) + e^{-\rho} (t_s - t_r) ] \} \quad (24)$$

式中: $K = [K_p, K_i]$  为 PI 控制器的参数增益; $ITAE$ 、 $E_{ss}$ 、 $M_p$ 、 $t_s$  和  $t_r$  分别为时间绝对误差积分(Integral Time Absolute Error, ITAE)值、稳态误差、最大过冲、稳定时间和上升时间; $e$  为误差值; $\rho$  为加权因子。

直流 PI 控制器的目标函数 ITAE-1 和交流 PI 控制器的目标函数 ITAE-2 分别被分配了未知变量  $K_{pd}$ 、 $K_{id}$  和  $K_{pi}$ 、 $K_{ii}$ 。ITAE-1 为参考直流端电压  $V_{dc}^*$  和实际感测到的直流端电压  $V_{dc}$  之间的误差。ITAE-2 为参考交流端电压  $V_i^*$  和实际感测到交流端电压  $V_i$  之间的误差。

### 3 试验与分析

为验证本文所提方法的有效性和准确性,基于 Matlab/Simulink 对采用 Volterra LMS/F 算法的四线 UPQC 建立仿真模型。采用 Matlab 里 ODE5 求解器进行仿真,采样时间为  $10^{-6}$  s。

用于 UPQC 仿真的 V-LMS/F 参数设置为:交流线路电压  $V_{sabc}$  为 415 V、50 Hz;非线性负载  $R = 5 \Omega$ 、 $L = 250$  mH;交流母线电压  $V_l = 339$  V,直流电压  $V_{dc} = 700$  V;直流母线电容  $C_{dc} = 7\ 000 \mu\text{F}$ ;注压变压器为 5 kVA、120/120 V;锯齿形变压器为 7 kVA、120/120 V;并联侧接口电感  $L_{sh} = 2.5$  mH;低通滤波器  $R_f = 4$ 、 $C_f = 20 \mu\text{F}$ ;开关频率 10 kHz;V-LMS/F 增益  $\mu = 0.9$ 、 $\varepsilon = 0.05$ 。NSGA-II 参数设置如表 1 所示。

表 1 NSGA-II 参数设置

Tab. 1 NSGA-II parameter settings

参数名称	参数值
最大迭代次数	50
种群规模	80
个体的后代数量	10

#### 3.1 PI 控制器参数求解

基于 NSGA-II 的 UPQC 多目标 PI 控制器参数优化训练结果是一组位于帕累托最优前沿上的最优参数解集,即利用帕累托解估计出 PI 控制器增益  $K_{pd}$ 、 $K_{id}$ 、 $K_{pi}$  和  $K_{ii}$  的最佳值,如图 8 所示。图中每个点表示由一组参数训练优化模型的测试结果,横坐标为目标函数  $f_1$ ,纵坐标为目标函数  $f_2$ 。

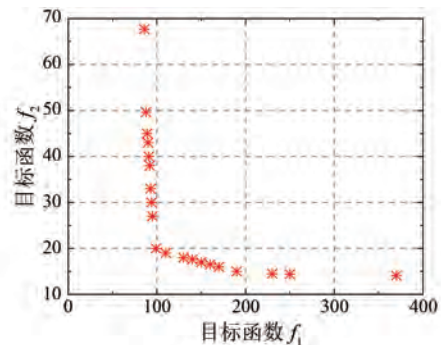


图 8 参数优化的帕累托边界结果

Fig. 8 Pareto boundary results of parameter optimization

由图 8 可知,目标函数  $f_1$  的最小值为 85.63,目标函数  $f_2$  的最小值为 15.38。图中帕累托边界



为较平滑曲线,位于左下角的点分布密集,两边的点较为稀少,说明产生极值的参数组合较少。结果表明在迭代过程中,参数解以及模型的稳定性较好,不容易出现函数同时为 0 的极端情况。

图 9 为直流母线端 PI 控制器增益  $K_{pd}$  和  $K_{id}$  随迭代次数的变化曲线图。从图中可看出,迭代次数为 8~22 时,增益  $K_{pd}$  和  $K_{id}$  随迭代次数的变化出现较大波动,最终分别稳定为 2.63 和 0.806。

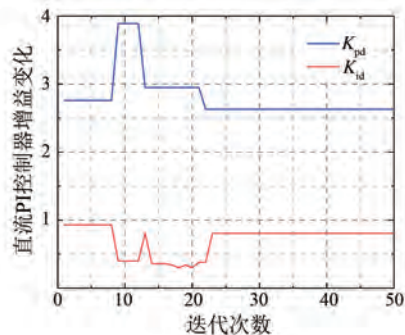


图 9 直流 PI 控制器增益随迭代次数变化图

Fig. 9 The gain of DC PI controller change with iteration number

图 10 为交流母线端 PI 控制器增益  $K_{pi}$  和  $K_{ii}$  随迭代次数的变化曲线图。从图中可看出,迭代次数为 8~22 时,增益  $K_{pi}$  和  $K_{ii}$  随迭代次数的变化出现较大波动,最终分别稳定为 26.06 和 5.41。

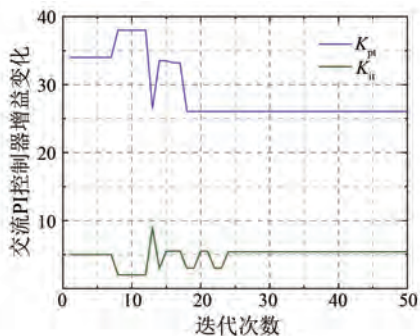


图 10 交流 PI 控制器增益随迭代次数变化图

Fig. 10 The gain of AC PI controller change with iteration number

### 3.2 电网电压补偿仿真

三种电能质量扰动情况下三相电网电压波形图如图 11 所示。0.1 s~0.2 s 注入由 10% 的 5 次谐波和 5% 的 7 次谐波叠加而成的谐波;0.2 s~0.3 s 电压暂升,暂升电压为基波电压的 25%;0.3 s~0.4 s 电压暂降,暂降电压为基波电压的 25%。其他时段,三相电压波形为三相平衡电压。

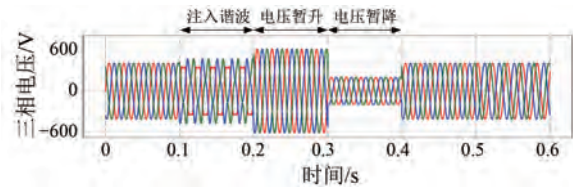


图 11 电能质量扰动的电网三相电压波形图

Fig. 11 Three-phase voltage waveforms of power grid with power quality disturbance

由于仿真电路为对称三相电路,为更好地分析研究结果,本文以 A 相电压波形为例展示电网电压补偿的有效性。电能质量扰动时电网的 A 相电压波形图如图 12 所示。

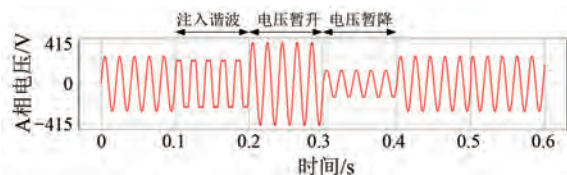


图 12 电能质量扰动的电网 A 相电压波形图

Fig. 12 A-Phase voltage waveform of power grid with power quality disturbance

为确保系统的稳定性和有效性,通过控制 UPQC 尽可能地消除稳态误差,使三相电网电压维持稳定。A 相补偿电压期望波形图如图 13 所示。

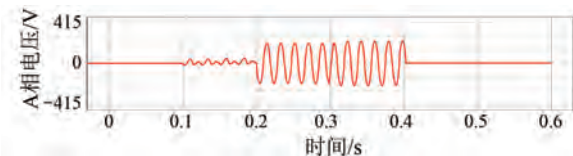


图 13 A 相补偿电压期望波形图

Fig. 13 A phase compensation voltage expected waveform diagram

为验证本文方法的有效性,将本文策略与目前研究较为有效的非线性比例积分-模型预测控制 (PI-Model Predictive Control, PI-MPC) 策略<sup>[19]</sup> 进行比较分析。非线性 PI-MPC 策略实际补偿电压波形图如图 14 所示。从图 14 可看出,负载电压波形接近于正弦曲线,但包含谐波分量以致出现一些波动,且波形较为粗糙。

本文所提控制策略实际补偿电压波形图如图 15 所示。从图 15 可看出,负载电压波形接趋于正弦曲线,且波形较为光滑平顺,谐波含量相比于非线性 PI-MPC 策略更小,由此可验证本文所提的方法的有效性和可靠性。

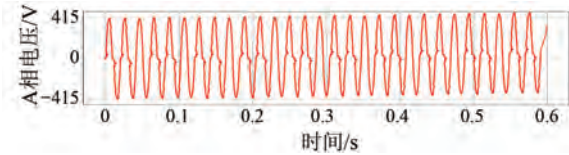


图 14 非线性 PI-MPC 控制策略实际补偿电压波形图

Fig. 14 Actual compensation voltage waveform of nonlinear PI-MPC control strategy

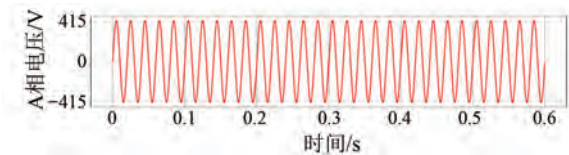


图 15 本文控制策略实际补偿电压波形图

Fig. 15 Actual compensation voltage waveform of the control strategy in this paper

### 3.3 直流和交流侧电压仿真

NSGA-II 优化后的最佳直流端电压的阶跃响应波形图如图 16 所示。图中公差带为最终值的 100% (即 700 V), 对于欠阻尼系统, 公差带为 3% (即图中 679 V~722 V)。在负载不平衡情况下稳态误差为 16 V, 而在其他电能质量扰动变化中为 5 V。但在文献[17]所提的 PSO 算法中, PI 增益在所有电能质量扰动情况下稳态误差远高于本文 NSGA-II。

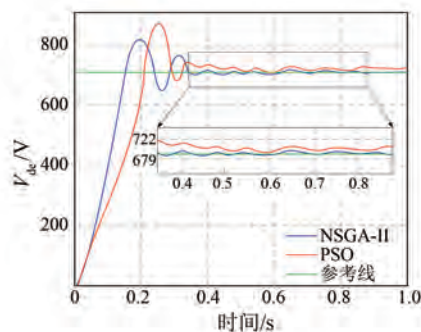


图 16 NSGA-II 优化后的直流端电压阶跃响应波形图

Fig. 16 DC terminal voltage step response waveform optimized by NSGA-II

NSGA-II 优化后的最佳交流端电压的阶跃响应波形图如图 17 所示。图中公差带为最终值的 100% (即 339 V), 对于欠阻尼系统, 公差带为 3% (即图中 329 V~345 V)。在负载不平衡情况下稳态误差为 3 V。

由图 16 和 17 可知, NSGA-II 与 PSO 算法相比, 系统响应在稳态误差、建立时间和峰值过冲方

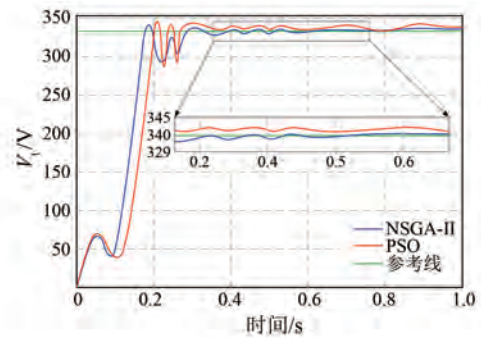


图 17 NSGA-II 优化后的交流端电压阶跃响应波形图

Fig. 17 AC terminal voltage step response waveform optimized by NSGA-II

面更优, 且直流母线端电压和交流母线端电压更稳定。结果表明 NSGA-II 更适用于优化 UPQC 系统控制。

为进一步验证本文方法的有效性, 采用 PI-MPC<sup>[28]</sup>、非线性 PI-MPC<sup>[29]</sup>、PSO<sup>[17]</sup> 以及本文策略获取直流侧电压超调量和调节时间, 试验结果如表 2 所示。结果表明, 相比于其他 3 种控制策略, 本文策略的调节时间更短且超调量更低, 在系统发生扰动时恢复时间更短, 具有更强的鲁棒性。

表 2 不同控制策略下直流侧电压超调量和调节时间对比

Tab. 2 Comparison of DC side voltage overshoot and regulation time under different control strategies

控制策略	超调量/%	调节时间/s
PI-MPC	22.14	0.056
非线性 PI-MPC	16.63	0.043
PSO	16.51	0.044
本文策略	15.7	0.031

## 4 结语

本文提出了一种基于 NSGA-II 的 UPQC 多目标 PI 控制器参数优化策略, 以谐波抑制、电压稳定和动态响应速度为优化目标, 实现了控制器参数的全局优化配置。V-LMS/F 算法相比于其他方法更适用于提取电压骤降、负载不平衡、电压不平衡以及电流和电压失真期间的基波分量, 通过引入快速非支配排序和拥挤度计算, 有效克服了传统优化方法难以满足多目标性能需求及易陷入局部最优的局限性。仿真结果表明, 基于 NSGA-II 优化的 PI 控制器参数方案显著提升了 UPQC 的性能表现。在复杂工况下, 该方法不仅能有效

抑制谐波并保持电压稳定,还显著缩短了动态响应时间,提高了系统的综合性能和电能质量。表明 NSGA-II 在 UPQC 参数优化中的应用具有显著的优势和实际价值。

未来研究将进一步结合实际工程需求,探索更加复杂的工况和多目标权重自适应调整策略,同时研究算法在实时控制系统中的高效实现,为 UPQC 的工程应用提供更全面的技术支持。

### 利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

### 作者贡献

黄雄进行了方案设计、内容总结与论文撰写,吴天杰、陈锐忠、罗杰、林少佳和宋平平进行了试验研究,刘剑参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary and paper writing were carried out by Huang Xiong. The experiment research was conducted by Wu Tianjie, Chen Ruizhong, Luo Jie, Lin Shaojia, and Song Pingping. The manuscript was revised by Liu Jian. All authors have read the last version of paper and consented for submission.

### 参考文献

- [ 1 ] 吕红芳,王涛,嵇月强,等. 基于免疫粒子群算法的 PID 参数优化研究[J]. 中国工程机械学报, 2022, 20(3): 194-198.  
LYU H F, WANG T, JI Y Q, et al. Optimization of PID control parameters based on immune particle swarm optimization [ J ]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2022, 20(3): 194-198.
- [ 2 ] 孟维奇,何晋伟,韩俊飞,等. 非隔离型单相三桥臂统一电能质量控制器直流侧电压灵活调节与波动抑制技术[J]. 电工技术学报, 2024, 39(20): 6517-6525.  
MENG W Q, HE J W, HAN J F, et al. DC-link voltage flexible regulation and fluctuation suppression technology of single-phase transformer less three-leg UPQC [ J ]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(20): 6517-6525.
- [ 3 ] 吴志超,姚勇,王义国,等. 基于联邦学习和边缘计算的电能质量扰动分类方法研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(11): 32-43.  
WU Z C, YAO Y, WANG Y G, et al. Research on power quality disturbance classification method based on federated learning and edge computing [ J ]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(11): 32-43.
- [ 4 ] 骆宗义. 配电网 UPQC 系统设计及补偿检测控制策略研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2024, (2): 158-162.  
LUO Z Y. Design of distribution network UPQC system and research on compensation detection control strategy [ J ]. Automation & Instrumentation, 2024, (2): 158-162.
- [ 5 ] 李林蔚,闫一凡. 高性能交直交牵引变电所主电路结构及控制策略研究[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(6): 78-87.  
LI L W, YAN Y F. Research on main circuit structure and control strategy of high performance AC-DC-AC traction substation [ J ]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(6): 78-87.
- [ 6 ] 赵本强,曾江,谢宝平,等. 基于光伏逆变器的电网谐波阻抗测量新技术[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(3): 1-9.  
ZHAO B Q, ZENG J, XIE B P, et al. New technology of grid harmonic impedance measurement based on photovoltaic inverter [ J ]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(3): 1-9.
- [ 7 ] ALTINTASIA C, ORGUNER U, SALOR O. Performance limits for the amplitude estimation of power system harmonics & inter-harmonics [ J ]. IET Generation Transmission & Distribution, 2020, 14(19): 4108-4121.
- [ 8 ] CARUGATI I, ORALLO C, DONATO P, et al. Three-phase harmonic and sequence components measurement method based on mSDFT and variable sampling period technique [ J ]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(8): 1761-1772.
- [ 9 ] ALAM S J, ARYA S R, JANA R K. Biogeography based optimization strategy for UPQC PI tuning on full order adaptive observer based control [ J ]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2021, 15(2): 279-293.

- [10] SIVAKUMAR M, KANNAN P, PANDIAN S. Mitigation of PQ issues using an enhanced UPQC-based ANN approach [J]. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 2019, 28(3): 1950046.
- [11] KHADKIKAR V. Enhancing electric power quality using UPQC: A comprehensive overview [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(5): 2284-2297.
- [12] 王伟炳, 宋伟豪. 基于 FOCA 的永磁游标电机 PI 参数自整定[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(7): 94-102.  
WANG W B, SONG W H. PI parameter self-tuning of permanent magnet vernier motor based on FOCA [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(7): 94-102.
- [13] 陈欣, 胡涛, 蒋全. 基于改进蜜獾算法的永磁同步电机 PI 控制参数优化仿真[J]. *电机与控制应用*, 2022, 49(8): 28-33+92.  
CHEN X, HU T, JIANG Q. PI control parameter optimization simulation of permanent magnet synchronous motor based on improved Honey Badger algorithm [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2022, 49(8): 28-33+92.
- [14] 王南越, 尹明德, 周兆钟, 等. 基于龙伯格观测器的 BLDC 滑模控制系统仿真研究[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(10): 24-30+38.  
WANG N Y, YIN M D, ZHOU Z Z, et al. Simulation research on sliding mode control system of BLDC based on Luenberger observer [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(10): 24-30+38.
- [15] WU H, SU W H, LIU Z G. PID controllers: Design and tuning methods [C]//2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Hangzhou, 2014.
- [16] 梁祖权, 束洪春. 新型 UPQC 直流电压的  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  控制[J]. *电工技术学报*, 2010, 25(02): 147-151+157.  
LIANG Z Q, SHU H C. Novel UPQC DC voltage research of  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  controller [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2010, 25(2): 147-151+157.
- [17] 杨佳艺, 赵成勇, 苑宾, 等. 基于粒子群优化算法的 VSC-HVDC 系统的控制参数优化策略[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(12): 178-183.  
YANG J Y, ZHAO C Y, YUAN B, et al. Parameter optimization of VSC-HVDC control system based on particle swarm optimization algorithm [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(12): 178-183.
- [18] 何兵. 基于改进粒子群算法的 LC 型逆变器 PI 参数优化[J]. *电工技术*, 2022, (2): 10-12+38.  
HE B. Optimization of PI parameter of LC inverter based on improved particle swarm algorithm [J]. *Electric Engineering*, 2022, (2): 10-12+38.
- [19] 裴水旺, 刘松凯, 杨明毅, 等. 基于 PSO-TSM 的伺服电机精准调距控制[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(3): 56-64.  
PEI S W, LIU S K, YANG M Y, et al. Precision pitch control of servo motor based on PSO-TSM [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(3): 56-64.
- [20] 仇宝玉, 肖军. 基于 GA 参数优化整定的 PI 型广义预测控制[J]. *科学技术与工程*, 2011, 11(2): 367-370.  
ZHANG B Y, X J. PI-type generalized predictive control based on GA parameter optimization and tuning [J]. *Science Technology and Engineering*, 2011, 11(2): 367-370.
- [21] 汪若涵, 庄原, 朱艺超, 等. 基于差分进化算法的微电网小水电 PID 参数优化研究[J]. *云南电力技术*, 2023, 51(3): 30-34.  
WANG R H, ZHUANG Y, ZHU Y C, et al. Research on PID parameter optimization of small hydropower in micro grid based on differential evolution algorithm [J]. *Yun'nan Electric Power*, 2023, 51(3): 30-34.
- [22] KATTA P, SUGUNA R, JOSEPH D, et al. CNN assisted SRF theory with firefly optimized single phase UPQC system for PQ improvement [C]//2023 International Conference on Circuit Power and Computing Technologies, Kollam, 2023.
- [23] 曹美禾, 宋琳, 孙军, 等. 深度学习及其在电机控制中的研究现状与展望[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(5): 1-9.  
CAO M H, SONG L, SUN J, et al. Research and prospect on deep learning and its application in motor control [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(5): 1-9.
- [24] RANJAN A, KEWAT S, SINGH B. Reweighted  $L_1$  norm penalized LMS fourth algorithm of solar grid interfaced system for alleviating power quality

- problems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 5352-5362.
- [25] PATNAIK A, NANDA S. The variable step-size LMS/F algorithm using nonparametric method for adaptive system identification [J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2020, 34(12): 1799-1811.
- [26] BENYSEK G, PASKO M. Power Theories for Improved Power Quality [M]. Heidelberg, Germany: Springer, 2012.
- [27] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [28] 张旭, 杨学友, 刘常杰. 模型预测控制在统一电能质量调节器中的应用[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 35-40.  
ZHANG X, YANG X Y, LIU C J. Application of model predictive control in unified power quality conditioner [J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 35-40.
- [29] 陈东雪, 王久和, 李建国, 等. UPQC 的非线性 PI-模型预测控制策略[J]. 北京信息大学学报, 2023, 38(1): 15-23.  
CHEN D X, WANG J H, LI J G. Nonlinear PI-model predictive control strategy for UPQC [J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University, 2023, 38(1): 15-23.

---

收稿日期:2024-11-21

收到修改稿日期:2025-01-07

作者简介:

黄雄(1984-),男,博士,工程师,研究方向为人工智能在电力系统中的应用,zhoukuisf@126.com;

\* 通信作者:黄雄(1984-),男,博士,工程师,研究方向为人工智能在电力系统中的应用,zhoukuisf@126.com。