

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2025 年 1 月 16 日 (16.01.2025)



(10) 国际公布号
WO 2025/011027 A1

- (51) 国际专利分类号:
H02J 3/01 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2024/077376
- (22) 国际申请日: 2024 年 2 月 18 日 (18.02.2024)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
202310860883.2 2023年7月13日 (13.07.2023) CN
- (71) 申请人: 浙江大学 (ZHEJIANG UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。南方电网科学研究院有限责任公司 (RESEARCH INSTITUTE OF CHINA SOUTHERN POWER GRID CO., LTD.) [CN/CN]; 中国广东省广州市黄埔区科学城科翔路 11 号, Guangdong 510663 (CN)。
- (72) 发明人: 刘展宁 (LIU, Zhanning); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。刁瑞盛 (DIAO, Ruisheng); 中国浙江省杭州市西湖

区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。郑外生 (ZHENG, Waisheng); 中国广东省广州市黄埔区科学城科翔路 11 号, Guangdong 510663 (CN)。周保荣 (ZHOU, Baorong); 中国广东省广州市黄埔区科学城科翔路 11 号, Guangdong 510663 (CN)。李诗旻 (LI, Shiyang); 中国广东省广州市黄埔区科学城科翔路 11 号, Guangdong 510663 (CN)。毛田 (MAO, Tian); 中国广东省广州市黄埔区科学城科翔路 11 号, Guangdong 510663 (CN)。姚文峰 (YAO, Wenfeng); 中国广东省广州市黄埔区科学城科翔路 11 号, Guangdong 510663 (CN)。

- (74) 代理人: 杭州天勤知识产权代理有限公司 (HANGZHOU TIANQIN INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY CO., LTD.); 中国浙江省杭州市西湖区竞舟路 1 号筑品金座 501 室, Zhejiang 310013 (CN)。
- (81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI,

(54) Title: NSGA-II ALGORITHM-BASED PARAMETER OPTIMIZATION METHOD FOR LCL-TYPE GRID-CONNECTED INVERTER FILTER IN WEAK POWER GRID

(54) 发明名称: 基于NSGA-II算法的弱电网LCL型并网逆变器滤波器参数优化方法

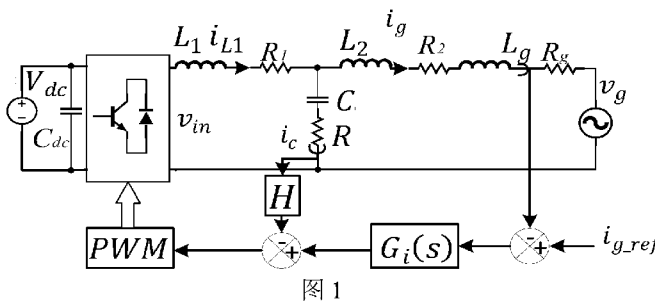


图 1

(57) Abstract: Disclosed in the present invention is an NSGA-II algorithm-based parameter optimization method for LCL-type grid-connected inverter filters in a weak power grid, comprising: modeling a single-phase inversion system in a weak power grid, and using inverter side inductance L_1 , grid side inductance L_2 , filtering capacitance C and passive damping resistance R as parameters to be optimized; setting boundary constraints for a total inductance value L , the inverter side inductance L_1 , the grid side inductance L_2 and the filtering capacitance C ; constructing objective functions of a switching frequency harmonic attenuation ratio η , an inverter end inductor current ripple ΔI_{ripple} , a damping resistor power consumption $P_{R_{\text{loss}}}$ and a resonant frequency f_r ; and on the basis of an NSGA-II algorithm model, using said parameters as decision variables, performing iterative optimization on the plurality of objective functions according to the boundary constraints so as to obtain a parameter solution set of optimal solutions, and selecting a group of typical values from the parameter solution set as optimization solutions. The present invention can significantly improve the filtering effect and the weak grid resistance of filters.



GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

- (84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要: 本发明公开了一种基于NSGA-II算法的弱电网LCL型并网逆变滤波器参数优化方法, 包括: 对弱电网下的单相逆变系统进行建模, 将逆变侧电感 L_1 、网侧电感 L_2 、滤波电容 C 以及无源阻尼的电阻 R 作为待优化参数; 设置电感总值 L 、逆变侧电感 L_1 、网侧电感 L_2 、滤波电容 C 的界限约束; 构建开关频次谐波衰减比 η 、逆变端电感电流纹波 ΔI_{ripple} 、阻尼电阻功耗 P_{R_loss} 和谐振频率 f_r 的目标函数; 基于NSGA-II算法模型, 将待优化参数作为决策变量, 根据界限约束, 对多个目标函数通过迭代优化得到最优解的参数解集, 并从参数解集中挑取一组典型值作为优化解。利用本发明, 可以大大提高滤波器的滤波效果与抗弱网能力。

基于 NSGA-II 算法的弱电网 LCL 型并网逆变滤波器参数优化方法

技术领域

本发明属于逆变滤波器领域,尤其是涉及一种基于 NSGA-II 算法的弱电网 LCL 型并网逆变滤波器参数优化方法。

背景技术

并网逆变器是支撑新能源并网的关键设备,相比于 L 与 LC 型滤波器,LCL 型对高频谐波有更好的抑制效果,其具体性能与主要取决于 LCL 参数,因此滤波器参数的设计十分重要。但滤波器的参数设计要求的限制更多,而且计算量更大、准确性差;此外,由于是弱电网的条件,更需要综合考虑系统多运行工况下的安全性和控制鲁棒性。

早期滤波器设计方法依据大量工程经验,结合电磁特性采取试凑法进行参数设计,经过充分的实验结果并结合图解法,形成了传统的滤波器参数设计方法,如文献“Xinbo Ruan. Control Techniques for LCL-Type Grid-Connected Inverters. Beijing, CN: Science Press, 2015.”。

文献“S. Jayalath and M. Hanif, "An LCL-Filter Design With Optimum Total Inductance and Capacitance," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 8, pp. 6687-6698, Aug. 2018.”中,对 LCL 滤波器中单个参数进行优化,但是无法保证整个系统的最优滤波效果。

发明内容

本发明提供了一种基于 NSGA-II 算法的弱电网 LCL 型并网逆变滤波器参数优化方法,大大提高了滤波器的滤波效果与抗弱网能力。

一种基于 NSGA-II 算法的弱电网 LCL 型并网逆变滤波器参数优化方法,包括:

对弱电网下的单相逆变系统进行建模,将逆变侧电感 L_1 、网侧电感 L_2 、滤波电容 C 以及无源阻尼的电阻 R 作为待优化参数;

设置电感总值 L 、逆变侧电感 L_1 、网侧电感 L_2 、滤波电容 C 的界限约束;

构建开关频次谐波衰减比 η 、逆变端电感电流纹波 ΔI_{ripple} 、阻尼电阻功耗 $P_{R_{loss}}$ 和谐振频率 f_r 的目标函数;

基于 NSGA-II 算法模型,将待优化参数作为决策变量,根据界限约束,对多个目标函数通过迭代优化得到最优解的参数解集,并从参数解集中挑取一组典型值作为优化解。

基于 NSGA-II 算法模型的决策变量为:

$$X = [L_1, L_2, C, R]$$

该模型中对上述参数采用单一变量原则分析各个参数对系统的影响;参数变化均为线性增加,在传统试凑法的参数基础上进行变化。

界限约束中,电感总值 L 需要满足两个条件:第一,需要限制落在电感上的压降产生的最大电流;第二,需要削减电流的纹波,使其在允许范围内;即需要满足如下不等式约束:

$$\frac{V_{dc}}{4\Delta I_{ripple-max}f_s} \leq L \leq \frac{\sqrt{V_{dc}^2 - V_{g\_max}^2}}{\omega_0 I_{g\_max}}$$

式中, V_{g_max} 、 I_{g_max} 为电网侧电压和电流峰值, V_{dc} 为直流侧电压, $\Delta I_{ripple-max}$ 为逆变侧最大电流纹波, f_s 为开关频率, ω_0 为电网频率。

逆变侧电感 L_1 和网侧电感 L_2 需满足以下约束:

$$\frac{V_{in}T_s}{8\lambda_{c\_L1}I_{L1}} \leq L_1 \leq \frac{\lambda_{v\_L1}V_C}{\omega_0 I_{L1}} \approx \frac{\lambda_{v\_L1}V_g}{\omega_0 I_{L1}}$$

$$L_1 \geq L_2$$

式中, T_s 为开关周期, λ_{c_L1} 为电流纹波系数, λ_{v_L1} 为电感压降系数, ω_0 为电网频率, V_{in} 表示滤波器输入电压(即逆变侧输出电压), I_{L1} 表示逆变侧电感电流, V_C 表示滤波器电容节点电压, V_g 表示电网侧电压。

滤波电容 C 需满足以下约束:

$$C \leq \frac{\lambda_c P_o}{\omega_0 V_g^2}$$

式中： P_o 为网侧输出额定功率； ω_0 为电网频率； λ_c 为电容无功功率对额定输出有功比； V_g 为电网侧电压。

目标函数中，开关频次谐波衰减比 η 是优先级最高的优化目标，如下式所示：

$$\eta = \frac{I_g(s)}{I_{L1}(s)} \Big|_{s=j\omega_s} = \sqrt{\frac{1 + R^2 C^2 \omega_s^2}{(1 - L_2 C \omega_s^2)^2 + R^2 C^2 \omega_s^2}}$$

式中， $I_g(s)$ 为复频域下电网测电流表达式， $I_{L1}(s)$ 为复频域下逆变侧电感电流表达式， ω_s 为开关角频率， $s = j\omega_s$ 表示条件是当频率为开关角频率时。

目标函数中，需要最小化逆变端电感电流纹波：

$$\Delta I_{ripple} = \frac{V_{dc}}{4f_s L_1}$$

式中，逆变端输出电压 $V_{in} \approx V_{dc}$ ， V_{dc} 为直流电压， L_1 为逆变侧电感， f_s 为开关频率。

目标函数中，需要最小化阻尼电阻功耗 P_{R_loss} ：

$$P_{R\_loss} = \frac{R V_g^2}{R^2 + \frac{1}{\omega_0^2 C^2}} \approx R V_g^2 \omega_0^2 C^2$$

式中， V_g 表示电网侧电压， ω_0 为电网频率。

目标函数中，为了满足 LCL 滤波器的低通特性，谐振频率选择：

$$10f_0 \leq f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} \leq 0.5f_s$$

式中， f_s 、 f_r 分别为开关频率与谐振频率， f_0 表示电网频率；由于关系到三个变量的条件并非线性，因此，用两个需要最小化的目标函数保证谐振频率的取值在允许范围：

$$F_1 = 10f_0 - f_r$$

$$F_2 = f_r - 0.5f_s$$

最终，总的目标函数为 $\min[\eta, \Delta I_{ripple}, P_{R_{loss}}, F_1, F_2]$

与现有技术相比，本发明具有以下有益效果：

本发明针对弱电网条件下的 LCL 型滤波器并网逆变系统的参数选择，采取了多目标优化的遗传算法（NSGA-II）。首先对弱电网下的单相逆变系统进行建模，分析了不同滤波器参数对系统稳定性的影响，提出了为了增强系统稳定性的参数解的选择标准。基于传统试凑法给出了参数的界限约束，并给出了针对系统的多个优化目标，从得出的优化解集中选出典型解。免去了大量试凑过程，增强了系统对弱网条件的抗性，在满足并网要求情况下进一步降低了谐波畸变率。

附图说明

- 图 1 为本发明实施例中 LCL 型滤波器并网逆变拓扑结构；
- 图 2 为本发明实施例中 LCL 型并网逆变系统闭环控制框图；
- 图 3 为本发明实施例中 NSGA-II 算法流程图；
- 图 4 为本发明实施例中滤波器参数增大时系统闭环极点移动趋势图；
- 图 5 为本发明实施例中优化参数解集；
- 图 6 为本发明实施例中传统参数下的系统响应；
- 图 7 为本发明实施例中优化参数下的系统响应。

具体实施方式

下面结合附图和实施例对本发明做进一步详细描述，需要指出的是，以下所述实施例旨在便于对本发明的理解，而对其不起任何限定作用。

本发明实施例采用的并网逆变拓扑是电容串联电阻的 LCL 型电路，如图 1 所示。 V_{dc} 、 C_{dc} 为直流电压与滤波电容； L_1 、 L_2 、 L_g 分别为逆变侧、网侧与电网等效电感； R_1 、 R_2 、 R_g 分别为相应的线路电阻； v_{in} 、 v_g 为逆变桥出端电压和电网电压； i_{L1} 、 i_g 、 i_c 、 i_{g_ref} 分别为逆变侧电流、电网电

流、电容电流与电网参考电流。 $G_i(s)$ 为并网电流控制器、 H 为电容电流反馈控制器。

为了更直观地体现系统的结构,逆变的系统闭环控制框图如图2所示。电流控制器 $G_i(s)$ 为PI控制器, H 是比例反馈, K_{PWM} 为逆变器的等效传递函数,为直流电压与载波电压幅值的比。本发明实施例所采用的电容串联电阻是简单、有效的削减谐振峰阻尼方法,电容电流反馈使系统反应的速度加快。

为了简化传递函数,忽略掉较小的线路阻抗值 R_1 、 R_2 。由此,可以得到逆变端输出电压到电网电流的传递函数以及整体闭环系统的传递函数:

$$G_1(s) = \frac{I_g(s)}{V_{in}(s)} = \frac{RCs+1}{L_1(L_2+L_g)Cs^3+(L_1+L_2+L_g)Rs^2+(L_1+L_2+L_g)s} \quad (1)$$

$$G_p(s) = \frac{I_g(s)}{I_{g\_ref}(s)} = \frac{K_p + \frac{K_i}{s}}{K_p + \frac{K_i}{s} + (\frac{1}{K_{PWM}} + \frac{HCs}{L_1Cs^2+RCs+})G_1(s) - \frac{HL_1Cs^2}{L_1Cs^2+RCs+}} \quad (2)$$

接下来,根据以上的模型对参数进行分析优化。

通常情况下,多目标优化算法模型会根据具体问题求得一组解,且互相无耦合关系,称为Pareto最优解集。本发明选择了NSGA-II算法框架,在遗传算法的基础上对种群的个体进行分级和快速非支配性排序,通过精英策略防止优秀个体流失。

NSGA-II算法的主要流程如图3所示。首先,随机产生规模为 N 的初始种群 P_t ,经过非支配排序、选择、交叉和变异,产生子代种群 Q_t ,并将两个种群联合在一起形成大小为 $2N$ 的种群 R_t 。其次,进行快速非支配排序,同时对每个非支配层中的个体进行拥挤度计算,根据非支配关系以及个体的拥挤度选取合适的个体组成新的父代种群 P_{t+1} 。最后,通过遗传算法的基本操作产生新的子代种群 Q_{t+1} ,将 P_{t+1} 与 Q_{t+1} 合并形成新的种群 R_{t+1} ,重复以上操作,直到满足程序结束的条件。

在本次的参数设计优化中,设计的主要参数为滤波电感电容 L_1 、 L_2 、 C 以及无源阻尼的电阻 R ,因此基于NSGA-II算法模型的决策变量为:

$$X = [L_1, L_2, C, R] \quad (3)$$

由于算法的最优解集一般数目比较大，因此需要借助一些额外的判据。在该模型中可以对上述参数采用单一变量原则分析各个参数对系统的影响。参数变化均为线性增加，在传统试凑法的参数基础上进行变化。在此基础上，各自参数变化分别为： $L_1(850\mu H \rightarrow 1200\mu H)$, $L_2(500\mu H \rightarrow 1200\mu H)$, $C(4\mu F \rightarrow 18\mu F)$, $R(2\Omega \rightarrow 9\Omega)$ 。

从图4可以看出，在滤波电感 L_1 、 L_2 增大的过程中，主导极点一直向虚轴靠近，系统稳定性会变差；电容 C 增大的过程中，极点实部绝对值先增大后减小；电阻 R 增大时，系统稳定性加强。这就得到了优化解的选择条件：保证 L_1 、 L_2 较小、 R 较大、 C 适中。

在滤波器满足谐波衰减等要求的同时，设置电感总值 L 、逆变侧电感 L_1 、网侧电感 L_2 、滤波电容 C 的界限约束，作为目标函数的约束条件。

1) 电感总值

LCL 滤波器总的电感偏大，滤波效果会更好；电感偏小，响应能力会变强。因此总电感需要满足两个条件：一方面，需要限制落在电感上的压降产生的最大电流；另一方面，需要削减电流的纹波，使其在允许范围内；即，需要满足如下不等式约束：

$$\frac{V_{dc}}{4\Delta I_{ripple-max}f_s} \leq L \leq \frac{\sqrt{V_{dc}^2 - V_{g\_max}^2}}{\omega_0 I_{g\_max}} \quad (4)$$

式中： V_{g_max} 、 I_{g_max} 为电网侧电压电流峰值；逆变侧输出电压 $V_{inv} \approx V_{dc}$ 。

2) 逆变侧与网侧电感

在工程制造方面，为降低成本与体积，网侧电感值往往小于逆变侧的电感，逆变侧的电感需要满足电流纹波与电感上压降的限制，得到以下约束：

$$\frac{V_{in}T_s}{8\lambda_{c\_L1}I_{L1}} \leq L_1 \leq \frac{\lambda_{v\_L1}V_c}{\omega_0 I_{L1}} \approx \frac{\lambda_{v\_L1}V_g}{\omega_0 I_{L1}} \quad (5)$$

$$L_1 \geq L_2 \quad (6)$$

式中：开关周期 T_s ；电流纹波系数 $\lambda_{c\_L1} \approx 20\sim 30\%$ ；电感压降系数

$$\lambda_{v_{L1}} \approx 5\%。$$

3) 滤波电容

电容值越大，电压纹波越小，但功耗也更大；因此需考虑电容值的上限：

$$C \leq \frac{\lambda_C P_O}{\omega_0 V_g^2} \quad (7)$$

式中： P_O 为网侧输出额定功率； ω_0 为电网频率；电容无功功率对额定输出有功比 $\lambda_C \approx 5\%$ 。

构建开关频次谐波衰减比 η 、逆变端电感电流纹波 ΔI_{ripple} 、阻尼电阻功耗 $P_{R_{loss}}$ 和谐振频率 f_r 的目标函数。

1) 开关频次谐波衰减比

这是本次优化设计优先级最高的优化目标，谐波衰减度越小，开关频次谐波滤波效果越好，如下式所示：

$$\eta = \frac{I_g(s)}{I_{L1}(s)} \Big|_{s=j\omega_s} = \sqrt{\frac{1+R^2 C^2 \omega_s^2}{(1-L_2 C \omega_s^2)^2 + R^2 C^2 \omega_s^2}} \quad (8)$$

2) 逆变端电感电流纹波

逆变器的开关动作会使得逆变侧电流有接近开关频率的 dv/dt 变化，即电流的纹波，为了保证系统的稳定加强控制效果，减小开关与电感的损耗，需要最小化逆变电流纹波：

$$\Delta I_{ripple} = \frac{V_{dc}}{4f_s L_1} \quad (9)$$

式中：逆变端输出电压 $V_{in} \approx V_{dc}$ ；逆变侧电感 L_1 。

3) 阻尼电阻功耗

LCL 滤波器引入了无源阻尼增强系统谐波抑制性能，但也引入了功耗，需要使其最小化：

$$P_{R_{loss}} = \frac{R V_g^2}{R^2 + \frac{1}{\omega_0^2 C^2}} \approx R V_g^2 \omega_0^2 C^2 \quad (10)$$

4) 谐振频率

为了满足 LCL 滤波器的低通特性，谐振频率一般如下选择：

$$10f_0 \leq f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}} \leq 0.5f_s \quad (11)$$

式中： f_s 、 f_r 分别为开关频率与谐振频率。由于关系到三个变量的条件并非线性，因此作为优化目标进行双边约束，用两个需要最小化的目标函数保证谐振频率的取值在允许范围：

$$F_1 = 10f_0 - f_r \quad (12)$$

$$F_2 = f_r - 0.5f_s \quad (13)$$

这样算法的目标函数就是

$$\min[\eta, \Delta I_{ripple}, P_{R\_loss}, F_1, F_2] \quad (14)$$

综合上述内容，以式(3)作为优化变量，以式(4)~(7)作为线性约束，以式(14)作为多目标函数，使用 NSGA-II 算法。基本参数设置为：最优个体系 paretoFraction 0.4；种群大小 populationsize 300；最大进化代数 generations 400；停止代数 stallGenLimit 300；适应度函数偏差 TolFun 1e-10。这样通过迭代优化得到了多目标 Pareto 最优解的解集，如图 5 所示。

得到的这些解之间并非互相耦合，同样都是最优解。但依旧可以看出参数有明显的集中区间，在四个参数都属于众数区间中，再根据选参数标准，挑取一组典型值作为优化解，通过与传统解得对比体现算法的优越性，具体参数如表 1 所示。

表 1 传统方法与优化算法的对比

参数	L1/ μ H	L2/ μ H	C/ μ F	R/ Ω
传统解	1200	600	18	1.570
优化解	944	565	11.11	8.212

为了验证弱电网条件下多目标优化算法对系统的优化效果，本发明实施例基于 Matlab/Simulink 搭建并网逆变器的仿真模型，具体参数环境如表 2 所示。

表 2 仿真系统参数与环境

系统参数	参数值
电网额定功率 P_{rate}	6kW
直流电压 V_{dc}	550V
电网额定电压 V_g	220Vac
电网频率 f_0	50Hz
开关频率 f_s	10kHz
弱网变化 L_g/mH	0→1→1.5→2
时间 t/s	0→0.04→0.08→0.12

依据上述参数，在搭建的模型上进行仿真，得到了传统参数下的系统响应和优化参数下的系统响应分别如图 6 和图 7 所示，具体包含耦合处电压、逆变及网侧电流、电容电流，以及谐波分析图。

由两图可以看出，使用优化算法设计出的参数明显使逆变系统对弱网条件有更强的适应性，当弱电网电感值达到 2mH 时，传统解的系统已经失稳，但优化解依旧能保持系统的稳定。经过波形局部放大可以看到，由于滤波器参数值的减小，电流与电压的纹波有一定程度的增大(5.513→6.182A)，不过仍然都在并网设计要求的允许范围内；电阻的功耗明显增大(0.245→4.838W)，但由于电感电容值的减小，谐振频率损耗变化几乎可以与之抵消。而弱电网条件下的波形畸变率却有明显的下降，大大提高了滤波器的滤波效果与抗弱网能力，畸变率具体参数如表 3 所示。

表 3 传统方法与优化算法的对比

弱网条件	$L_g=0mH$	$L_g=1mH$	$L_g=1.5mH$	$L_g=2mH$
传统 THD/%	0.53	0.48	0.67	82.31
优化 THD/%	0.82	0.47	0.41	0.41

以上所述的实施例对本发明的技术方案和有益效果进行了详细说明，应理解的是以上所述仅为本发明的具体实施例，并不用于限制本发明，凡

在本发明的原则范围内所做的任何修改、补充和等同替换，均应包含在本发明的保护范围之内。

权 利 要 求 书

1、一种基于 NSGA-II 算法的弱电网 LCL 型并网逆变滤波器参数优化方法，其特征在于，包括：

对弱电网下的单相逆变系统进行建模，将逆变侧电感 L_1 、网侧电感 L_2 、滤波电容 C 以及无源阻尼的电阻 R 作为待优化参数；

设置电感总值 L 、逆变侧电感 L_1 、网侧电感 L_2 、滤波电容 C 的界限约束；

构建开关频次谐波衰减比 η 、逆变端电感电流纹波 ΔI_{ripple} 、阻尼电阻功耗 P_{R_loss} 和谐振频率 f_r 的目标函数；

基于 NSGA-II 算法模型，将待优化参数作为决策变量，根据界限约束，对多个目标函数通过迭代优化得到最优解的参数解集，并从参数解集中挑取一组典型值作为优化解。

2、根据权利要求 1 所述的基于 NSGA-II 算法的弱电网 LCL 型并网逆变滤波器参数优化方法，其特征在于，基于 NSGA-II 算法模型的决策变量为：

$$X = [L_1, L_2, C, R]$$

该模型中对上述参数采用单一变量原则分析各个参数对系统的影响；参数变化均为线性增加，在传统试凑法的参数基础上进行变化。

3、根据权利要求 1 所述的基于 NSGA-II 算法的弱电网 LCL 型并网逆变滤波器参数优化方法，其特征在于，界限约束中，电感总值 L 需要满足两个条件：第一，需要限制落在电感上的压降产生的最大电流；第二，需要削减电流的纹波，使其在允许范围内；即需要满足如下不等式约束：

$$\frac{V_{dc}}{4\Delta I_{ripple-max}f_s} \leq L \leq \frac{\sqrt{V_{dc}^2 - V_{g\_max}^2}}{\omega_0 I_{g\_max}}$$

式中， V_{g_max} 、 I_{g_max} 为电网侧电压和电流峰值， V_{dc} 为直流侧电压， $\Delta I_{ripple-max}$ 为逆变侧最大电流纹波， f_s 为开关频率， ω_0 为电网频率。

4、根据权利要求 1 所述的基于 NSGA-II 算法的弱电网 LCL 型并网逆

变滤波器参数优化方法，其特征在于，界限约束中，逆变侧电感 L_1 和网侧电感 L_2 需满足以下约束：

$$\frac{V_{in}T_s}{8\lambda_{c_{L1}}I_{L1}} \leq L_1 \leq \frac{\lambda_{v_{L1}}V_C}{\omega_0I_{L1}} \approx \frac{\lambda_{v_{L1}}V_g}{\omega_0I_{L1}}$$

$$L_1 \geq L_2$$

式中， T_s 为开关周期， $\lambda_{c_{L1}}$ 为电流纹波系数， $\lambda_{v_{L1}}$ 为电感压降系数， ω_0 为电网频率， V_{in} 表示滤波器输入电压， I_{L1} 表示逆变侧电感电流， V_C 表示滤波器电容节点电压， V_g 表示电网侧电压。

5、根据权利要求1所述的基于NSGA-II算法的弱电网LCL型并网逆变滤波器参数优化方法，其特征在于，界限约束中，滤波电容 C 需满足以下约束：

$$C \leq \frac{\lambda_c P_o}{\omega_0 V_g^2}$$

式中： P_o 为网侧输出额定功率； ω_0 为电网频率； λ_c 为电容无功功率对额定输出有功比； V_g 为电网侧电压。

6、根据权利要求1所述的基于NSGA-II算法的弱电网LCL型并网逆变滤波器参数优化方法，其特征在于，目标函数中，开关频次谐波衰减比 η 是优先级最高的优化目标，如下式所示：

$$\eta = \left. \frac{I_g(s)}{I_{L1}(s)} \right|_{s=j\omega_s} = \sqrt{\frac{1 + R^2 C^2 \omega_s^2}{(1 - L_2 C \omega_s^2)^2 + R^2 C^2 \omega_s^2}}$$

式中， $I_g(s)$ 为复频域下电网侧电流表达式， $I_{L1}(s)$ 为复频域下逆变侧电感电流表达式， ω_s 为开关角频率， $s = j\omega_s$ 表示条件是当频率为开关角频率时。

7、根据权利要求1所述的基于NSGA-II算法的弱电网LCL型并网逆变滤波器参数优化方法，其特征在于，目标函数中，需要最小化逆变端电感电流纹波：

$$\Delta I_{ripple} = \frac{V_{dc}}{4f_s L_1}$$

式中，逆变端输出电压 $V_{in} \approx V_{dc}$ ， V_{dc} 为直流电压， L_1 为逆变侧电感， f_s 为开关频率。

8、根据权利要求1所述的基于NSGA-II算法的弱电网LCL型并网逆变滤波器参数优化方法，其特征在于，目标函数中，需要最小化阻尼电阻功耗 $P_{R_{loss}}$ ：

$$P_{R_{loss}} = \frac{RV_g^2}{R^2 + \frac{1}{\omega_0^2 C^2}} \approx RV_g^2 \omega_0^2 C^2$$

式中， V_g 表示电网侧电压， ω_0 为电网频率。

9、根据权利要求1所述的基于NSGA-II算法的弱电网LCL型并网逆变滤波器参数优化方法，其特征在于，目标函数中，为了满足LCL滤波器的低通特性，谐振频率选择：

$$10f_0 \leq f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} \leq 0.5f_s$$

式中， f_s 、 f_r 分别为开关频率与谐振频率， f_0 表示电网频率；由于关系到三个变量的条件并非线性，因此，用两个需要最小化的目标函数保证谐振频率的取值在允许范围：

$$F_1 = 10f_0 - f_r$$

$$F_2 = f_r - 0.5f_s$$

最终，总的目标函数为 $\min[\eta, \Delta I_{ripple}, P_{R_{loss}}, F_1, F_2]$ 。

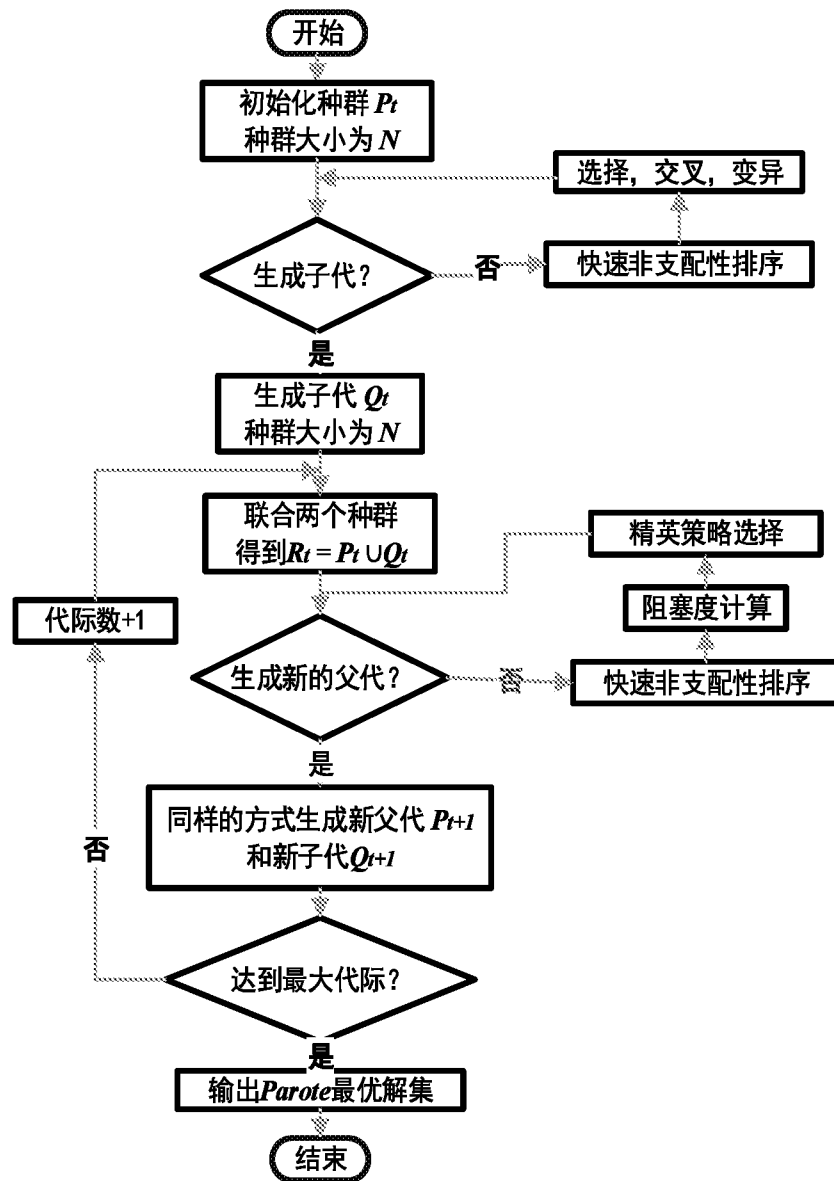


图 3

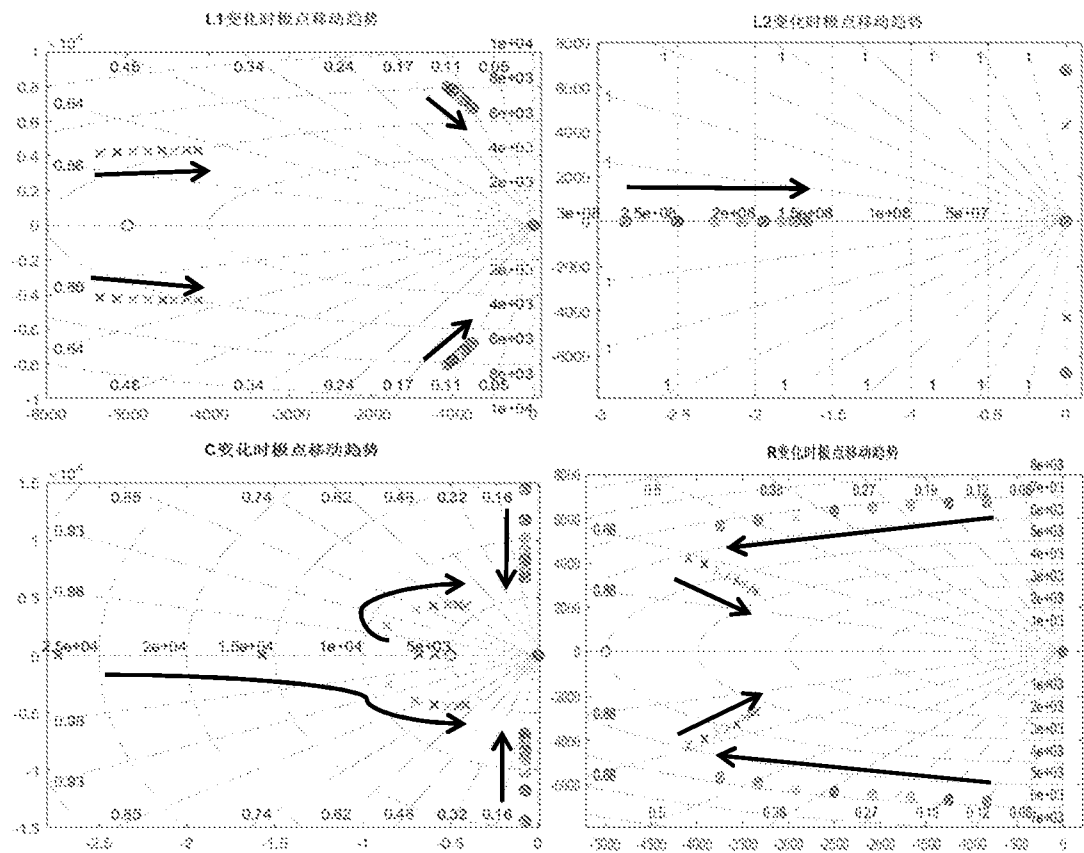


图 4

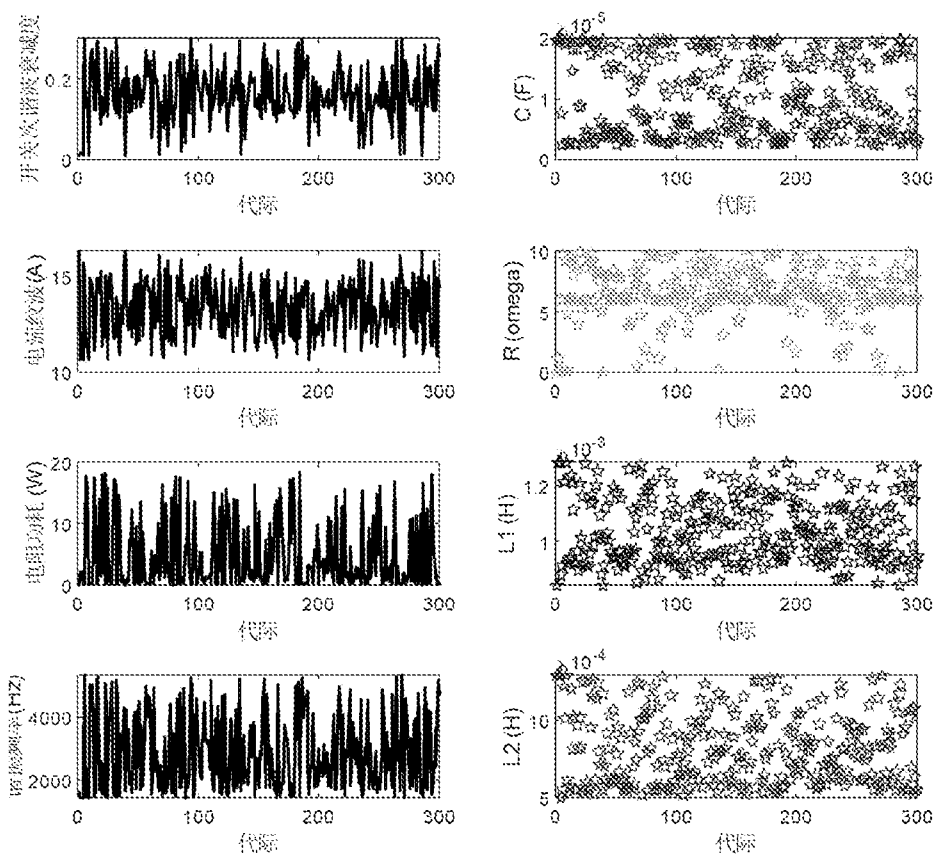


图 5

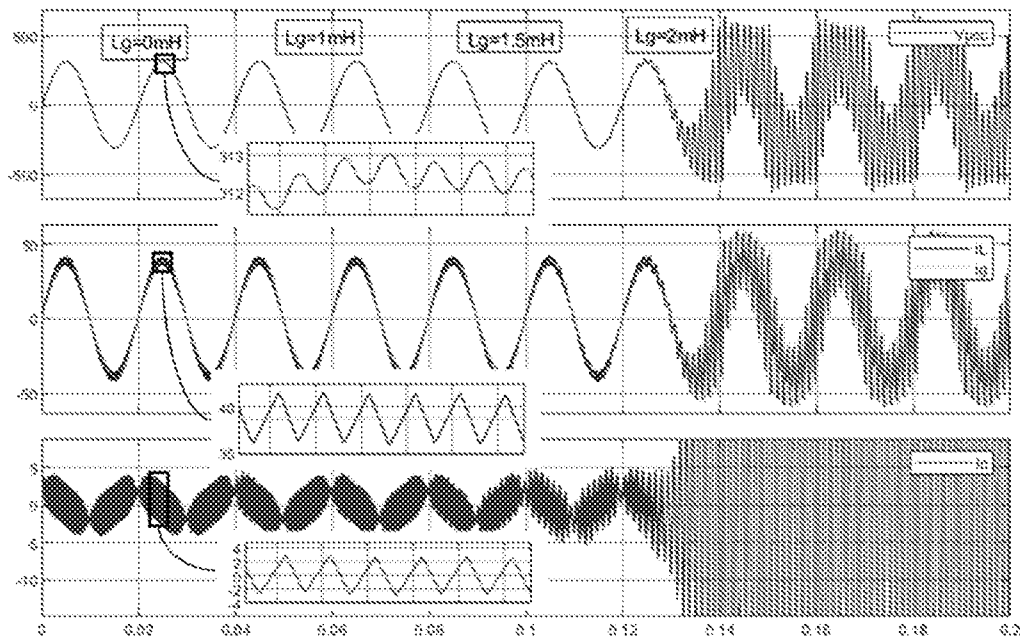


图 6

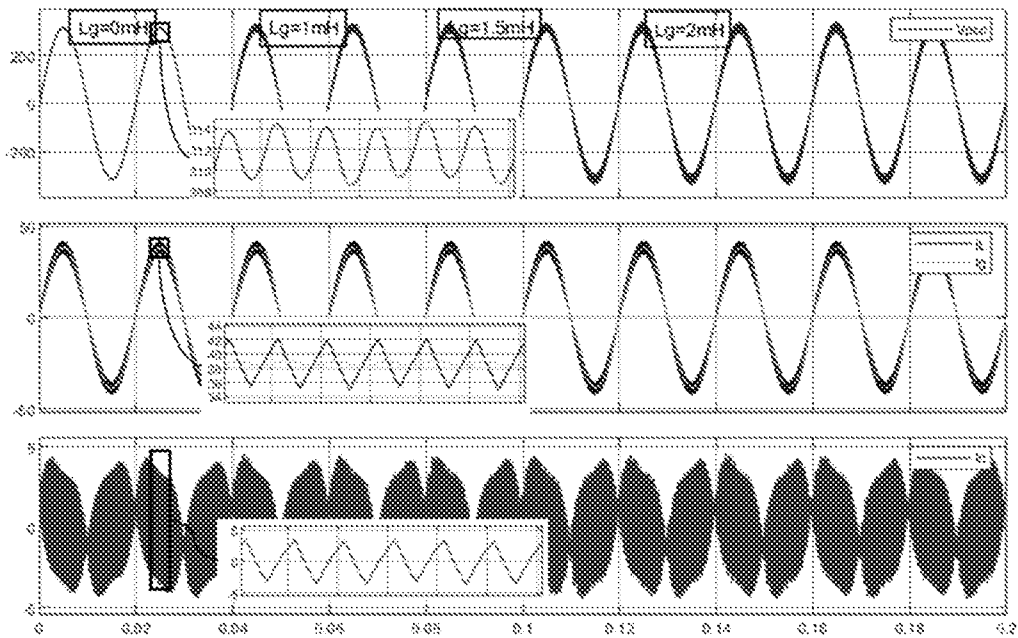


图 7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2024/077376

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER H02J3/01(2006.01)i According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) IPC:H02J3/- Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) CNABS, CNTXT, ENTXT, ENTXTC, OETXT, WPABSC, ISI, CNKI: 逆变, 逆变器, 滤波, 滤波器, NSGA, 弱电网, 谐波, 衰减比, 决策变量, 迭代, 优化, LCL, inverter+, filter+, weak, grid, resonance, objection, variable.		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 116845893 A (ZHEJIANG UNIVERSITY; ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE CO., LTD. CSG) 03 October 2023 (2023-10-03) claims 1-9	1-9
Y	Oscar Hernandez et al. "A multi-objective optimized design of LCL filters for grid-connected voltage source inverters considering discrete components" <i>International Transactions on Electrical Energy Systems</i> , Vol. 31, No. 10, 21 April 2021 (2021-04-21), pages 1-18	1-3, 5, 7, 9
Y	王应德等 (WANG, Yingde et al.). "基于NSGAIII多目标优化算法的并网逆变器LLCL滤波器参数优化设计 (Optimal Design of LLCL filter parameters for Grid-Connected Inverter Based on NSGAIII Multi-Objective Optimization Algorithm)" <i>电气与能效管理技术 (Electrical and Energy Efficiency Management Technology)</i> , No. 24, 30 December 2018 (2018-12-30), pages 53-59	1-3, 5, 7, 9
☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "D" document cited by the applicant in the international application "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 13 March 2024		Date of mailing of the international search report 19 March 2024
Name and mailing address of the ISA/CN China National Intellectual Property Administration (ISA/CN) China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing 100088		Authorized officer Telephone No.

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	CN 108649780 A (STATE GRID SHANGHAI MUNICIPAL ELECTRIC POWER COMPANY; EAST CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE CO., LTD.) 12 October 2018 (2018-10-12) description, paragraphs 9-188, and figures 1-11	1-3, 5, 7, 9
A	CN 107947206 A (WUHAN UNIVERSITY) 20 April 2018 (2018-04-20) entire document	1-9
A	CN 111353653 A (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 30 June 2020 (2020-06-30) entire document	1-9
A	CN 115800277 A (ECONOMIC AND TECHNICAL RESEARCH INSTITUTE OF STATE GRID NINGXIA ELECTRIC POWER CO., LTD.) 14 March 2023 (2023-03-14) entire document	1-9

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2024/077376

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	116845893	A	03 October 2023	None			
CN	108649780	A	12 October 2018	CN	108649780	B	21 April 2020
CN	107947206	A	20 April 2018	CN	107947206	B	07 January 2020
CN	111353653	A	30 June 2020	US	11070056	B1	20 July 2021
				CN	111353653	B	11 December 2020
CN	115800277	A	14 March 2023	None			

A. 主题的分类

H02J3/01(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

IPC:H02J3/-

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNABS,CNTEXT,ENTXT,ENTXTC,OETXT,WPABSC,ISI,CNKI:逆变,逆变器,滤波,滤波器,NSGA,弱电网,谐波,衰减比,决策变量,迭代,优化,LCL,inverter+,filter+,weak,grid,resonance,objection,variable.

C. 相关文件

类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 116845893 A (浙江大学 南方电网科学研究院有限责任公司) 2023年10月3日 (2023 - 10 - 03) 权利要求1-9	1-9
Y	Oscar Hernandez等. "A multi-objective optimized design of LCL filters for grid-connected voltage source inverters considering discrete components" 《International Transactions on Electrical Energy Systems》, 第31卷, 第10期, 2021年4月21日 (2021 - 04 - 21), 第1-18页	1-3,5,7,9
Y	王应德等. "基于NSGAIII多目标优化算法的并网逆变器LLCL滤波器参数优化设计" 《电气与能效管理技术》, 第24期, 2018年12月30日 (2018 - 12 - 30), 第53-59页	1-3,5,7,9
Y	CN 108649780 A (国网上海市电力公司 华东电力试验研究院有限公司) 2018年10月12日 (2018 - 10 - 12) 说明书第9-188段, 图1-11	1-3,5,7,9
A	CN 107947206 A (武汉大学) 2018年4月20日 (2018 - 04 - 20) 全文	1-9

☒ 其余文件在C栏的续页中列出。

☒ 见同族专利附件。

★ 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“D” 申请人在国际申请中引证的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“p” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2024年3月13日

国际检索报告邮寄日期

2024年3月19日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

授权官员

陆菲

电话号码 (+86) 028-62967695

PCT/ISA/210 表(第2页) (2022年7月)

C. 相关文件

类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 111353653 A (大连理工大学) 2020年6月30日 (2020 - 06 - 30) 全文	1-9
A	CN 115800277 A (国网宁夏电力有限公司经济技术研究院) 2023年3月14日 (2023 - 03 - 14) 全文	1-9

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2024/077376

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	116845893	A	2023年10月3日	无	
CN	108649780	A	2018年10月12日	CN	108649780 B 2020年4月21日
CN	107947206	A	2018年4月20日	CN	107947206 B 2020年1月7日
CN	111353653	A	2020年6月30日	US	11070056 B1 2021年7月20日
				CN	111353653 B 2020年12月11日
CN	115800277	A	2023年3月14日	无	