

(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
2024 年 8 月 8 日 (08.08.2024)



(10) 国际公布号
WO 2024/159591 A1

- (51) 国际专利分类号:
G01R 19/00 (2006.01) **G06F 17/10** (2006.01)
G01R 25/00 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2023/082638
- (22) 国际申请日: 2023 年 3 月 21 日 (21.03.2023)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
202310048939.4 2023年2月1日 (01.02.2023) CN
- (71) 申请人: 苏州大学 (SOOCHOW UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国江苏省苏州市工业园区仁爱路 199 号, Jiangsu 215000 (CN)。
- (72) 发明人: 杨勇 (YANG, Yong); 中国江苏省苏州市工业园区仁爱路 199 号, Jiangsu 215000 (CN)。朱易 (ZHU, Yi); 中国江苏省苏州市工业园区仁爱路 199 号, Jiangsu 215000 (CN)。

- (74) 代理人: 苏州市中南伟业知识产权代理事务所 (普通合伙) (CENTRAL SOUTH WELL INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE); 中国江苏省苏州市吴中区石湖西路 188 号吴中万达广场 A 座苏州大学国家科技园 2303, Jiangsu 215000 (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, 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,

(54) Title: METHOD FOR ESTIMATING LEAKAGE INDUCTANCE PARAMETER OF HIGH-FREQUENCY TRANSFORMER OF DAB CONVERTER

(54) 发明名称: 一种 DAB 变换器的高频变压器漏感参数估计方法

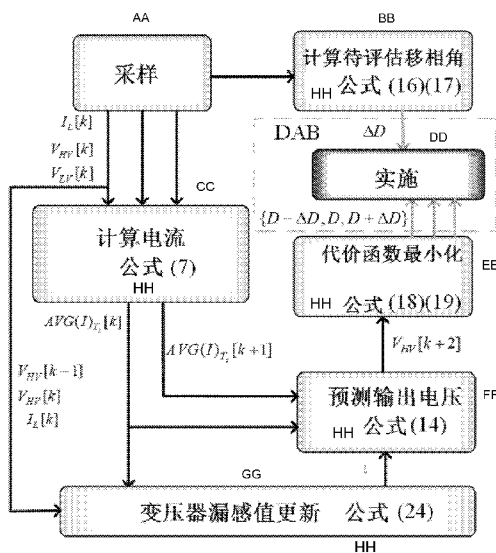


图 4

- AA Sampling
BB Calculate a phase shift angle to be subjected to evaluation
CC Calculate a current
DD Implementation
EE Minimize a cost function
FF Predict an output voltage
GG Update a leakage inductance value of a transformer
HH Formula

(57) Abstract: A method for estimating a leakage inductance parameter of a high-frequency transformer of a dual active bridge (DAB) converter. The method comprises: performing sampling on an output of a DAB converter, so as to obtain the present current value and the present voltage value; performing calculation according to the present current value, so as to obtain an average current value; according to the average current value, the present current value and the current voltage value, calculating leakage inductance of a transformer by using a gradient descent method; predicting an output voltage according to the leakage inductance of the transformer and the average current value; and calculating a phase shift angle to be subjected to evaluation, selecting a phase shift angle according to the principle of making a cost function minimum, and controlling the DAB converter. The method greatly reduces output ripples of a DAB direct current-direct current converter under model predictive control, can accurately and quickly track a reference output voltage, and has good steady-state performance and dynamic performance; and the complexity of code parameters is simplified, modular implementation of codes is facilitated, and reuse and maintenance of the codes are facilitated, such that the cost can be reduced to a certain extent.

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：一种DAB变换器的高频变压器漏感参数估计方法，包括：对DAB变换器的输出进行采样，得到当前电流值和当前电压值；根据当前电流值计算得到平均电流值；根据平均电流值、当前电流值和当前电压值，使用梯度下降的方法计算得到变压器漏感；根据变压器漏感和平均电流值预测输出电压；计算待评估移相角，并根据使代价函数最小的原则选择移相角，控制DAB变换器。本方法大大减小了模型预测控制下双有源桥直流-直流变换器的输出纹波，能准确快速地跟踪参考输出电压，并具有良好的稳态性能和动态性能，简化了代码参数的复杂度，有利于代码的模块化实现，有利于代码的重用及维护，可以在一定程度下降低成本。

说明书

发明名称：一种DAB变换器的高频变压器漏感参数估计方法

技术领域

[0001] 本申请属于电力电子变换器领域，具体涉及一种DAB变换器的高频变压器漏感参数估计方法。

背景技术

[0002] 在电力电子变换器领域，随着全球能源危机的不断加剧，新能源并网发电的趋势日益增长，带动了直流微电网技术的发展。蓄电池作为储能装置，是直流微电网系统中的关键一环，而连接储能蓄电池与直流母线的直流-直流变换器的性能及稳定性影响着直流微电网系统的性能。双有源桥直流-直流变换器(DAB)由原边H桥，高频变压器及副边H桥组成。这种直流-直流变换器具有效率高、电压增益范围广、功率双向传输、电气隔离的优点。双有源桥隔离式直流-直流变换器(DAB)以其电压变换范围广，电气隔离，控制方式简便的优点被广泛应用于直流储能系统中，因此双有源桥直流-直流变换器的拓扑结构及控制策略成为越来越受关注的方向。目前，根据原边H桥及副边H桥的电平数，双有源桥直流-直流变换器可分为两电平和多电平两种结构。与两电平DAB变换器相比，多电平DAB单个器件上承受的电压应力更小，有利于在大功率场合的成本优化。

[0003] 双有源桥直流-直流变换器的控制方法可分为单移相(SPS, Single Phase Shift)控制，双移相(DPS, Dual Phase Shift)控制，三移相(TPS, Triple Phase Shift)控制，其中单移相控制以其单维度控制，控制方式简便的优点被广泛应用于工程领域，而双移相和三移相控制的控制维度分别为双维度和三维度，其能有效抑制双有源桥变换器的回流功率，提升系统的效率，被应用于大功率能源变换的场景。

发明概述

技术问题

[0004] 双有源桥直流-直流变换器的传统控制策略为比例积分(PI)控制。通常采用的

控制器结构为电压外环与电流内环同时作用的结构，电流内环的参考值由电压外环计算得到，而作用于变换器的移相角则由电流内环计算得到。通过调节PI控制器的参数可以实现无静差跟踪。然而，该传统控制策略存在诸多缺陷：第一，其需要根据系统输出调节PI参数。由于实际系统需要满足各种复杂工况，因此PI参数通常需要进行反复调节，十分消耗时间。第二，PI控制器的动态响应速度较慢，在带非线性负载时输出会发生畸变。因此，为了满足各种复杂的实际工况，学者提出了众多的非线性控制策略，例如边界控制等。在这些非线性控制策略中，模型预测控制（MPC）基于对系统的建模预测系统的输出，通过预先定义的代价函数评估未来输出，在此基础上确定最优移相角。双有源桥直流-直流变换器的主要控制策略为通过控制高频变压器原边H桥与高频变压器副边H桥逆变输出的相位差来控制传输功率的方向及数量级。模型预测控制在当前的控制周期内对在多个移相角下变换器的输出结果进行预测，同时定义价值函数评价不同移相角与期望结果的相似程度，并以此为标准选出最优移相角。

[0005] 模型预测控制通常依赖于系统的参数。当系统参数因外界原因发生变化时，系统输出通常会发生高频振荡或输出幅值误差。在线参数估计依据控制环的输入输出参数计算系统变量，并在控制器内更新参数，减少了系统的输出振荡。

[0006] 在MPC算法中，系统的参数将极大地影响系统的控制性能。参数不匹配通常会造成系统输出振荡，而在实际应用中，系统的参数通常会受到自然原因(如温度，湿度，海拔，工作环境等)及人为原因(制造精度等)的影响。因此，为了进一步提升系统性能，对系统的参数进行在线估计成为了当下的研究热点。目前，对系统进行参数估计多采用最小二乘法，线性回归等基于统计学的方法或粒子群算法，神经网络，遗传算法等现代智能算法，其通常独立于控制环，可以在不影响控制环的前提下估计系统参数，极大地提升了系统的性能及稳定性。

[0007] 目前应用于双有源桥直流-直流变换器的模型预测控制策略相较于传统的控制策略（如比例积分（PI）控制器等）动态性能和稳定性得到了大幅提升。但是，其对系统参数的依赖较高，参数匹配失当将会造成系统输出振荡或失稳。而控制策略中加入系统参数则在一定程度上增加了控制器的复杂程度及维护成本。同时，对系统参数进行测量也需要消耗大量的成本，并且其有精度损失。因

此，在控制器中在线调校系统参数以提升系统的性能能在很大程度上降低成本，是十分有必要的。

技术解决方案

- [0008] 本发明的目的是通过以下技术方案实现的。
- [0009] 一种DAB变换器的高频变压器漏感参数估计方法，包括：
- [0010] 对所述DAB变换器的输出进行采样，得到当前电流值和当前电压值；
- [0011] 根据所述当前电流值计算得到平均电流值；
- [0012] 根据所述平均电流值、当前电流值和当前电压值，使用梯度下降的方法计算得到变压器漏感；
- [0013] 根据所述变压器漏感和平均电流值预测输出电压；
- [0014] 计算待评估移相角，并根据使代价函数最小的原则选择移相角，控制所述DAB变换器。

有益效果

- [0015] 1、本申请提出的在线高频变压器漏感估计方法大大减小了模型预测控制下双有源桥直流-直流变换器的输出纹波。
- [0016] 2、本申请提出的在线漏感参数估计下的模型预测控制能准确快速地跟踪参考输出电压，并具有良好的稳态性能和动态性能。
- [0017] 3、本申请提出的在线漏感参数估计下的DAB模型预测控制方法较传统DAB模型预测控制方法而言大大简化了代码参数的复杂度，有利于代码的模块化实现，有利于代码的重用及维护，可以在一定程度下降低成本。

附图说明

- [0018] 图1示出了双有源桥直流-直流变换器拓扑图。
- [0019] 图2为双有源桥直流-直流变换器典型驱动及变压器电流波形图。
- [0020] 图3为模型预测控制下处理器对待评价对象的选择示意图。
- [0021] 图4为本申请实施例的控制流程图。
- [0022] 图5为在600W负载下模型参数在不同数量级误差时的输出结果示意图。
- [0023] 图6为在多种负载下DAB变换器的输出结果及变压器漏感参数辨识效果示意图。

[0024] 图7为当负载突变时DAB变换器的输出结果示意图。

[0025] 图8为负载切换过程中变压器漏感参数辨识值示意图。

本发明的实施方式

[0026] 下面将参照附图更详细地描述本公开的示例性实施方式。虽然附图中显示了本公开的示例性实施方式，然而应当理解，可以以各种形式实现本公开而不应被这里阐述的实施方式所限制。相反，提供这些实施方式是为了能够更透彻地理解本公开，并且能够将本公开的范围完整的传达给本领域的技术人员。

[0027] 本申请提出了一种应用于模型预测控制下的双有源桥直流-直流变换器的高频变压器漏感参数估计方法。通过对系统输出进行采样在微控制器中用梯度下降的方法计算得到变压器漏感，从而应用于系统输出的计算，在此基础上根据使代价函数最小的原则选择合适的移相角进行控制。

[0028] A. 系统模型的搭建

[0029] 表 1: 系统采样的变量。

采样的变量	说明
V_{LV}	低压侧电压
V_{HV}	高压侧电压
I_L	负载电流

[0030] 如图1所示，本申请采用的是两电平双有源桥拓扑结构。其中， V_{LV} 为低压侧电压， V_{HV} 为高压侧电压，变压器的匝数比为 1:n，输出滤波电容的容值为 C_o ，高频变压器的漏感为 L ，流过变压器原边的电流为 i_L 负载电流为 I_L ，电容之前的电流为 I 。

[0031] 双有源桥直流-直流变换器的输出功率及输出电流可由变压器的电流波形计算得到。DAB变换器的典型驱动及电感电流波形如图2所示，其中 V_{ab} 和 V_{cd} 为变压器原边及变压器副边的输出电压。

[0032] 根据图2中的变压器原边电流波形可以得到其表达式

$$i_L = \begin{cases} i_L(t_0) + \frac{V_{LV} + nV_{HV}}{L}(t - t_0), t_0 \leq t < t_1 \\ i_L(t_1) + \frac{V_{LV} - nV_{HV}}{L}(t - t_1), t_1 \leq t < t_2 \\ i_L(t_2) - \frac{V_{LV} + nV_{HV}}{L}(t - t_2), t_2 \leq t < t_3 \end{cases} \quad (1)$$

[0034] 流经变压器原边的电流为纯交流量，因此在高频变压器没有直流偏置的情况下，变压器电流应关于0对称，即

$$[0035] \quad i_L(t_0) = -i_L(t_2) \quad (2)$$

$$[0036] \quad \text{且有} \quad t_1 - t_0 = DT_s \quad (3)$$

$$[0037] \quad t_2 - t_1 = \left(\frac{1}{2} - D\right) T_s \quad (4)$$

[0038] 由(2)(3)(4)可得

$$[0039] \quad i_L(t_2) = -i_L(t_0) = \frac{V_{LV} - nV_{HV}}{4L} T_s + \frac{nV_{HV}}{L} DT_s \quad (5)$$

[0040] 得到变压器原边的电流表达式后，即可计算变换器的输出功率及电流，f为电流变化率

$$[0041] \quad P = 2 \int_{t_0}^{t_2} V_{LV} i_L dt = \frac{nV_{LV} V_{HV} D(1-2D)}{fL} \quad (6)$$

$$[0042] \quad \text{AVG}(I)_{T_s} = \frac{P}{V_{HV}} = \frac{nV_{LV} D(1-2D)}{fL} \quad (7)$$

[0043] B. 构建预测模型

[0044] 为了对双有源桥直流-直流变换器进行模型预测控制，首先要对其输出电压进行预测。DAB在连续时间内的电压输出可以由输出电容的动态特性方程得到

$$[0045] \quad C_o \frac{dV_{HV}}{dt} = I - I_L \quad (8)$$

[0046] 对公式(8)进行离散化可以得到

$$[0047] \quad C_o \frac{d(\text{AVG}(V_{HV})_{T_s})}{dt} = \text{AVG}(I)_{T_s} - \text{AVG}(I_L)_{T_s} \quad (9)$$

$$C_o \frac{V_{HV}[k+1] - V_{HV}[k]}{T_s} = \text{AVG}(I)_{T_s}[k] - \text{AVG}(I_L)_{T_s}[k] \quad (10)$$

[0048] 其中 $\text{AVG}(x)_{T_s}$ 表示变量 x 在一个控制周期内的平均值。由(10)可以得到

[0049]
$$C_o \frac{V_{HV}[k+2] - V_{HV}[k+1]}{T_s} = AVG(I)_{T_s}[k+1] - AVG(I_L)_{T_s}[k+1] \quad (11)$$

[0050] 在相邻的两个控制周期内，负载的电流可以被视作不变，即有

[0051]
$$AVG(I_L)_{T_s}[k+1] = AVG(I_L)_{T_s}[k] \quad (12)$$

[0052] 由以上分析可以得到预测输出电压的表达式

[0053]
$$V_{HV}[k+2] = V_{HV}[k] + \frac{AVG(I)_{T_s}[k+1] + AVG(I)_{T_s}[k] - 2AVG(I_L)_{T_s}}{C_o f} \quad (13)$$

[0054] 为了在数字控制器中应用模型预测控制的方法，对移相角进行离散化，即有

[0055]
$$D \in \{-0.25, -0.25 + \Delta D, -0.25 + 2\Delta D, \dots, 0, \dots, 0.25\} \quad (14)$$

[0056] 在本实施例中，最小分辨率 ΔD 被设置为了0.01。在初始时刻，移相角D为0。

[0057] 模型预测控制的控制目标是控制输出电压，提升其动态性能，因此必须建立电压至移相角的传递函数，其表达式如下

[0058]
$$\Delta D = \beta(1 + \mu \Delta V) \quad (15)$$

$$\Delta V = \begin{cases} |(V_{Ref} + V_{Com}) - V_{HV}[k]|, \Delta V \leq V_m \\ V_m, \Delta V > V_m \end{cases} \quad (16)$$

$$V_{Com} = V_{Ref} - V_{HV}[k]$$

[0059] 其中k为当前的控制周期， μ ， β 为增益系数， V_{Ref} 为输出电压的参考值。

V_m 为在一个周期内电压增益的饱和值，其设置目的是限制在一个控制周期内的电压增益，防止过大的增益导致变压器直流偏置。 V_{com} 是为了补偿 V_{Ref} 和采样值 V_{HV} 的差值，其能有效提升DAB变换器在启动阶段的响应速度。

[0060] 为了选取控制集中的最优移相角，模型预测控制通过定义代价函数来评价控制集中的移相角，能使代价函数最小化的移相角即为最优移相角。本实施例中定义的代价函数如下

[0061]

$$CF = \alpha_1 G_1 + \alpha_2 G_2 \quad (17)$$

$$\begin{cases} G_1 = (V_{Ref} + V_{Com} - V_{HV}[k+2])^2 \\ G_2 = (V_{HV}[k+2] - V_{HV}[k])^2 \end{cases} \quad (18)$$

[0062] 在该表达式中， G_1 部分的目的是使输出电压收敛到 V_{Ref} ， G_2 部分的目的是提升稳态时DAB变换器的性能。 α_1 、 α_2 为这两个部分的权重系数。

[0063] 在本实施例中，控制集内包含三个待评估对象，即为 $\{D-\Delta D, D, D+\Delta D\}$ 。在每个控制周期内， ΔD 由公式(15)计算得到，然后该三个评估对象被代入公式(17)(18)所描述的代价函数中，使该代价函数最小的待评估对象将会在下一个控制周期内被应用于DAB变换器中。

[0064] 图4展示了在四个周期内处理器对移相角的选择。在每个控制周期内，控制器首先根据公式(13)计算DAB变换器的输出电压，在此基础上根据公式(15)计算得到待评价移相角，依据使得代价函数最小化的原则选择最合适的移相角，最终应用于DAB变换器中。

[0065] C. 构建参数辨识方法

[0066] 模型预测控制下DAB变换器的动态响应速度极大依赖于输出电流平均值的计算，而输出电流平均值的计算则依赖于高频变压器的漏感。在实际工程应用中，其极易受到外接温度的影响。因此，在微处理器中引入高频变压器漏感的估计方法是十分有必要的。

[0067] 高频变压器的漏感主要包含两个部分，其一是变压器原边的漏感，其二是变压器副边的漏感通过变压器的匝数比折算到变压器原边的漏感，其可表示为

$$L = L_{k1} + L_{k2} \frac{n_1^2}{n_2^2} \quad (19)$$

[0069] n_1 是高频变压器原边的匝数， n_2 是高频变压器副边的匝数。本申请所提出的变压器漏感估计策略独立于控制环。首先计算负载电流

$$\overline{I_L} = AVG(I)_T[k] + Cf(V[k] - V[k-1]) \quad (20)$$

[0071] 同时定义估计误差 $E(k)$

$$[0072] \quad E(k) = I_L - \overline{I_L} \quad (21)$$

[0073] 高频变压器的漏感估计值记为 $\hat{L}$ 。在每个控制周期内， $\hat{L}$ 依据公式(22)进行优化

$$[0074] \quad \hat{L}[k] = \hat{L}[k-1] - \lambda \frac{\partial E(k)}{\partial L} = \hat{L}[k-1] - \lambda \frac{\partial E(k)}{\partial \overline{I_L}} \frac{\partial \overline{I_L}}{\partial L} \quad (22)$$

[0075] 由公式(21)可以进一步计算公式(22)

$$[0076] \quad \hat{L}[k] = \hat{L}[k-1] - \lambda \frac{n V_{LV} D[k](1-2D[k])}{(\hat{L}[k-1]f)^2} E(k) \quad (23)$$

[0077] 为了减轻数字控制器的计算负担，可以在实施过程中对公式(23)进行简化，从而可以得到公式(24)的变压器漏感值更新原则

$$[0078] \quad \hat{L}[k] = \hat{L}[k-1] - \eta E(k) \quad (24)$$

[0079] η 为梯度因子。在实际工程应用中可以通过调节 η 来控制估计值的收敛速度，从而满足不同的工况。

[0080] 图4展示了本申请所提出的应用于模型预测控制下的双有源桥直流-直流变换器的高频变压器漏感参数估计方法的控制流程图。包括：对DAB变换器的输出进行采样，得到当前电流值和当前电压值；

[0081] 根据所述当前电流值计算得到平均电流值；

[0082] 根据所述平均电流值、当前电流值和当前电压值，使用梯度下降的方法计算得到变压器漏感；

[0083] 根据所述变压器漏感和平均电流值预测输出电压；

[0084] 计算待评估移相角，并根据使代价函数最小的原则选择移相角，控制所述DAB变换器。

[0085] 在每个控制周期内，首先根据公式(24)对模型中的参数进行校正，然后根据公式(14)预测输出电压，根据公式(16)和公式(17)计算待评估移相角，并依据最小化代价函数的原则选择最合适的移相角。在线参数估计与控制环独立能保证参数估计不会对控制环造成影响。

[0086] 实施例：

[0087] 表 2：具体实验参数

符号	说明	具体值
V_{LV}	低压侧电压	100 V
f_s	开关频率	199kHz
n	变压器变比	7:25
L_{kl}	变压器原边漏感	10.8uH
C_{in}	输入侧滤波电容	40 μ F
C_o	输出侧滤波电容	25 uH
R	负载阻值	160 Ω

[0088] 下面进行具体的实验验证，搭建了基于数字信号处理器 (DSP) TMS320F28374S 的实验平台。实验平台具体参数如表2所示。

[0089] 本申请首先通过实验对比分析了在系统参数不正确及正确的情况下双有源桥的输出情况，接着进行了稳态性能分析实验，测试了在本申请提出的控制策略下DAB变换器在恒定负载情况下的输出及变压器漏感参数辨识效果，最后进行动态性能分析实验，观察输出参考电压突变的情况下DAB变换器的动态响应能力及变压器漏感参数辨识效果。

[0090] A. 系统输出对系统参数敏感性实验

[0091] 本申请进行了系统输出对系统参数的敏感性的实验。图5(a) (b) (c)依次展示了在600W负载下模型参数在不同数量级误差时的输出结果。其中，(a) 600W 输出， $L/\hat{L}=2$ (b) 600W 输出， $L/\hat{L}=10$ (c) 600W 输出， $L/\hat{L}=1$ (d) 1200W 输出， $L/\hat{L}=2$ (e) 1200W 输出， $L/\hat{L}=10$ (f) 1200W 输出， $L/\hat{L}=1$ 。当模型预测控制中变压器漏感为实际变压器漏感的50%时，DAB变换器的输出出现2V左右的静差；当模型预测控制中变压器漏感为实际变压器漏感的10%时，DAB变换器的输出出现低频振荡及较大的静差(22V)。(d) (e) (f)依次展示了在1200W负载下模型参数在不同数量级误差时的输出结果。当模型预测控制中变压器漏感为实际变压器漏感的50%时，DAB变换器的输出出现稳态误差；当模型预测控制中变压器漏感为实际变压器漏感的10%时，DAB变换器的输出出现较大幅

度的低频振荡及稳态误差。这表明在微处理器中在线调校DAB变换器模型预测控制参数在实际工程中是十分有必要的。

[0092] B. 稳态性能分析实验

[0093] 图6给出了在多种负载下DAB变换器的输出结果及变压器漏感参数辨识效果。其中, (a, b) 600W负载 (c, d) 800W负载 (e, f) 1000W 负载 (g, h) 1200W。负载实验结果表明本申请提出的方法在不同功率等级下均可以有效辨识变压器漏感, 变压器漏感的辨识值在7s后达到稳定。

[0094] C. 动态性能分析实验

[0095] 图7和图8给出了当负载突变时DAB变换器的输出结果及变压器漏感参数辨识效果。图7中, (a) 负载在600W与1000W之间切换 (b) 负载从600W切换至1000W (c) 负载从1000W切换至600W。实验结果表明本申请提出的方法也适用于负载突变的场合, 其能在负载在600W和1000W间切换时在400ms内重新计算得到准确的高频变压器漏感的值。

[0096] 以上所述, 仅为本发明较佳的具体实施方式, 但本发明的保护范围并不局限于此, 任何熟悉本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内, 可轻易想到的变化或替换, 都应涵盖在本发明的保护范围之内。因此, 本发明的保护范围应以所述权利要求的保护范围为准。

权利要求书

[权利要求 1] 一种DAB变换器的高频变压器漏感参数估计方法，其特征在于，包括：

对所述DAB变换器的输出进行采样，得到当前电流值和当前电压值；

根据所述当前电流值计算得到平均电流值；

根据所述平均电流值、当前电流值和当前电压值，使用梯度下降的方法计算得到变压器漏感；

根据所述变压器漏感和平均电流值预测输出电压；

计算待评估移相角，并根据使代价函数最小的原则选择移相角，控制所述DAB变换器。

[权利要求 2] 根据权利要求1所述的一种DAB变换器的高频变压器漏感参数估计方法，其特征在于：

所述平均电流值由所述DAB变换器的变压器的电流波形计算得到。

[权利要求 3] 根据权利要求1或2所述的一种DAB变换器的高频变压器漏感参数估计方法，其特征在于：

所述平均电流值的计算公式如下：

$$AVG(I)_{T_s} = \frac{nV_{LV}D(1-2D)}{fL}$$

其中 V_{LV} 为低压侧电压， V_{HV} 为高压侧电压，变压器的匝数比为 $1:n$ ，变压器的漏感为 L ， D 为移相角， f 为电流变化率。

[权利要求 4] 根据权利要求1所述的一种DAB变换器的高频变压器漏感参数估计方法，其特征在于：

所述DAB在连续时间内的电压输出由输出电容的动态特性方程计算得到。

[权利要求 5] 根据权利要求3所述的一种DAB变换器的高频变压器漏感参数估计方法，其特征在于：

所述预测输出电压的表达式如下：

$$V_{HV}[k+2] = V_{HV}[k] + \frac{AVG(I)_{T_s}[k+1] + AVG(I)_{T_s}[k] - 2AVG(I_L)_{T_s}}{C_o f},$$

k为当前的控制周期， C_o 为输出滤波电容的容值， I_L 为负载电流， I 为变压器副边的电容之前的电流。

[权利要求 6] 根据权利要求1所述的一种DAB变换器的高频变压器漏感参数估计方法，其特征在于：

所述代价函数CF如下

$$CF = \alpha_1 G_1 + \alpha_2 G_2,$$

$$\begin{cases} G_1 = (V_{Ref} + V_{com} - V_{HV}[k+2])^2 \\ G_2 = (V_{HV}[k+2] - V_{HV}[k])^2 \end{cases}$$

其中， V_{Ref} 为输出电压的参考值， V_{com} 补偿电压， V_{HV} 为高压侧电压， G_1 部分的目的是使输出电压收敛到 V_{Ref} ，k为当前的控制周期， G_2 部分的目的是提升稳态时DAB变换器的性能； α_1 、 α_2 为 G_1 、 G_2 两个部分的权重系数。

[权利要求 7] 根据权利要求6所述的一种DAB变换器的高频变压器漏感参数估计方法，其特征在于：

所述变压器漏感包含两个部分，其一是变压器原边的漏感，其二是变压器副边的漏感通过变压器的匝数比折算到变压器原边的漏感。

[权利要求 8] 根据权利要求7所述的一种DAB变换器的高频变压器漏感参数估计方法，其特征在于：

所述梯度下降的公式为

$$\hat{L}[k] = \hat{L}[k-1] - \eta E(k),$$

$\hat{L}$ 为变压器的漏感估计值， $E(k)$ 为估计误差， η 为梯度因子。

[权利要求 9] 根据权利要求1所述的一种DAB变换器的高频变压器漏感参数估计方法，其特征在于：

所述计算待评估移相角，并根据使代价函数最小的原则选择移相角，控制所述DAB变换器，包括：

在每个控制周期内，将控制集内的三个待评估对象，被代入所述代价函数中，将该代价函数最小的待评估对象在下一个控制周期内用于DAB变换器中。

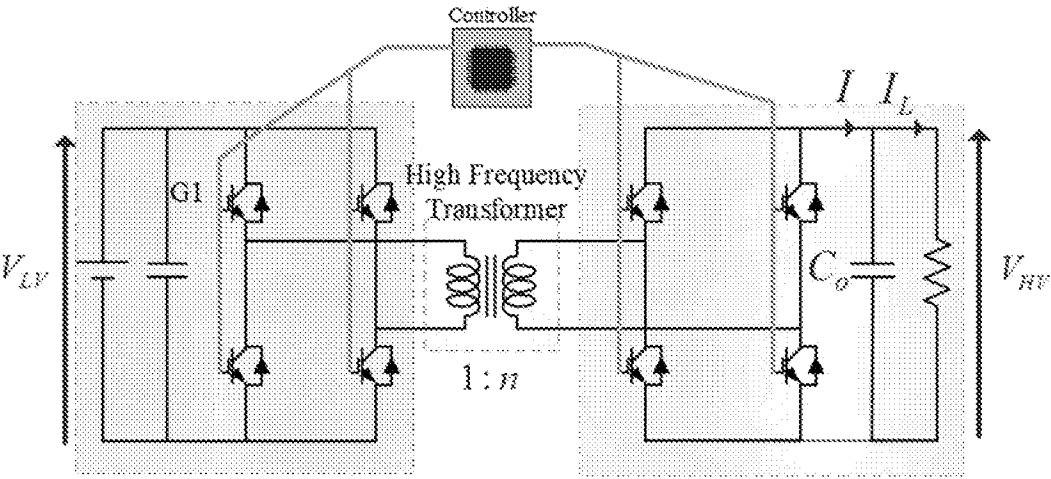


图 1

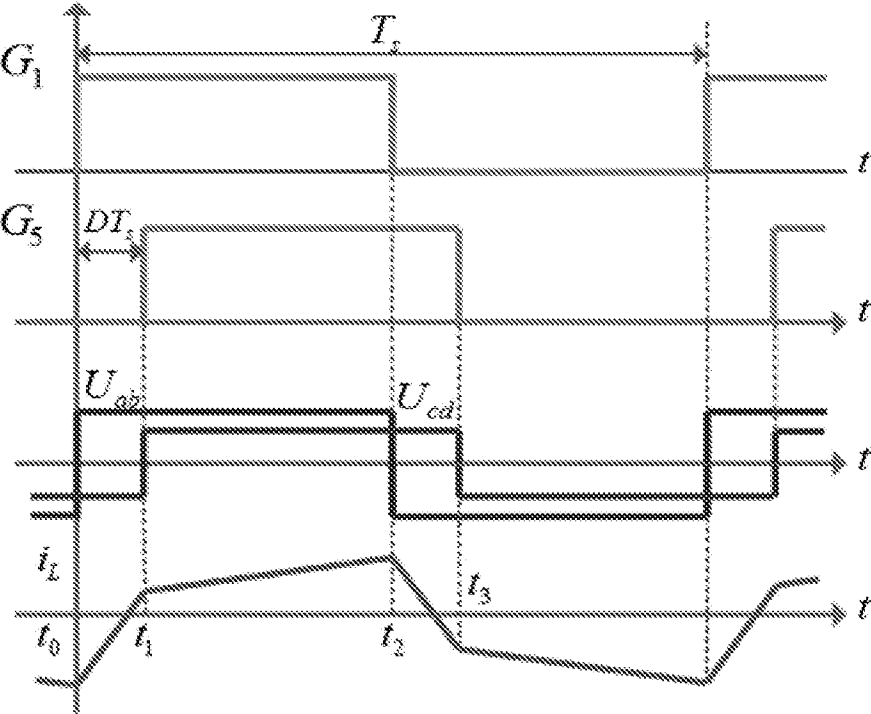


图 2

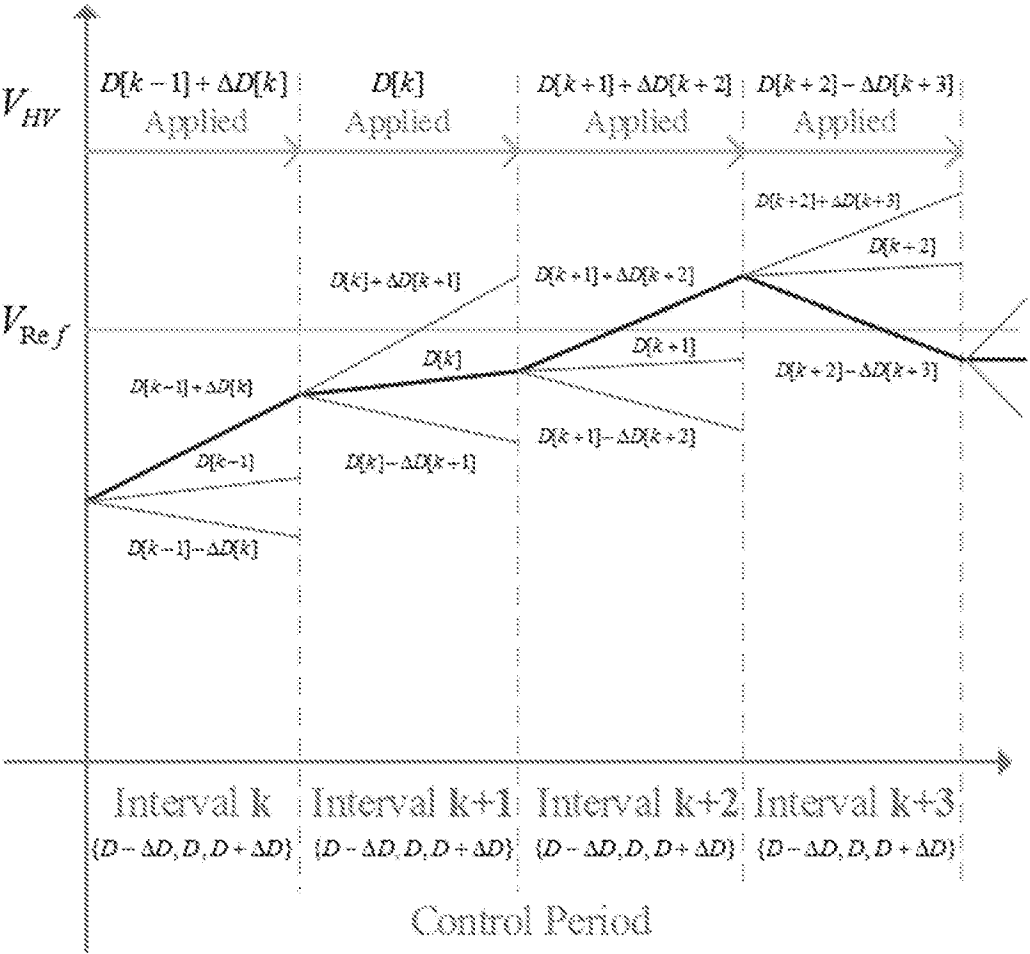


图 3

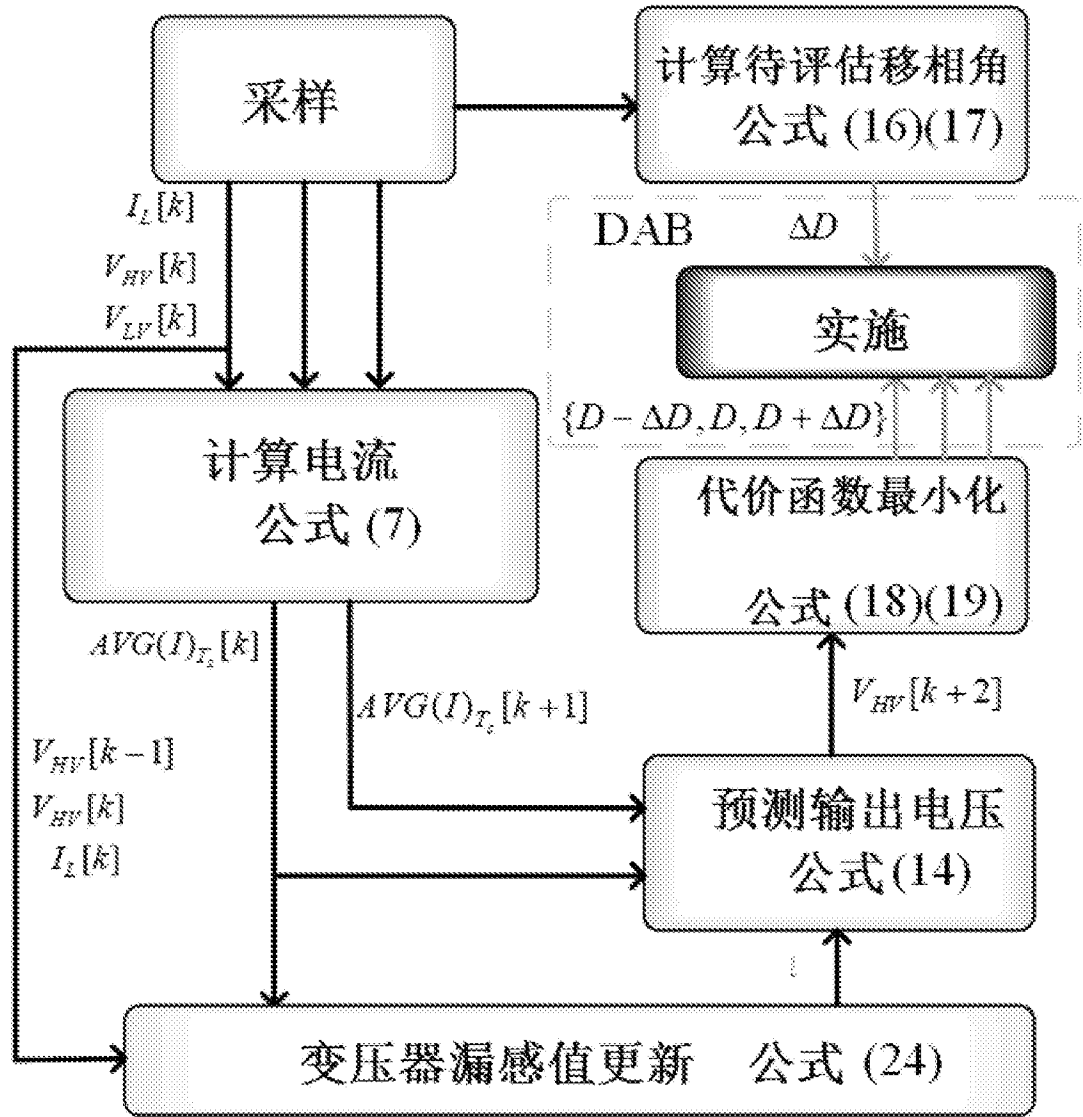


图 4

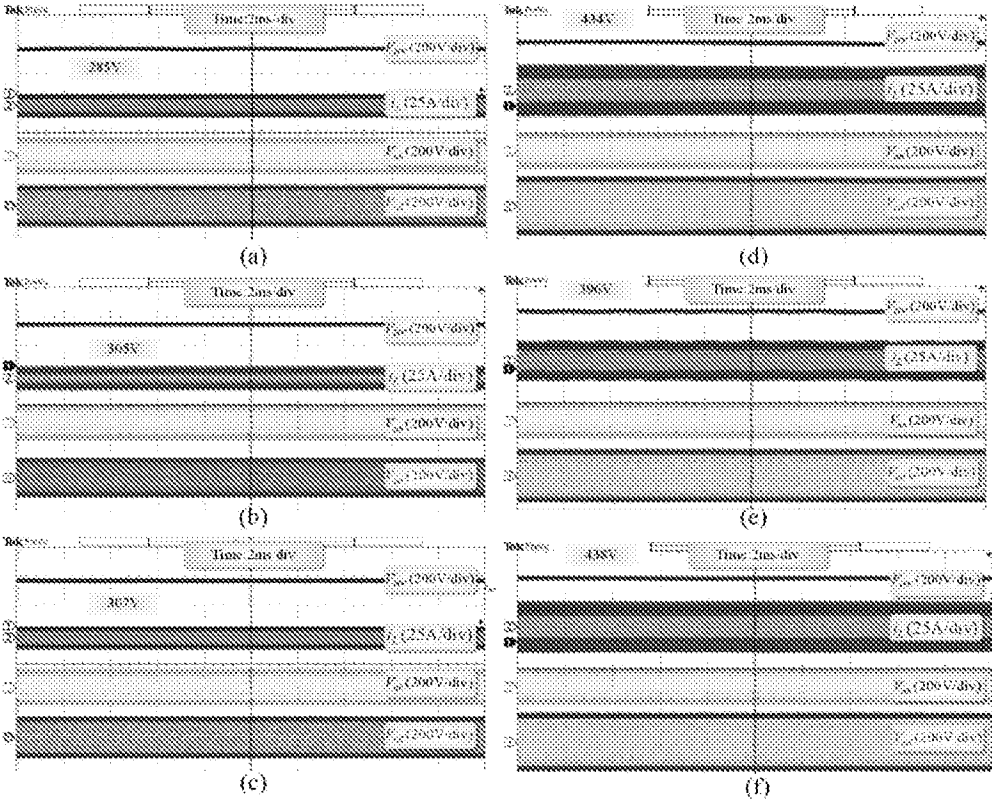


图 5

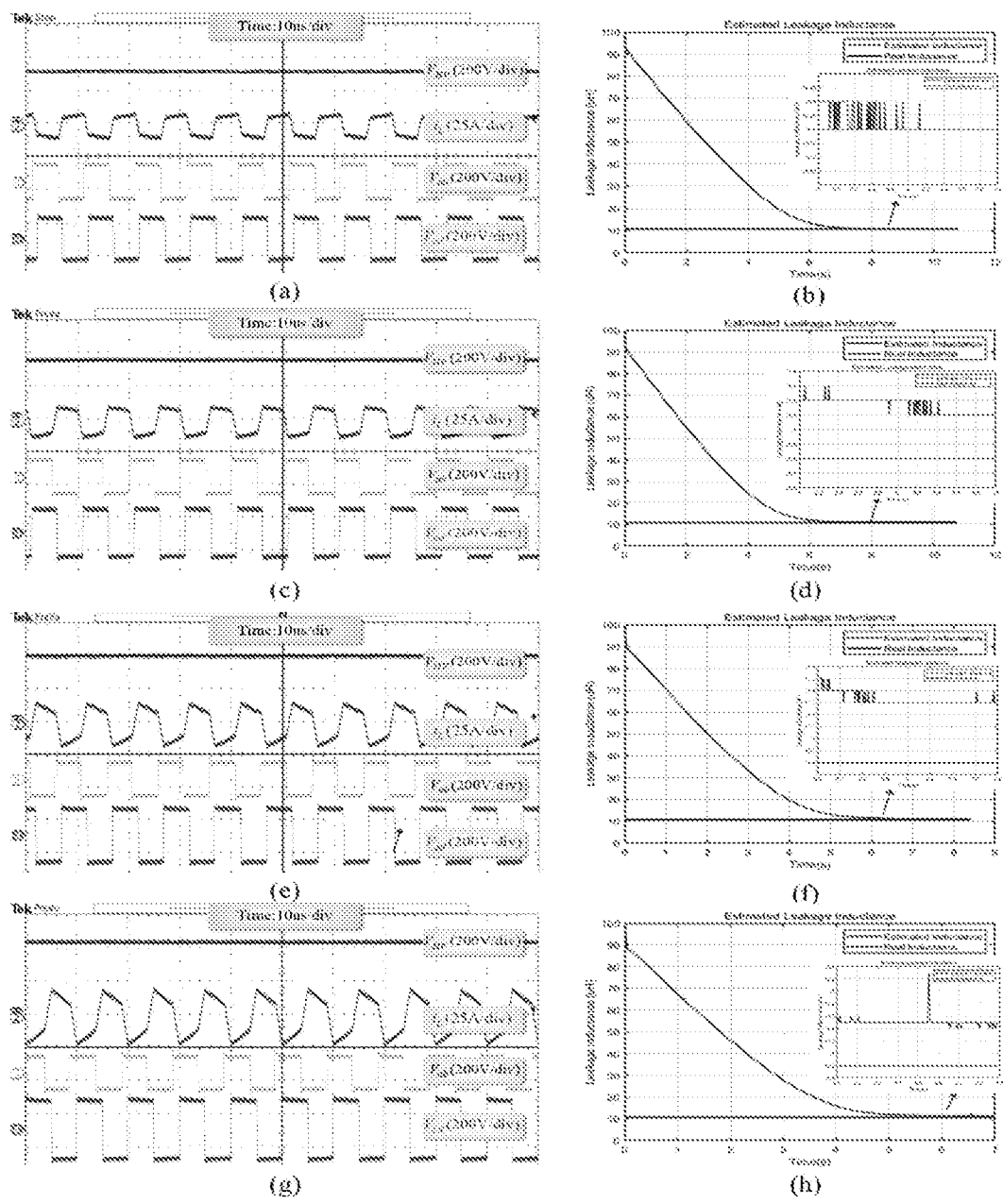


图 6

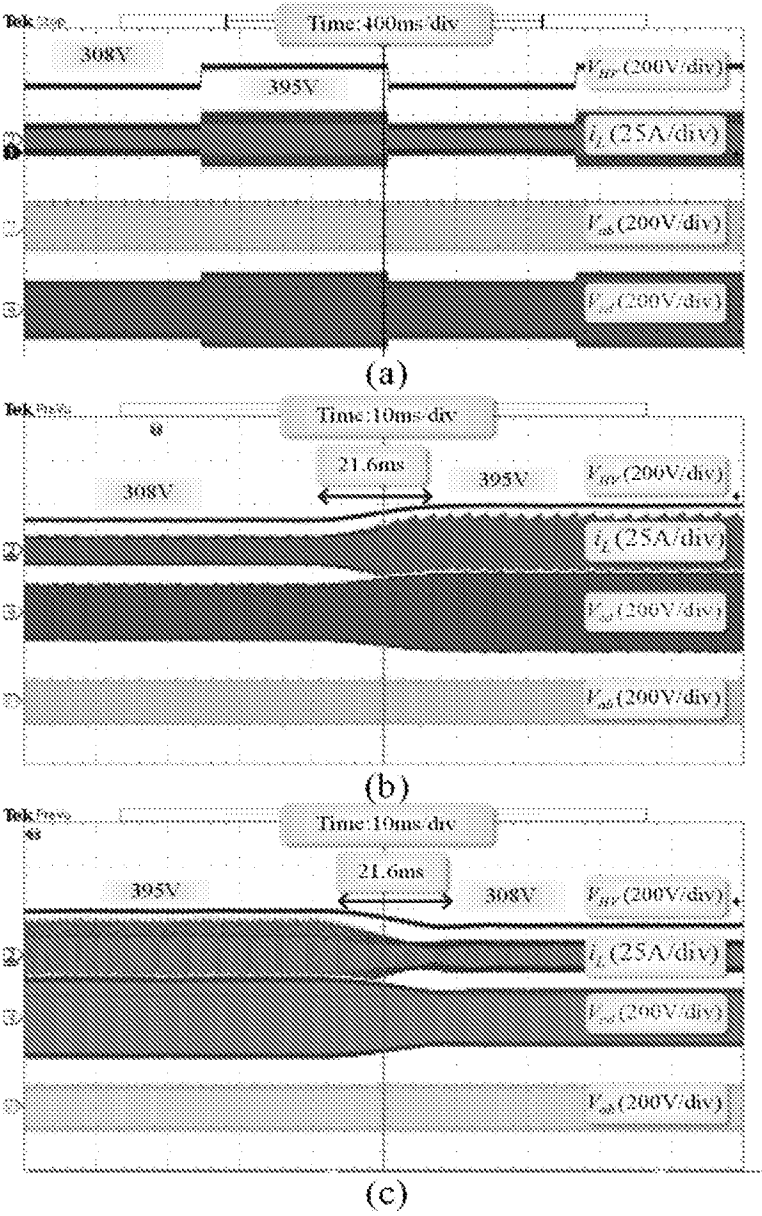


图 7

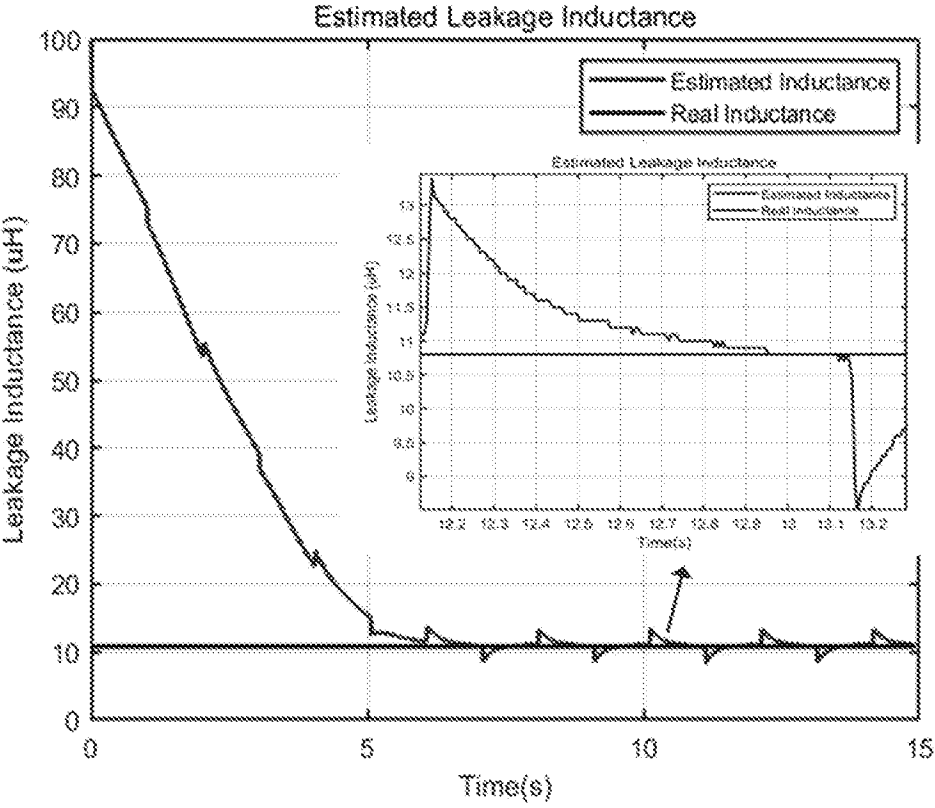


图 8

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2023/082638

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01R 19/00(2006.01)i; G01R 25/00(2006.01)i; G06F 17/10(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: G01R, G06F

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)

CNTXT; CNKI; ENTXTC; ENTXT; VEN: DAB, 双有源桥, 变换器, 变压器, 漏感, 电感, 平均, 均值, 电流, 梯度下降, 代价函数, 移相角, dual-active-bridge, converter, transformer, leakage inductance, average current, cost function, phase shifting angle

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	CN 115473440 A (JIANGSU KOYOE ENERGY TECHNOLOGY CO., LTD.) 13 December 2022 (2022-12-13) claims 1-7	1-9
Y	US 2017370977 A1 (GENERAL ELECTRIC COMPANY) 28 December 2017 (2017-12-28) description, paragraphs 13-28	1-9
A	CN 113206499 A (XI'AN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 03 August 2021 (2021-08-03) entire document	1-9
A	CN 113394982 A (XIANGTAN UNIVERSITY) 14 September 2021 (2021-09-14) entire document	1-9
A	CN 113765393 A (NANJING UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 07 December 2021 (2021-12-07) entire document	1-9
A	CN 114221553 A (SHANDONG UNIVERSITY) 22 March 2022 (2022-03-22) entire document	1-9



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

20 October 2023

Date of mailing of the international search report

23 October 2023

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.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2023/082638

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2022262066 A1 (SOOCHOW UNIVERSITY) 22 December 2022 (2022-12-22) entire document	1-9

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2023/082638

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)		Publication date (day/month/year)
CN	115473440	A	13 December 2022	None		
US	2017370977	A1	28 December 2017	US	10024898 B2	17 July 2018
CN	113206499	A	03 August 2021	None		
CN	113394982	A	14 September 2021	None		
CN	113765393	A	07 December 2021	None		
CN	114221553	A	22 March 2022	None		
WO	2022262066	A1	22 December 2022	None		

A. 主题的分类 G01R 19/00(2006.01)i; G01R 25/00(2006.01)i; G06F 17/10(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: G01R, G06F 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)) CNTXT; CNKI; ENTXTC; ENTXT; VEN; DAB, 双有源桥, 变换器, 变压器, 漏感, 电感, 平均, 均值, 电流, 梯度下降, 代价函数, 移相角, dual-active-bridge, converter, transformer, leakage inductance, average current, cost function, phase shifting angle		
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
Y	CN 115473440 A (江苏科曜能源科技有限公司) 2022年12月13日 (2022 - 12 - 13) 权利要求1-7	1-9
Y	US 2017370977 A1 (GEN ELECTRIC) 2017年12月28日 (2017 - 12 - 28) 说明书第13-28段	1-9
A	CN 113206499 A (西安理工大学) 2021年8月3日 (2021 - 08 - 03) 全文	1-9
A	CN 113394982 A (湘潭大学) 2021年9月14日 (2021 - 09 - 14) 全文	1-9
A	CN 113765393 A (南京理工大学) 2021年12月7日 (2021 - 12 - 07) 全文	1-9
A	CN 114221553 A (山东大学) 2022年3月22日 (2022 - 03 - 22) 全文	1-9
A	WO 2022262066 A1 (UNIV SOOCHOW) 2022年12月22日 (2022 - 12 - 22) 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 2023年10月20日	国际检索报告邮寄日期 2023年10月23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 苗文 电话号码 (+86) 62085340	

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2023/082638

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	115473440	A	2022年12月13日	无	
US	2017370977	A1	2017年12月28日	US 10024898 B2	2018年7月17日
CN	113206499	A	2021年8月3日	无	
CN	113394982	A	2021年9月14日	无	
CN	113765393	A	2021年12月7日	无	
CN	114221553	A	2022年3月22日	无	
WO	2022262066	A1	2022年12月22日	无	