



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 113949096 A

(43) 申请公布日 2022. 01. 18

(21) 申请号 202111192134.4

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2021.10.13

H02J 3/38 (2006.01)

H02J 3/32 (2006.01)

(71) 申请人 国网江苏省电力有限公司连云港供电分公司

地址 222000 江苏省连云港市海州区幸福路1号

申请人 国网江苏省电力有限公司东海县供电分公司

(72) 发明人 张自伟 程振华 伏祥运 于跃 韩伟 岳付昌 李响 谭恒兵 黄淮

(74) 专利代理机构 南京理工大学专利中心 32203

代理人 马鲁晋

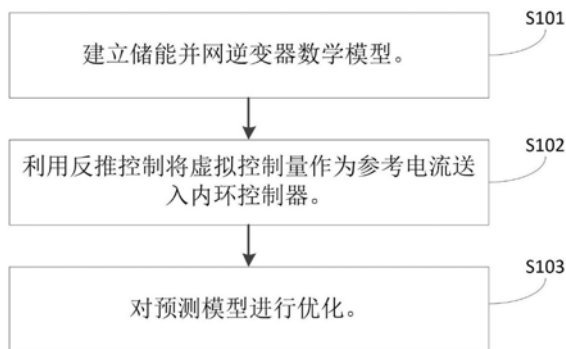
权利要求书3页 说明书8页 附图3页

(54) 发明名称

一种基于反推模型预测控制的储能系统控制器设计方法

(57) 摘要

本申请提供一种基于反推模型预测控制的储能系统控制器设计方法,其特征在于,所述方法包括:建立储能并网逆变器数学模型;利用反推控制将虚拟控制量作为参考电流送入内环控制器;对预测模型进行优化。本申请提供的方法直接将虚拟控制量作为参考电流送入内环控制器,不仅避免了对虚拟控制量多次求导,而且降低了控制器设计的复杂度。



1. 一种基于反推模型预测控制的储能系统控制器设计方法,其特征在于,所述方法包括:

建立储能并网逆变器数学模型;

利用反推控制将虚拟控制量作为参考电流送入内环控制器;

对预测模型进行优化。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,建立储能并网逆变器数学模型,包括:

$$L \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = -R \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} U_{sa} - U_{ra} \\ U_{sb} - U_{rb} \\ U_{sc} - U_{rc} \end{pmatrix} \quad (1)$$

公式(1)中, R 为等效电阻, U_{sk} 为电网侧电压, i_k 为电网侧电流, U_{rk} 为变流器交流侧电压;其中, $k=a,b,c$, a,b,c 分别表示电压的三相, L 为电感;

对公式(1)进行dq坐标变换,得到dq坐标系下的换流器的数学模型如下式:

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = \omega L i_q - R i_d + U_{sd} - U_{rd} \\ L \frac{di_q}{dt} = -\omega L i_d - R i_q + U_{sq} - U_{rq} \end{cases} \quad (2)$$

公式(2)中, i_q 为电流的q轴分量, i_d 为电流的d轴分量, U_{sd} 为电压的d轴分量, U_{sq} 为电压的q轴分量, U_{rd} 为换流器交流侧d轴电压值, U_{rq} 为换流器的交流侧q轴电压值;

稳态下 $U_{sq}=0$ 且阻值 R 较小其损耗可忽略不计,变流器从交流侧吸收的有功功率和无功功率为:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} U_{sd} i_d \\ Q = -\frac{3}{2} U_{sd} i_q \end{cases} \quad (3)$$

公式(3)中, P 为有功功率, Q 为无功功率;

并网逆变器忽略损耗下的功率守恒式为:

$$C U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} U_{sd} i_d \quad (4)$$

公式(4)中, U_{dc} 为直流侧母线电压, C 为直流侧电容。

3. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,利用反推控制将虚拟控制量作为参考电流送入内环控制器,包括:

在外环控制中引入反推控制,得到电流参考值;

利用所述电流参考值,内环控制器通过预测模型预测控制。

4. 根据权利要求3所述的方法,其特征在于,在外环控制中引入反推控制,得到电流参考值,包括:

定义为直流电压跟踪误差:

$$z_1 = U_{dc} - U_{dcref} \quad (5)$$

公式(5)中, z_1 为直流电压跟踪误差, U_{dc} 为直流电压实际值, U_{dcref} 为直流电压参考值;

直流电压跟踪误差的倒数为:

$$\dot{z}_1 = \frac{3}{2CU_{dc}} U_{sd} i_d - \dot{U}_{dref} \quad (6)$$

公式(6)中, \dot{z}_1 为直流电压跟踪误差的导数, \dot{U}_{dref} 为直流电压参考值的导数;
设正定Lyapunov函数可以表示为:

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (7)$$

公式(7)中, V_1 是正定Lyapunov函数;
对公式(7)进行求导,得到:

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = -k_1 z_1^2 + z_1 \left[\frac{3}{2CU_{dc}} U_{sd} (i_d - i_{dref}) - \dot{U}_{dref} + k_1 z_1 \right] \quad (8)$$

公式(8)中, i_{dref} 为电流参考值;
将公式(8)进行处理后,得到所述电流参考值:

$$i_{dref} = \frac{2CU_{dc}}{3U_{sd}} (\dot{U}_{dref} - k_1 z_1) - i_d \quad (9)$$

公式(9)中,所述电流参考值作为内环的d轴电流的参考值。

5. 根据权利要求3所述的方法,其特征在于,利用所述电流参考值,内环控制器通过预测模型预测控制,包括:

离散模型为:

$$i_d(k+1) = \left(1 - \frac{R}{L} T_s\right) i_d(k) + \omega T_s i_q(k) + \frac{T_s}{L} (U_{sd}(k) - U_{rd}(k-1) - \Delta U_{rd}(k)) \quad (10)$$

$$i_q(k+1) = \left(1 - \frac{R}{L} T_s\right) i_q(k) - \omega T_s i_d(k) + \frac{T_s}{L} (U_{sq}(k) - U_{rq}(k-1) - \Delta U_{rq}(k)) \quad (11)$$

公式(10)以及公式(11)中, T_s 是采样周期; $U_{rdq}(k-1)$ 是换流器交流侧k-1时刻电压采样值; $U_{sdq}(k)$ 是k时刻网侧电压, $i_{dq}(k)$ 是k时刻电流采样值; $i_{dq}(k+1)$ 是k+1时刻电流预测值; $\Delta U_{rdq}(k)$ 是k时刻换流器输出电压增量, ω 是角频率, I_q 是电流的q轴分量, U_{rq} 是换流器交流侧q轴电压值, U_{rd} 换流器交流侧d轴电压值;

所述预测模型为神经网络模型;

神经网络模型的输出表达式为:

$$o(w_i, x_i) = \sum_{i=0}^n w_i x_i \quad (12)$$

公式(12)中, w_i 为神经网络权值, x_i 为网络输入信号,对应为k时刻电流采样值, $o(w_i, x_i)$ 为网络的输出激励函数;

神经网络模型的最小均方算法的权值调整算法为:

$$w_i(k+1) = w_i(k) + 2\eta x_i (d(k) - o(k)) \quad (13)$$

公式(13)中, $w_i(k+1)$ 为神经网络模型最小均方算法k+1时刻的权值, $w_i(k)$ 为神经网络模型最小均方算法k时刻的权值。

6. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,对所述预测模型进行优化,包括:

将电流预测误差定义为:

$$\begin{cases} e_d(k) = h_1(i_d(k) - i_d^c(k)) \\ e_q(k) = h_2(i_q(k) - i_q^c(k)) \end{cases} \quad (15)$$

公式(15)中, h_1 是误差校正系数之一, h_2 是误差校正系数之二, $i_{dq}(k)$ 是换流器在k时刻电流的采样值, $i_{dq}^c(k)$ 是补偿以后k时刻预测电流值;

校正后的预测模型的输出为:

$$\begin{cases} i_d^c(k+1) = i_d(k+1) + e_d(k) \\ i_q^c(k+1) = i_q(k+1) + e_q(k) \end{cases} \quad (16)$$

进行滚动优化,使电流预测值与电流参考值的差值是滚动优化的目标,控制目标函数如下:

$$J = \lambda_1 [i_d^c(k+1) - i_{dref}(k)]^2 + \lambda_2 [i_q^c(k+1) - i_{qref}(k)]^2 + \xi_1 \Delta U_{rd}^2(k) + \xi_2 \Delta U_{rq}^2(k) \quad (17)$$

公式(17)中, $\lambda_{1,2}$ 是电流误差在目标函数中的权重系数, $\xi_{1,2}$ 是控制电压增量误差在目标函数中的权重系数, i_{dqref} 是dq轴参考电流。

一种基于反推模型预测控制的储能系统控制器设计方法

技术领域

[0001] 本申请涉及电力系统储能控制器技术领域,特别涉及一种基于反推模型预测控制的储能系统控制器设计方法。

背景技术

[0002] 随着我国经济的高速发展和城市供用电形式的深度变革,高可靠性供电、高渗透率分布式能源友好接入对电网安全可靠运行提出了更高要求。但由于电能无法大量储存,传统电网运行模式是所谓的“即发即用”状态,发电量与用电量需保持一种动态的平衡,当系统中发生扰动就会引起功率的失衡,进而严重情况下会影响电网的安全稳定运行。而储能因其具有电能储存,配置灵活以及削峰填谷等特点,在现代电网的发-输-配等各个部分发挥着举足轻重的作用。通过对储能变流器快速可靠的控制能够有效提高响应电网需求的能力,增强电网的可靠性和灵活性。因此,储能控制技术的研究被越来越多的学者关注。

[0003] 维持储能系统直流侧电压稳定是功率稳定传输的前提。因此,改善电压稳定性和动态响应性是复杂的储能系统控制器优化的主要方向。研究表明采用双闭环PI控制对DC/AC变换器进行控制,实现了系统PQ解耦控制,控制简单且便于实现,但动态响应速度和控制精度有待提高。已有研究提出一种基于并网逆变器的模型预测控制,能够有效降低控制策略设计的复杂度并改善系统动态响应速度慢等问题。而基于模型预测设计了内环电流控制器,提高了系统的动态响应速度,但未考虑外环PI控制器存在的积分饱和以及电压稳定性不高等问题。为避免积分饱和,采用反推控制设计控制器,有效改善了直流侧电压波动较大的问题,但需要对虚拟控制量多次求导增加了控制运算量。逆变器在建模仿真分析中对电感值总是设定成定值,当电感上流过大电流时,电感值会发生变化,定值的电感对系统的控制精度会有影响。

[0004] 虽然以上方法都在一定程度上解决了某些方面的问题,但是确一直未能有效解决储能逆变器直流电压波动较大以及动态响应速度慢的问题,及时一定程度上解决了储能逆变器直流电压波动较大以及动态响应速度慢的问题,又同时引入了运算量过大等其他问题。

发明内容

[0005] 本申请提供了一种基于反推模型预测控制的储能系统控制器设计方法,可用于解决储能逆变器直流电压波动较大以及动态响应速度慢的技术问题。

[0006] 本申请提供一种基于反推模型预测控制的储能系统控制器设计方法,所述方法包括:

[0007] 建立储能并网逆变器数学模型;

[0008] 利用反推控制将虚拟控制量作为参考电流送入内环控制器;

[0009] 对预测模型进行优化。

[0010] 可选的,建立储能并网逆变器数学模型,包括:

$$[0011] \quad L \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = -R \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} U_{sa} - U_{ra} \\ U_{sb} - U_{rb} \\ U_{sc} - U_{rc} \end{pmatrix} \quad (1)$$

[0012] 公式(1)中,R为等效电阻, U_{sk} 为电网侧电压, i_k 为电网侧电流, U_{rk} 为变流器交流侧电压;其中, $k=a,b,c$, a,b,c 分别表示电压的三相,L为电感;

[0013] 对公式(1)进行dq坐标变换,得到dq坐标系下的换流器的数学模型如下式:

$$[0014] \quad \begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = \omega L i_q - R i_d + U_{sd} - U_{rd} \\ L \frac{di_q}{dt} = -\omega L i_d - R i_q + U_{sq} - U_{rq} \end{cases} \quad (2)$$

[0015] 公式(2)中, i_q 为电流的q轴分量, i_d 为电流的d轴分量, U_{sd} 为电压的d轴分量, U_{sq} 为电压的q轴分量, U_{rd} 为换流器交流侧d轴电压值, U_{rq} 为换流器的交流侧q轴电压值;

[0016] 稳态下 $U_{sq}=0$ 且阻值R较小其损耗可忽略不计,变流器从交流侧吸收的有功功率和无功功率为:

$$[0017] \quad \begin{cases} P = \frac{3}{2} U_{sd} i_d \\ Q = -\frac{3}{2} U_{sd} i_q \end{cases} \quad (3)$$

[0018] 公式(3)中,P为有功功率,Q为无功功率;

[0019] 并网逆变器忽略损耗下的功率守恒式为:

$$[0020] \quad CU_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} U_{sd} i_d \quad (4)$$

[0021] 公式(4)中, U_{dc} 为直流侧母线电压,C为直流侧电容。

[0022] 可选的,利用反推控制将虚拟控制量作为参考电流送入内环控制器,包括:

[0023] 在外环控制中引入反推控制,得到电流参考值;

[0024] 利用所述电流参考值,内环控制器通过预测模型预测控制。

[0025] 可选的,在外环控制中引入反推控制,得到电流参考值,包括:

[0026] 定义为直流电压跟踪误差:

$$[0027] \quad z_1 = U_{dc} - U_{dcref} \quad (5)$$

[0028] 公式(5)中, z_1 为直流电压跟踪误差, U_{dc} 为直流电压实际值, U_{dcref} 为直流电压参考值;

[0029] 直流电压跟踪误差的倒数为:

$$[0030] \quad \dot{z}_1 = \frac{3}{2CU_{dc}} U_{sd} i_d - \dot{U}_{dcref} \quad (6)$$

[0031] 公式(6)中, \dot{z}_1 为直流电压跟踪误差的导数, \dot{U}_{dcref} 为直流电压参考值的导数;

[0032] 设正定Lyapunov函数可以表示为:

$$[0033] \quad V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (7)$$

[0034] 公式(7)中, V_1 是正定Lyapunov函数;

[0035] 对公式 (7) 进行求导, 得到:

$$[0036] \quad \dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = -k_1 z_1^2 + z_1 \left[\frac{3}{2CU_{dc}} U_{sd} (i_d - i_{dref}) - \dot{U}_{dref} + k_1 z_1 \right] \quad (8)$$

[0037] 公式 (8) 中, i_{dref} 为电流参考值;

[0038] 将公式 (8) 进行处理后, 得到所述电流参考值;

$$[0039] \quad i_{dref} = \frac{2CU_{dc}}{3U_{sd}} (\dot{U}_{dref} - k_1 z_1) - i_d \quad (9)$$

[0040] 公式 (9) 中, 所述电流参考值作为内环的d轴电流的参考值。

[0041] 可选的, 利用所述电流参考值, 内环控制器通过预测模型预测控制, 包括:

[0042] 离散模型为:

$$[0043] \quad i_d(k+1) = (1 - \frac{R}{L} T_s) i_d(k) + \omega T_s i_q(k) + \frac{T_s}{L} (U_{sd}(k) - U_{rd}(k-1) - \Delta U_{rd}(k)) \quad (10)$$

$$[0044] \quad i_q(k+1) = (1 - \frac{R}{L} T_s) i_q(k) - \omega T_s i_d(k) + \frac{T_s}{L} (U_{sq}(k) - U_{rq}(k-1) - \Delta U_{rq}(k)) \quad (11)$$

[0045] 公式 (10) 以及公式 (11) 中, T_s 是采样周期; $U_{rdq}(k-1)$ 是换流器交流侧k-1时刻电压采样值; $U_{sdq}(k)$ 是k时刻网侧电压, $i_{dq}(k)$ 是k时刻电流采样值; $i_{dq}(k+1)$ 是k+1时刻电流预测值; $\Delta U_{rdq}(k)$ 是k时刻换流器输出电压增量, ω 是角频率, I_q 是电流的q轴分量, U_{rq} 是换流器交流侧q轴电压值, U_{rd} 换流器交流侧d轴电压值;

[0046] 所述预测模型为神经网络模型;

[0047] 神经网络模型的输出表达式为:

$$[0048] \quad o(w_i, x_i) = \sum_{i=0}^n w_i x_i \quad (12)$$

[0049] 公式 (12) 中, w_i 为神经网络权值, x_i 为网络输入信号, 对应为k时刻电流采样值, $o(w_i, x_i)$ 为网络的输出激励函数;

[0050] 神经网络模型的最小均方算法的权值调整算法为:

$$[0051] \quad w_i(k+1) = w_i(k) + 2\eta x_i (d(k) - o(k)) \quad (13)$$

[0052] 公式 (13) 中, $w_i(k+1)$ 为神经网络模型最小均方算法k+1时刻的权值, $w_i(k)$ 为神经网络模型最小均方算法k时刻的权值。

[0053] 可选的, 对所述预测模型进行优化, 包括:

[0054] 将电流预测误差定义为:

$$[0055] \quad \begin{cases} e_d(k) = h_1(i_d(k) - i_d^c(k)) \\ e_q(k) = h_2(i_q(k) - i_q^c(k)) \end{cases} \quad (15)$$

[0056] 公式 (15) 中, h_1 是误差校正系数之一, h_2 是误差校正系数之二, $i_{dq}(k)$ 是换流器在k时刻电流的采样值, $i_{dq}^c(k)$ 是补偿以后k时刻预测电流值;

[0057] 校正后的预测模型的输出为:

$$[0058] \quad \begin{cases} i_d^c(k+1) = i_d(k+1) + e_d(k) \\ i_q^c(k+1) = i_q(k+1) + e_q(k) \end{cases} \quad (16)$$

[0059] 进行滚动优化, 使电流预测值与电流参考值的差值是滚动优化的目标, 控制目标

函数如下：

$$[0060] \quad J = \lambda_1 [i_d^c(k+1) - i_{dref}(k)]^2 + \lambda_2 [i_q^c(k+1) - i_{qref}(k)]^2 + \xi_1 \Delta U_{rd}^2(k) + \xi_2 \Delta U_{rq}^2(k) \quad (17)$$

[0061] 公式(17)中, $\lambda_{1,2}$ 是电流误差在目标函数中的权重系数, $\xi_{1,2}$ 是控制电压增量误差在目标函数中的权重系数, i_{dqref} 是dq轴参考电流。

[0062] 本申请提供的方法针对储能逆变器直流电压波动较大以及动态响应速度慢等问题,设计一种外环反推内环模型预测控制器。首先建立储能并网逆变器数学模型。然后针对传统外环PI控制中存在的电压波动较大、PI参数难以整定等问题,应用反推控制取代传统外环PI控制,直接将虚拟控制量作为参考电流送入内环控制器,不仅避免了对虚拟控制量多次求导,而且降低了控制器设计的复杂度;其次,针对传统PI内环控制动态响应速度慢的问题在内环控制器中引入模型预测控制,并采用神经网络算法对不确定的电感参数进行在线辨识,提高模型预测控制精度。

附图说明

[0063] 图1为本申请实施例提供的一种基于反推模型预测控制的储能系统控制器设计方法的流程示意图;

[0064] 图2为本申请实施例提供的一种储能变流器并网结构拓扑图;

[0065] 图3为本申请实施例提供的一种基于反推模型预测控制的储能系统控制器设计方法的原理框图;

[0066] 图4为本申请实施例提供的一种外环反推控制框图;

[0067] 图5为本申请实施例提供的一种内环模型预测控制框图;

[0068] 图6为本申请实施例提供的一种预测模型和反推控制下的母线电压示意图;

[0069] 图7为本申请实施例提供的一种母线电压对比示意图之一;

[0070] 图8为本申请实施例提供的一种神经网络参数辨识下电感示意图;

[0071] 图9为本申请实施例提供的一种母线电压对比示意图之二。

具体实施方式

[0072] 为使本申请的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合附图对本申请实施方式作进一步地详细描述。

[0073] 下面首先结合图1为本申请实施例提供的一种基于反推模型预测控制的储能系统控制器设计方法的流程示意图。

[0074] 请参考图2,为本申请实施例提供的一种储能变流器并网结构拓扑图。储能变流器并网主要包括蓄电池以及并网变换器。其中,蓄电池提供能量,并网变换器负责传输能量。

[0075] 如图3所示,为本申请实施例提供的一种基于反推模型预测控制的储能系统控制器设计方法的原理框图。

[0076] 本申请提供的方法包括:

[0077] 步骤S101,建立储能并网逆变器数学模型。

[0078] 根据基尔霍夫定律,储能并网逆变器的数学模型如下:

$$[0079] \quad L \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = -R \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} U_{sa} - U_{ra} \\ U_{sb} - U_{rb} \\ U_{sc} - U_{rc} \end{pmatrix} \quad (1)$$

[0080] 公式(1)中,R为等效电阻, U_{sk} 为电网侧电压, i_k 为电网侧电流, U_{rk} 为变流器交流侧电压。其中, $k=a,b,c$, a,b,c 分别表示电压的三相,L为电感。

[0081] 对公式(1)进行dq坐标变换,得到dq坐标系下的换流器的数学模型如下式:

$$[0082] \quad \begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = \omega L i_q - R i_d + U_{sd} - U_{rd} \\ L \frac{di_q}{dt} = -\omega L i_d - R i_q + U_{sq} - U_{rq} \end{cases} \quad (2)$$

[0083] 公式(2)中, i_q 为电流的q轴分量, i_d 为电流的d轴分量, U_{sd} 为电压的d轴分量, U_{sq} 为电压的q轴分量, U_{rd} 为换流器交流侧d轴电压值, U_{rq} 为换流器的交流侧q轴电压值。

[0084] 稳态下 $U_{sq}=0$ 且阻值R较小其损耗可忽略不计,变流器从交流侧吸收的有功功率和无功功率为:

$$[0085] \quad \begin{cases} P = \frac{3}{2} U_{sd} i_d \\ Q = -\frac{3}{2} U_{sd} i_q \end{cases} \quad (3)$$

[0086] 公式(3)中,P为有功功率,Q为无功功率。

[0087] 并网逆变器忽略损耗下的功率守恒式为:

$$[0088] \quad CU_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} U_{sd} i_d \quad (4)$$

[0089] 公式(4)中, U_{dc} 为直流侧母线电压,C为直流侧电容。

[0090] 步骤S102,利用反推控制将虚拟控制量作为参考电流送入内环控制器。

[0091] 为更好实现储能系统直流侧电压的稳定,在外环控制中引入反推控制,由于外环控制器都采用反推控制设计,设计方法相同且设计步骤类似,因此本部分仅以恒压充电控制器为例进行设计说明。为提高系统的动态响应性,快速跟踪指令功率,内环控制器用预测模型进行控制。

[0092] 如图4所示为本申请实施例提供的一种外环反推控制框图。

[0093] 具体的,步骤S102包括:

[0094] 在外环控制中引入反推控制,得到电流参考值。

[0095] 本申请实施例中,定义为直流电压跟踪误差:

$$[0096] \quad z_1 = U_{dc} - U_{dcref} \quad (5)$$

[0097] 公式(5)中, z_1 为直流电压跟踪误差, U_{dc} 为直流电压实际值, U_{dcref} 为直流电压参考值。

[0098] 直流电压跟踪误差的倒数为:

$$[0099] \quad \dot{z}_1 = \frac{3}{2CU_{dc}} U_{sd} i_d - \dot{U}_{dcref} \quad (6)$$

[0100] 公式(6)中, \dot{z}_1 为直流电压跟踪误差的导数, \dot{U}_{dcref} 为直流电压参考值的导数。

[0101] 设正定Lyapunov函数可以表示为:

$$[0102] \quad V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (7)$$

[0103] 公式(7)中, V_1 是正定Lyapunov函数。

[0104] 对公式(7)进行求导,得到:

$$[0105] \quad \dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = -k_1 z_1^2 + z_1 \left[\frac{3}{2CU_{dc}} U_{sd} (i_d - i_{dref}) - \dot{U}_{dref} + k_1 z_1 \right] \quad (8)$$

[0106] 公式(8)中, i_{dref} 为电流参考值。

[0107] 将公式(8)进行处理后,得到电流参考值。

$$[0108] \quad i_{dref} = \frac{2CU_{dc}}{3U_{sd}} (\dot{U}_{dref} - k_1 z_1) - i_d \quad (9)$$

[0109] 公式(9)中,电流参考值作为内环的d轴电流的参考值。

[0110] 步骤S102还包括:利用电流参考值,内环控制器通过预测模型预测控制。

[0111] 如图5所示为本申请实施例提供的一种内环模型预测控制框图。

[0112] 具体的,将公式(2)离散化并对其中电流的导数进行一阶欧拉法处理,重新排列方程后,得到以下离散模型:

[0113] 离散模型为:

$$[0114] \quad i_d(k+1) = (1 - \frac{R}{L} T_s) i_d(k) + \omega T_s i_q(k) + \frac{T_s}{L} (U_{sd}(k) - U_{rd}(k-1) - \Delta U_{rd}(k)) \quad (10)$$

$$[0115] \quad i_q(k+1) = (1 - \frac{R}{L} T_s) i_q(k) - \omega T_s i_d(k) + \frac{T_s}{L} (U_{sq}(k) - U_{rq}(k-1) - \Delta U_{rq}(k)) \quad (11)$$

[0116] 公式(10)以及公式(11)中, T_s 是采样周期。 $U_{rdq}(k-1)$ 是换流器交流侧k-1时刻电压采样值。 $U_{sdq}(k)$ 是k时刻网侧电压, $i_{dq}(k)$ 是k时刻电流采样值。 $i_{dq}(k+1)$ 是k+1时刻电流预测值。 $\Delta U_{rdq}(k)$ 是k时刻换流器输出电压增量, ω 是角频率, I_q 是电流的q轴分量, U_{rq} 是换流器交流侧q轴电压值, U_{rd} 换流器交流侧d轴电压值。

[0117] 预测模型为神经网络模型。

[0118] 需要说明的是,在目前的研究分析中,一般假设电感L是不变的常数。但在实际运行中,当大电流流过时易造成电感饱和现象,导致电感值发生变化,将直接影响离散模型预测精度。为了获得电感在实际运行中的精确值,采用神经网络算法对模型中电感进行在线参数辨识,提高模型预测精度。

[0119] 神经网络模型的输出表达式为:

$$[0120] \quad o(w_i, x_i) = \sum_{i=0}^n w_i x_i \quad (12)$$

[0121] 公式(12)中, w_i 为神经网络权值, x_i 为网络输入信号,对应为k时刻电流采样值, $o(w_i, x_i)$ 为网络的输出激励函数。

[0122] 神经网络模型的最小均方算法的权值调整算法为:

$$[0123] \quad w_i(k+1) = w_i(k) + 2\eta x_i (d(k) - o(k)) \quad (13)$$

[0124] 公式(13)中, $w_i(k+1)$ 为神经网络模型最小均方算法k+1时刻的权值, $w_i(k)$ 为神经网络模型最小均方算法k时刻的权值。

[0125] 步骤S103,对预测模型进行优化。

[0126] 具体的,将电流预测误差定义为:

$$[0127] \begin{cases} e_d(k) = h_1(i_d(k) - i_d^c(k)) \\ e_q(k) = h_2(i_q(k) - i_q^c(k)) \end{cases} \quad (15)$$

[0128] 公式(15)中, h_1 是误差校正系数之一, h_2 是误差校正系数之二, $i_{dq}(k)$ 是换流器在k时刻电流的采样值, $i_{dq}^c(k)$ 是补偿以后k时刻预测电流值。

[0129] 校正后的预测模型的输出为:

$$[0130] \begin{cases} i_d^c(k+1) = i_d(k+1) + e_d(k) \\ i_q^c(k+1) = i_q(k+1) + e_q(k) \end{cases} \quad (16)$$

[0131] 进行滚动优化,使电流预测值与电流参考值的差值是滚动优化的目标,控制目标函数如下:

$$[0132] J = \lambda_1 [i_d^c(k+1) - i_{dref}(k)]^2 + \lambda_2 [i_q^c(k+1) - i_{qref}(k)]^2 + \xi_1 \Delta U_{rd}^2(k) + \xi_2 \Delta U_{rq}^2(k) \quad (17)$$

[0133] 公式(17)中, $\lambda_{1,2}$ 是电流误差在目标函数中的权重系数, $\xi_{1,2}$ 是控制电压增量误差在目标函数中的权重系数, i_{dqref} 是dq轴参考电流。

[0134] 对目标函数进行求偏导,得到最优控制量。

[0135] 为了进一步说明本申请提供的实施例,下面结合具体实施例进行说明。如表1所示,为仿真参数。

[0136] 表1:仿真参数

参数	参数值
交流侧额定电压/kV	10
交流侧电感/mH	8
[0137] 交流侧电阻/ Ω	0.06
直流侧电压/V	600
储能容量/MW	1.5
直流侧电容/mF	9.6

[0138] 表2为本申请提供的多种控制方法下的效果对比。

[0139] 表2:多种控制方法的控制效果对比

性能指标	双环PI控制 制器	MPC控制 器	反推控 制器	本文所提控 制器
[0140] 超调量/V	32	28	18	10
欠调量/V	12	18	17	7
响应时间/s	0.07	0.05	0.06	0.01
稳态误差/V	3.1	2.3	1.8	1.2

[0141] 为验证所设计控制器抑制直流母线电压波动的效果和动态响应性能,设定在0.4s时电网所需的有功功率由0.5MW突降为-0.2MW。在0.72s时有功功率值由-0.2MW增加到

0.3MW，分别在0.4s和0.72s。

[0142] 如图6所示，为本申请实施例提供的一种预测模型和反推控制下的母线电压示意图。如图7所示，为本申请实施例提供的一种母线电压对比示意图之一。

[0143] 有图6以及图7可知，在小扰动情况下，双闭环PI控制器有较大的超调量和欠调量分别为32V和12V。MPC控制器超调量和欠调量次之，为28V和18V。反推控制器超调量为18kV、欠调为17V。而所设计控制器的超调和欠调量为10V和7V，控制器的直流稳压能力最强，控制器的鲁棒性最优。并且动态响应时间最短约为0.01s，相比于双闭环PI控制器0.07s，MPC控制器0.05s以及反推控制器0.06s都小，所设计的控制器响应速度最优。因此，所设计的控制器在电网所需有功功率改变情况下的鲁棒性以及动态响应性能要优于其他三种控制器。

[0144] 为验证所设计控制器在内环模型预测控制中引入电感参数辨识对直流母线稳压的效果，仿真验证了控制器在由参数辨识情况下和没有参数辨识情况下直流母线电压波动情况。仿真结果如图8和图9所示。

[0145] 图9为反推-模型预测控制在含参数辨识下以及不含参数辨识下的直流母线电压波动情况。从图中可知含参数辨识的反推-模型预测控制器的超调量为10V，而未含参数辨识的反推-模型预测控制器的超调量为22V，且响应时间为0.03s长于含参数辨识的反推-模型预测控制器的响应时间0.01s。由此可知在内环模型预测控制中引入电感参数神经网络辨识能够提高系统响应时间以及抑制直流电压的波动。

[0146] 本申请针对储能逆变器直流电压波动较大以及动态响应速度慢等问题，设计一种外环反推内环模型预测控制器。首先建立储能并网逆变器数学模型。然后针对传统外环PI控制中存在的电压波动较大、PI参数难以整定等问题，应用反推控制取代传统外环PI控制，直接将虚拟控制量作为参考电流送入内环控制器，不仅避免了对虚拟控制量多次求导，而且降低了控制器设计的复杂度。其次，针对传统PI内环控制动态响应速度慢的问题在内环控制器中引入模型预测控制，并采用神经网络算法对不确定的电感参数进行在线辨识，提高模型预测控制精度。

[0147] 本领域的技术人员可以清楚地了解到本申请实施例中的技术可借助软件加必需的通用硬件平台的方式来实现。基于这样的理解，本申请实施例中的技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分可以以软件产品的形式体现出来，该计算机软件产品可以存储在存储介质中，如ROM/RAM、磁碟、光盘等，包括若干指令用以使得一台计算机设备（可以是个人计算机，服务器，或者网络设备等等）执行本申请各个实施例或者实施例的某些部分所述的方法。

[0148] 本说明书中各个实施例之间相同相似的部分互相参见即可。尤其，对于服务构建装置和服务加载装置实施例而言，由于其基本相似于方法实施例，所以描述的比较简单，相关之处参见方法实施例中的说明即可。

[0149] 以上所述的本申请实施方式并不构成对本申请保护范围的限定。

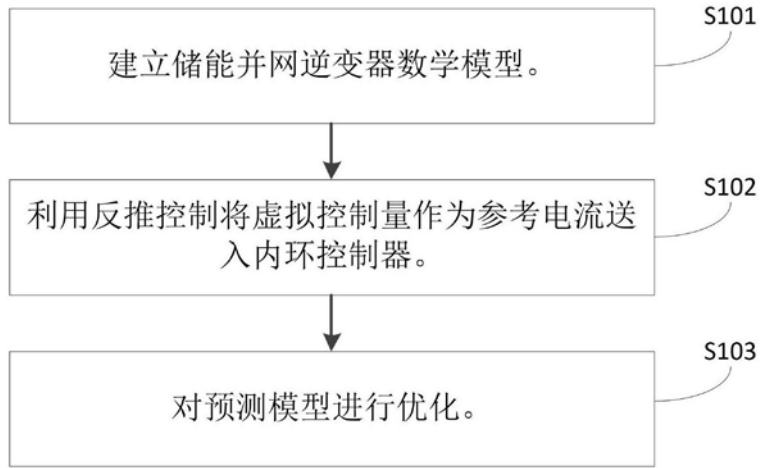


图1

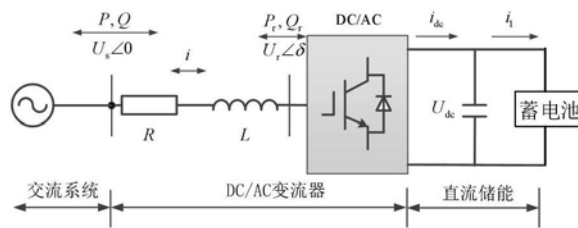


图2

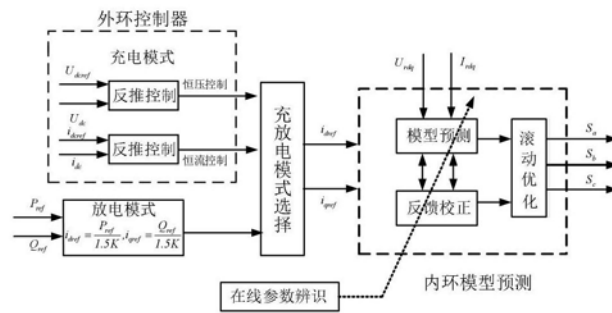


图3

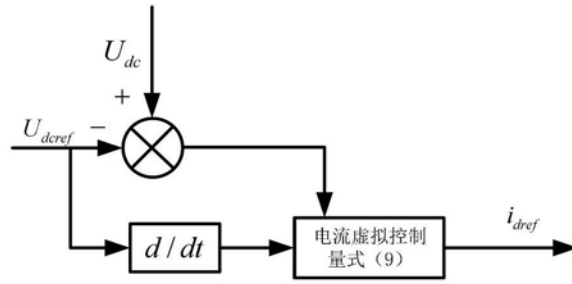


图4

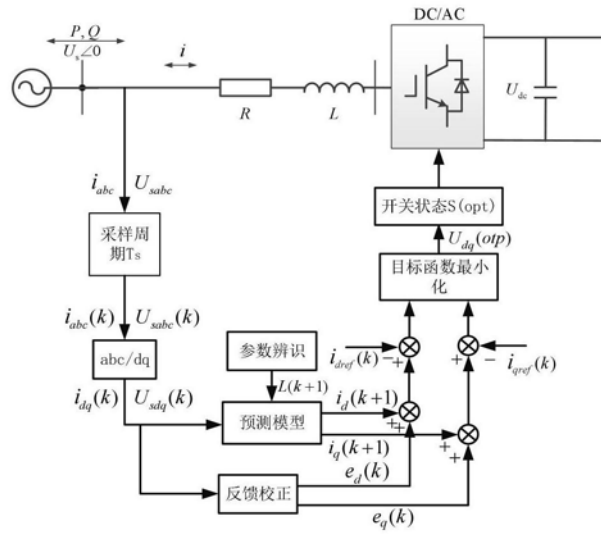


图5

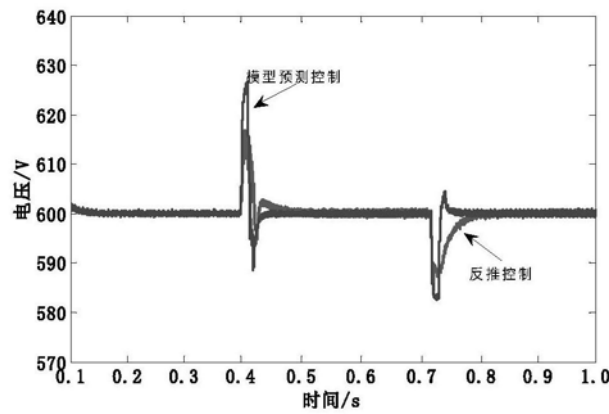


图6

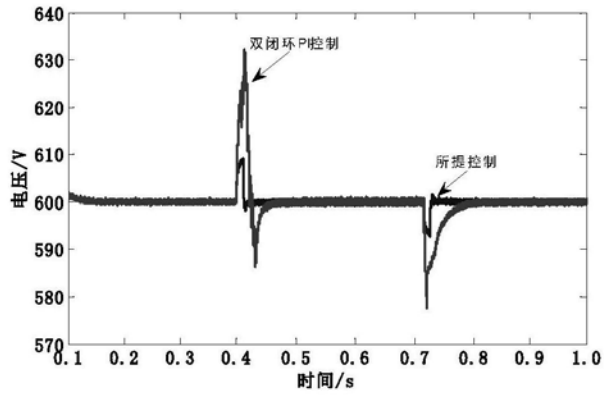


图7

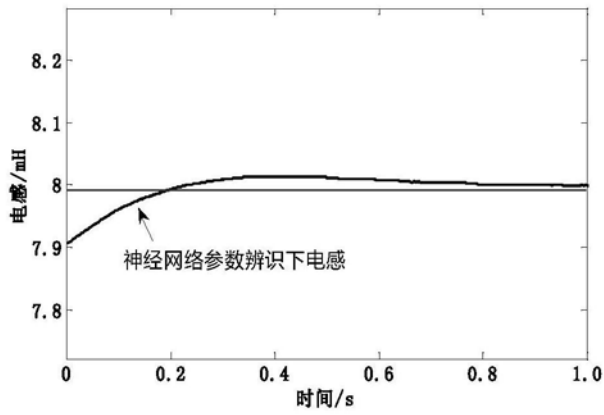


图8

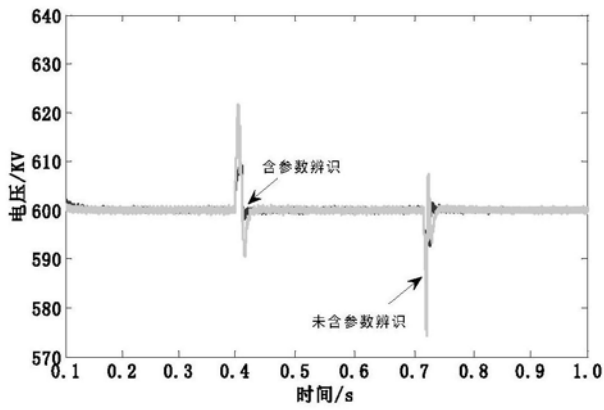


图9