



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 115276094 B

(45) 授权公告日 2023.05.12

(21) 申请号 202210973296.X

H02J 3/00 (2006.01)

(22) 申请日 2022.08.15

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 114665512 A, 2022.06.24

申请公布号 CN 115276094 A

CN 107134964 A, 2017.09.05

CN 114865934 A, 2022.08.05

(43) 申请公布日 2022.11.01

CN 109921669 A, 2019.06.21

(73) 专利权人 山东大学

US 2021075311 A1, 2021.03.11

地址 250061 山东省济南市历下区经十路  
17923号

刘力;于佳丽;. 不对称电网电压下光伏并网  
逆变器控制策略研究. 太阳能学报. 2017, (10),  
第236-244页.

(72) 发明人 张祯滨 欧路利可·巴巴悠米

审查员 刘奇

李真 胡存刚 尹忠刚

(74) 专利代理机构 济南圣达知识产权代理有限

公司 37221

专利代理师 董雪

(51) Int. Cl.

H02J 3/38 (2006.01)

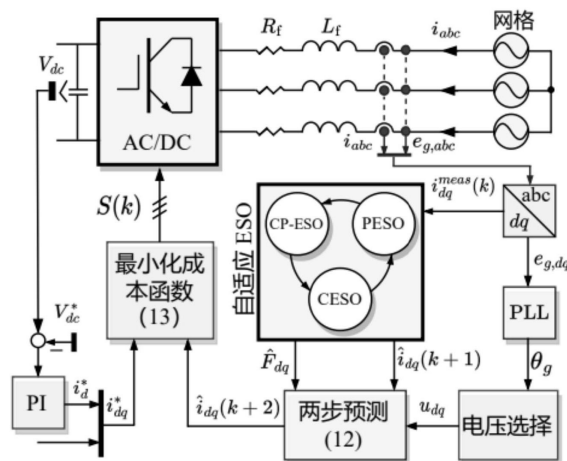
权利要求书3页 说明书10页 附图3页

(54) 发明名称

基于结构自适应ESO的并网变流器预测控制  
方法及系统

(57) 摘要

本发明公开了一种基于结构自适应ESO的并  
网变流器预测控制方法及系统,包括:获取电  
网电流和电网电压数据,并转换至dq坐标系  
下;基于dq坐标系下的电压计算选择电压矢  
量;根据dq坐标系下的电流,自适应输入至  
并联ESO、串联ESO或混合串联-并联ESO  
中,得到当前电流预测值和估计的总扰动;  
基于当前电流预测值、估计的总扰动和选择  
电压矢量,进行两步电网电流预测;基于两  
步电网电流预测结果,以最小化成本函数作  
为控制目标,得到最优的电压矢量,进行并  
网变流器的开关控制。本发明通过结构自  
适应状态观测器,能够在所有操作条件下保  
证出色的抗干扰和噪声抑制,最小化瞬态期  
间的过冲和纹波,同时抑制由带宽限制或外  
部干扰引起的振荡。



1. 一种基于结构自适应ESO的并网变流器预测控制方法,其特征在于,包括:

获取电网电流和电网电压数据,并转换至dq坐标系下;

基于dq坐标系下的电压计算选择电压矢量;

根据dq坐标系下的电流,自适应输入至并联ESO、串联ESO或混合串联-并联ESO中,得到当前电流预测值和估计的总扰动;

基于当前电流预测值、估计的总扰动和选择电压矢量,进行两步电网电流预测;

基于两步电网电流预测结果,以最小化成本函数作为控制目标,得到最优的电压矢量,进行并网变流器的开关控制;

其中,根据dq坐标系下的电流,自适应输入至并联ESO、串联ESO或混合串联-并联ESO中,得到当前电流预测值和估计的总扰动,具体方法为:

判断dq坐标系下的d轴电流分量是否为启动电流或扰动电流;

如果是,则首先根据dq坐标系下的电流,利用并联ESO进行当前电流预测值和估计的总扰动的预测;1/2个周期后,利用设定的第一宽带的混合串联-并联ESO进行当前电流预测值和估计的总扰动的预测;再1/2个周期后,利用设定的第二宽带的混合串联-并联ESO进行当前电流预测值和估计的总扰动的预测;再1/2个周期后,利用串联ESO进行当前电流预测值和估计的总扰动的预测;设定延迟数个周期后,返回重新获取dq坐标系下的d轴电流分量;

如果否,则首先根据dq坐标系下的电流,直接利用串联ESO进行当前电流预测值和估计的总扰动的预测;

基于当前电流预测值、估计的总扰动和选择电压矢量,进行两步电网电流预测;具体为:

当前电流预测值为自适应输入至并联ESO、串联ESO或混合串联-并联ESO后得到的结果,即第一步预测得到的结果;

第二步电流预测结果如下:

$$\hat{i}_{dq}(k+2) = \hat{i}_{dq}(k+1) + T_s \left[ \sum_{j=1}^3 \hat{F}_j(k+1) + \alpha u(k) \right]$$

其中,k是采样时刻, $T_s$ 是采样时间, $\hat{i}_{dq}(k+1)$ 为第一步预测得到的结果,是下一次采样(k+1)时刻电网电流的预测估计值, $\alpha$ 是恒定控制输入增益, $u(k)$ 是开关状态 $S_{abc}(k)$ 引起的转换器电压; $\hat{F}_j(k+1)$ 表示第j个子频率水平 $\omega_{0j}$ 的第一步扰动预测值,其中, $j \in [1, 2, 3]$ ;

以最小化成本函数作为控制目标,得到最优的电压矢量,所述成本函数为:

$$J = [\hat{i}_{dq}(k+2) - i_{dq}^*(k+2)]^2$$

其中, $\hat{i}_{dq}(k+2)$ 是采样(k+2)时刻的电网电流预测估计值, $i_{dq}^*(k+2)$ 为采样(k+2)时刻的电网电流参考值。

2. 如权利要求1所述的一种基于结构自适应ESO的并网变流器预测控制方法,其特征在于,判断dq坐标系下的d轴电流分量是否为启动电流或扰动电流,具体方法为:

当满足下式时,说明出现启动电流或干扰电流:

$$\Delta i_{d\_4} = \left| \int_0^{t\_4} \frac{d}{dt} i_d d\tau \right| \geq 0.01 i_{d\_max}$$

其中,  $\Delta i_{d\_4}$  为d轴电流  $i_d$  采样4次后电流的绝对变化值,  $t\_4=4/T_s$ ,  $T_s$  为采样时间,  $i_{d\_max}$  为最大d轴电网电流。

3. 如权利要求1所述的一种基于结构自适应ESO的并网变流器预测控制方法, 其特征在于, 所述混合串联-并联ESO具体为:

$$\dot{\hat{z}}_1(t) = \hat{F}_1(t) + \alpha u(t) - \gamma_{11}(\hat{z}_1(t) - y(t))$$

$$\dot{\hat{F}}_1(t) = -\gamma_{21}(\hat{z}_1(t) - y(t))$$

$$\dot{\hat{z}}_2(t) = \sum_{j=1}^2 \hat{F}_j(t) + \alpha u(t) - \gamma_{12}[\hat{z}_2(t) - \hat{z}_1(t)]$$

$$\dot{\hat{F}}_2(t) = -\gamma_{22}[\hat{z}_2(t) - \hat{z}_1(t)]$$

$$\dot{\hat{z}}_3(t) = \sum_{j=1}^3 \hat{F}_j(t) + \alpha u(t) - \gamma_{13}[\hat{z}_3(t) - \hat{z}_1(t)]$$

$$\dot{\hat{F}}_3 = -\gamma_{23}[\hat{z}_3(t) - \hat{z}_1(t)]$$

其中,  $\dot{\hat{z}}_j(t)$  是关于  $\hat{z}_j(t)$  时间的一阶导数,  $\hat{z}_j(t)$  是估计当前电流预测  $\hat{i}_{dq,j}(t)$  的ESO状态变量,  $y(t)$  是测量的噪声输出信号,  $\{\gamma_{1j}, \gamma_{2j}\}$  是ESO<sub>j</sub>的扩展状态观测器增益, 其中,  $j \in [1, 2, 3]$ ;  $\omega_0$  = ESO系统的总带宽,  $\alpha$  是恒定控制输入增益;  $u(t)$  是控制器输入。

4. 如权利要求1所述的一种基于结构自适应ESO的并网变流器预测控制方法, 其特征在于, 将三相两电平并网变流器的每一个开关状态电压在成本函数进行评估, 应用成本函数最小值的电压  $u_{dq}$  对应的开关状态, 作为并网变流器的开关状态  $S_{abc}$ 。

5. 一种基于结构自适应ESO的并网变流器预测控制系统, 其特征在于, 包括:

数据获取模块, 用于获取电网电流和电网电压数据, 并转换至dq坐标系下;

电压矢量选择模块, 用于基于dq坐标系下的电压计算选择电压矢量;

自适应状态观测模块, 用于根据dq坐标系下的电流, 自适应输入至并联ESO、串联ESO或混合串联-并联ESO中, 得到当前电流预测值和估计的总扰动;

两步预测模块, 基于当前电流预测值、估计的总扰动和选择电压矢量, 进行两步电网电流预测;

并网变流器控制模块, 基于两步电网电流预测结果, 以最小化成本函数作为控制目标, 得到最优的电压矢量, 进行并网变流器的开关控制;

其中, 根据dq坐标系下的电流, 自适应输入至并联ESO、串联ESO或混合串联-并联ESO中, 得到当前电流预测值和估计的总扰动, 具体方法为:

判断dq坐标系下的d轴电流分量是否为启动电流或扰动电流;

如果是, 则首先根据dq坐标系下的电流, 利用并联ESO进行当前电流预测值和估计的总

扰动的预测;1/2个周期后,利用设定的第一宽带的混合串联-并联ESO进行当前电流预测值和估计的总扰动的预测;再1/2个周期后,利用设定的第二宽带的混合串联-并联ESO进行当前电流预测值和估计的总扰动的预测;再1/2个周期后,利用串联ESO进行当前电流预测值和估计的总扰动的预测;设定延迟数个周期后,返回重新获取dq坐标系下的d轴电流分量;

如果否,则首先根据dq坐标系下的电流,直接利用串联ESO进行当前电流预测值和估计的总扰动的预测;

基于当前电流预测值、估计的总扰动和选择电压矢量,进行两步电网电流预测;具体为:

当前电流预测值为自适应输入至并联ESO、串联ESO或混合串联-并联ESO后得到的结果,即第一步预测得到的结果;

第二步电流预测结果如下:

$$\hat{i}_{dq}(k+2) = \hat{i}_{dq}(k+1) + T_s \left[ \sum_{j=1}^3 \hat{F}_j(k+1) + \alpha u(k) \right]$$

其中, $k$ 是采样时刻, $T_s$ 是采样时间, $\hat{i}_{dq}(k+1)$ 为第一步预测得到的结果,是下一次采样( $k+1$ )时刻电网电流的预测估计值, $\alpha$ 是恒定控制输入增益, $u(k)$ 是开关状态 $S_{abc}(k)$ 引起的转换器电压; $\hat{F}_j(k+1)$ 表示第 $j$ 个子频率水平 $\omega_{0j}$ 的第一步扰动预测值,其中, $k \in [1, 2, 3]$ ;

以最小化成本函数作为控制目标,得到最优的电压矢量,所述成本函数为:

$$J = [\hat{i}_{dq}(k+2) - i_{dq}^*(k+2)]^2$$

其中, $\hat{i}_{dq}(k+2)$ 是采样( $k+2$ )时刻的电网电流预测估计值, $i_{dq}^*(k+2)$ 为采样( $k+2$ )时刻的电网电流参考值。

6. 一种终端设备,其包括处理器和存储器,处理器用于实现各指令;存储器用于存储多条指令,其特征在于,所述指令适于由处理器加载并执行权利要求1-4任一项所述的基于结构自适应ESO的并网变流器预测控制方法。

7. 一种计算机可读存储介质,其中存储有多条指令,其特征在于,所述指令适于由终端设备的处理器加载并执行权利要求1-4任一项所述的基于结构自适应ESO的并网变流器预测控制方法。

## 基于结构自适应ESO的并网变流器预测控制方法及系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及并网变流器控制技术领域,尤其涉及一种基于结构自适应ESO的并网变流器预测控制方法及系统。

### 背景技术

[0002] 本部分的陈述仅仅是提供了与本发明相关的背景技术信息,不必然构成在先技术。

[0003] 模型预测控制(MPC)是一种基于优化的控制技术。它利用动态模型来预测系统状态和输出的未来演变。并网变流器的控制目标是用电网电流优化变量制定的。在每个时间步,优化问题在预测范围内得到解决。找到了可以优化问题的最终转换器控制输入序列。最后,只有序列的第一个输入应用于系统。MPC的一个主要挑战是当模型不确定性发生时其动态性能会降低。因此,无需显式使用模型参数的无模型预测控制对于克服这一挑战是必要的。

[0004] 并网变流器的无模型预测控制中,传统扩展状态观测器在特定带宽下运行。在带宽频率下计算的高增益用于估计电网电流和总干扰。

[0005] 对于并网变流器的无模型预测控制,扩展状态观测器(ESO)需要两个重要特性:1)高干扰抑制,以及2)对高频测量噪声的良好抑制。

[0006] 然而,传统的ESO一次只具有其中一种品质,提高ESO的干扰抑制的现有解决方案通常会导致较差的噪声抑制,而改善ESO噪声抑制的解决方案通常会导致更差的干扰抑制。此外,当突然的外部干扰发生时,具有良好的基于传感器的测量输出的噪声抑制能力的传统扩展状态观测器具有高启动瞬态峰值,当系统带宽较低时,它们也会出现不理想的瞬态振荡。

### 发明内容

[0007] 为了解决上述问题,本发明提出了一种基于结构自适应ESO的并网变流器预测控制方法及系统,通过自适应地改变扩展状态观测器的结构以适应实时条件,同时在设备实时运行期间确保观测器结构的平稳过渡。

[0008] 在一些实施方式中,采用如下技术方案:

[0009] 一种基于结构自适应ESO的并网变流器预测控制方法,包括:

[0010] 获取电网电流和电网电压数据,并转换至dq坐标系下;

[0011] 基于dq坐标系下的电压计算选择电压矢量;

[0012] 根据dq坐标系下的电流,自适应输入至并联ESO、串联ESO或混合串联-并联ESO中,得到当前电流预测值和估计的总扰动;

[0013] 基于当前电流预测值、估计的总扰动和选择电压矢量,进行两步电网电流预测;

[0014] 基于两步电网电流预测结果,以最小化成本函数作为控制目标,得到最优的电压矢量,进行并网变流器的开关控制。

[0015] 作为进一步地实施方式,根据dq坐标系下的电流,自适应输入至并联ESO、串联ESO或混合串联-并联ESO中,得到当前电流预测值和估计的总扰动,具体方法为:

[0016] 判断dq坐标系下的d轴电流分量是否为启动电流或扰动电流;

[0017] 如果是,则首先根据dq坐标系下的电流,利用并联ESO进行当前电流预测值和估计的总扰动的预测;1/2个周期后,利用设定的第一宽带的混合串联-并联ESO进行当前电流预测值和估计的总扰动的预测;1/2个周期后,利用设定的第二宽带的混合串联-并联ESO进行当前电流预测值和估计的总扰动的预测;1/2个周期后,利用串联ESO进行当前电流预测值和估计的总扰动的预测;设定个周期后,返回重新获取dq坐标系下的d轴电流分量;

[0018] 如果否,则首先根据dq坐标系下的电流,直接利用串联ESO进行当前电流预测值和估计的总扰动的预测。

[0019] 作为进一步地实施方式,判断dq坐标系下的d轴电流分量是否为启动电流或扰动电流,具体方法为:

[0020] 当满足下式时,说明出现启动电流或干扰电流:

$$[0021] \quad \Delta i_{d_4} = \left| \int_0^{t_4} \frac{d}{dt} i_d d\tau \right| \geq 0.01 i_{d\_max}$$

[0022] 其中,  $\Delta i_{d_4}$  为d轴电流  $i_d$  采样4次后电流的绝对变化,  $t_4 = 4/T_s$ ,  $T_s$  为采样时间,  $i_{d\_max}$  为最大d轴电网电流。

[0023] 作为进一步地实施方式,所述混合串联-并联ESO具体为:

$$[0024] \quad \dot{\hat{z}}_1(t) = \hat{F}_1(t) + \alpha u(t) - \gamma_{11}(\hat{z}_1(t) - y(t))$$

$$[0025] \quad \dot{\hat{F}}_1(t) = -\gamma_{21}(\hat{z}_1(t) - y(t))$$

$$[0026] \quad \dot{\hat{z}}_2(t) = \sum_{j=1}^2 \hat{F}_j(t) + \alpha u(t) - \gamma_{12}[\hat{z}_2(t) - \hat{z}_1(t)]$$

$$[0027] \quad \dot{\hat{F}}_2(t) = -\gamma_{22}[\hat{z}_2(t) - \hat{z}_1(t)]$$

$$[0028] \quad \dot{\hat{z}}_3(t) = \sum_{j=1}^3 \hat{F}_j(t) + \alpha u(t) - \gamma_{13}[\hat{z}_3(t) - \hat{z}_1(t)]$$

$$[0029] \quad \dot{\hat{F}}_3 = -\gamma_{23}[\hat{z}_3(t) - \hat{z}_1(t)]$$

[0030] 其中,  $\dot{\hat{z}}_j(t)$  是关于  $\hat{z}_j(t)$  时间的一阶导数,  $\hat{z}_j(t)$  是估计当前电流预测  $\hat{i}_{dq,j}(t)$  的ESO状态变量,  $y(t)$  是测量的噪声输出信号,  $\{\gamma_{1j}, \gamma_{2j}\} \forall j \in [1,2,3]$  是ESO<sub>j</sub>的扩展状态观测器增益,  $\omega_0$  = ESO系统的总带宽,是恒定控制输入增益;  $u(t)$  是控制器输入。

[0031] 作为进一步地实施方式,基于当前电流预测值、估计的总扰动和选择电压矢量,进行两步电网电流预测;具体为:

[0032] 当前电流预测值为自适应输入至并联ESO、串联ESO或混合串联-并联ESO后得到的结果,即第一步预测得到的结果;

[0033] 第二步电流预测结果如下：

$$[0034] \quad \hat{i}_{dq}(k+2) = \hat{i}_{dq}(k+1) + T_s \left[ \sum_{j=1}^3 \hat{F}_j(k+1) + \alpha u(k) \right]$$

[0035] 其中,  $k$  是采样时刻,  $T_s$  是采样时间,  $\hat{i}_{dq}(k+1)$  为第一步预测得到的结果, 是下一次采样 ( $k+1$ ) 时刻电网电流的预测估计值,  $\alpha$  是恒定控制输入增益,  $u(k)$  是开关状态  $S_{abc}(k)$  引起的转换器电压;  $\hat{F}_j(k+1)$  是第  $j$  个子频率水平  $\omega_{0j}$  的第一步扰动预测值。

[0036] 作为进一步地实施方式, 以最小化成本函数作为控制目标, 得到最优的电压矢量, 所述成本函数为:

$$[0037] \quad J = [\hat{i}_{dq}(k+2) - i_{dq}^*(k+2)]^2$$

[0038] 其中,  $\hat{i}_{dq}(k+2)$  是采样 ( $k+2$ ) 时刻的电网电流预测估计值,  $i_{dq}^*(k+2)$  为采样 ( $k+2$ ) 时刻的电网电流参考值。

[0039] 作为进一步地实施方式, 将三相两电平并网变流器的每一个开关状态电压在成本函数进行评估, 应用成本函数最小值的电压  $u_{dq}$  对应的开关状态, 作为并网变流器的开关状态  $S_{abc}$ 。

[0040] 在另一些实施方式, 采用如下技术方案:

[0041] 一种基于结构自适应ESO的并网变流器预测控制系统, 包括:

[0042] 数据获取模块, 用于获取电网电流和电网电压数据, 并转换至dq坐标系下;

[0043] 电压矢量选择模块, 用于基于dq坐标系下的电压计算选择电压矢量;

[0044] 自适应状态观测模块, 用于根据dq坐标系下的电流, 自适应输入至并联ESO、串联ESO或混合串联-并联ESO中, 得到当前电流预测值和估计的总扰动;

[0045] 两步预测模块, 基于当前电流预测值、估计的总扰动和选择电压矢量, 进行两步电网电流预测;

[0046] 并网变流器控制模块, 基于两步电网电流预测结果, 以最小化成本函数作为控制目标, 得到最优的电压矢量, 进行并网变流器的开关控制。

[0047] 在另一些实施方式, 采用如下技术方案:

[0048] 一种终端设备, 其包括处理器和存储器, 处理器用于实现各指令; 存储器用于存储多条指令, 所述指令适于由处理器加载并执行上述的基于结构自适应ESO的并网变流器预测控制方法。

[0049] 在另一些实施方式, 采用如下技术方案:

[0050] 一种计算机可读存储介质, 其中存储有多条指令, 所述指令适于由终端设备的处理器加载并执行上述的基于结构自适应ESO的并网变流器预测控制方法。

[0051] 与现有技术相比, 本发明的有益效果是:

[0052] (1) 本发明通过结构自适应状态观测器, 能够在所有操作条件下保证出色的抗干扰和噪声抑制, 最小化瞬态期间的过冲和纹波, 保护设备免受过高启动电流的影响, 同时抑制由带宽限制或外部干扰引起的振荡; 本发明的结构自适应状态观测器能够自适应修改以适应时变控制目标。

[0053] 本发明的其他特征和附加方面的优点将在下面的描述中部分给出,部分将从下面的描述中变得明显,或通过本方面的实践了解到。

### 附图说明

[0054] 图1为本发明实施例中的三相并网变流器结构示意图;

[0055] 图2(a) - (c)分别为本发明实施例中的并联、串联和混合串联-并联扩展状态观测器示意图;

[0056] 图3为本发明实施例中的自适应ESO结构过渡流程图;

[0057] 图4为本发明实施例中的基于结构自适应ESO的并网变流器预测控制方法示意图;

[0058] 图5为本实施例自适应ESO观测器与CESO观测器在功率转换器启动期间的比较性能。

### 具体实施方式

[0059] 应该指出,以下详细说明都是例示性的,旨在对本申请提供进一步的说明。除非另有指明,本发明使用的所有技术和科学术语具有与本申请所属技术领域的普通技术人员通常理解相同含义。

[0060] 需要注意的是,这里所使用的术语仅是为了描述具体实施方式,而非意图限制根据本申请的示例性实施方式。如在这里所使用的,除非上下文另外明确指出,否则单数形式也意图包括复数形式,此外,还应当理解的是,当在本说明书中使用术语“包含”和/或“包括”时,其指明存在特征、步骤、操作、器件、组件和/或它们的组合。

[0061] 实施例一

[0062] 在一个或多个实施方式中,公开了一种基于结构自适应ESO的并网变流器预测控制方法,结合图4,具体包括如下过程:

[0063] (1) 获取电网电流和电网电压数据,并转换至dq坐标系下;

[0064] 图1给出了三相并网变流器的结构示意图,并网功率变换器原理图有如下动态模型:

$$[0065] \quad L \frac{di_{abc}}{dt} = Ri_{abc} - e_{gabc} + u_{abc} \quad (1)$$

[0066] 式中, $i_{abc}$ 为电网电流, $e_{gabc}$ 为电网电压; $u_{abc} = (S_{abc})$ 表示功率转换器的输出电压,是开关状态 $S_{abc}$ 的函数; $L$ 代表滤波器电感, $R$ 代表滤波器电阻。

[0067] 式(1)可以转化为:

$$[0068] \quad \frac{di_{abc}}{dt} = F(t) + \alpha u_{abc}(t) \quad (2)$$

[0069] 其中, $u_{abc}$ 是转换器控制输入, $\alpha = \frac{1}{L}$ 是恒定控制输入增益,

$$[0070] \quad F = \frac{R}{L} (i_{abc} - e_{gabc})。$$

[0071] 本实施例中,获取电网电流 $i_{abc}$ 和电网电压 $e_{g,abc}$ 数据,并转换至dq坐标系下,得到dq坐标系下的电流 $i_{dq}^{meas}$ 和电压 $e_{dq}$ 。



[0072] (2) 基于dq坐标系下的电压,使用锁相环(PLL)模块计算电网电压角。应用电网电压相位角来选择电压矢量 $u_{dq}$ 。

[0073] (3) 根据dq坐标系下的电流,自适应输入至并联ESO、串联ESO或混合串联-并联ESO中,得到当前电流预测值 $\hat{i}_{dq}(k+1)$ 和估计的总扰动 $\hat{F}_{dq}$ ;

[0074] 本实施例中,总干扰F自适应的使用以下三个扩展状态观测器进行估计:并联ESO(PESO)、串联ESO(CESO)和混合串联-并联ESO(CP-ESO)。

[0075] 下面分别对三种扩展状态观测器进行说明:

[0076] (3-1) 并联ESO(PESO)

[0077] 如图2(a)所示,PESO在时域中描述为:

$$[0078] \quad \begin{cases} \dot{\hat{z}}_j(t) = \hat{F}_j(t) + \alpha u(t) - \gamma_{1j}[\hat{z}_j(t) - y(t)] \\ \dot{\hat{F}}_j(t) = -\gamma_{2j}[\hat{z}_j(t) - y(t)] \end{cases} \quad (3)$$

[0079] 其中, $\hat{z}_j(t) \rightarrow \hat{i}_{dq,j}(t)$ 是估计状态, $y(t) \rightarrow i_{dq}^{meas}(t)$ 是测量的噪声输出信号, $\{\gamma_{1j}, \gamma_{2j}\} \forall j \in [1,2,3]$ 是ESO<sub>j</sub>的观测器增益。观测器增益进一步定义为: $\gamma_{11} = 2\omega_{01}$ ,  $\gamma_{21} = \omega_{01}^2$ ,  $\gamma_{12} = 2\omega_{02}$ ,  $\gamma_{22} = \omega_{02}^2$ ,  $\gamma_{13} = 2\omega_{03}$ ,  $\gamma_{23} = \omega_{03}^2$ ;  $\omega_{01} = \frac{\omega_0}{M^2}$ ,  $\omega_{02} = \frac{\omega_0}{M}$ ,  $\omega_{03} = \omega_0$ ;  $\omega_0$ 为ESO系统的总带宽。

[0080] 需要注意的是, $z_j: j \in \{1,2,3\}$ 是估计当前 $\hat{i}_{dq,j}$ 的ESO状态变量。

[0081] 另外,三个子频率满足: $\omega_{01} < \omega_{02} < \omega_{03} = \omega_0$ 。

[0082] PESO在数字信号处理器(或微控制器)上实现为:

$$[0083] \quad \begin{cases} [\hat{z}_j(k+1) = [\hat{z}_j(k) + T_s[\hat{F}_j(k) + \alpha u(k)] - T_s\gamma_{1j}[\hat{z}_j(k) - y(k)]] \\ \hat{F}_j(k+1) = -T_s\gamma_{2j}[\hat{z}_j(k) - y(k)] \end{cases} \quad (4)$$

[0084] 其中, $k$ 是离散瞬间, $T_s$ 是采样时间, $\hat{z}_j(tk) \rightarrow \hat{i}_{dq,j}(k)$ 是估计状态, $y(k) \rightarrow i_{dq}^{meas}(k)$ 是测量的噪声输出信号,所有其他变量如前所述。

[0085] 对应的第一步电流预测:

$$[0086] \quad \hat{i}_{dq}(k+1) = \hat{i}_{dq}(k) + T_s[\sum_{j=1}^3 \hat{F}_j(k) + \alpha u(k)] - T_s(\gamma_{11} + \gamma_{12} + \gamma_{13})[\hat{i}_{dq}(k) - i_{dq}(k)] \quad (5)$$

[0087] (3-2) 串联ESO(CESO)

[0088] 如图2(b)所示,CESO在时域中描述为:

$$[0089] \quad \begin{cases} \dot{\hat{z}}_1(t) = \hat{F}_1(t) + \alpha u(t) - \gamma_{11}[\hat{z}_1(t) - y(t)] \\ \dot{\hat{F}}_1(t) = -\gamma_{21}[\hat{z}_1(t) - y(t)] \\ \dot{\hat{z}}_j(t) = \sum_1^j \hat{F}_j(t) + \alpha u(t) - \gamma_{1j}[\hat{z}_j(t) - \hat{z}_{j-1}(t)] \quad \forall j \in \{2,3\} \\ \dot{\hat{F}}_j(t) = -\gamma_{2j}[\hat{z}_j(t) - \hat{z}_{j-1}(t)] \end{cases} \quad (6)$$

[0090] 其中,  $\hat{z}_j(t)$  是估计当前电流预测  $\hat{i}_{dq,j}(t)$  的ESO状态变量,  $\dot{\hat{z}}_j(t)$  是关于  $\hat{z}_j(t)$  时间的一阶导数,  $u(t)$  是控制器输入。  $y(t) \rightarrow i_{dq}^{meas}(t)$  是测量的噪声输出信号,  $\gamma_{1j}, \gamma_{2j} \forall j \in [1,2,3]$  是ESO<sub>j</sub> 的观测器增益。

[0091] 观测器增益进一步定义为  $\gamma_{11} = 2\omega_{01}, \gamma_{21} = \omega_{01}^2, \gamma_{12} = 2\omega_{02}, \gamma_{22} = \omega_{02}^2, \gamma_{13} = 2\omega_{03}, \gamma_{23} = \omega_{03}^2$ ;  $\omega_{01} = \frac{\omega_0}{M^2}, \omega_{02} = \frac{\omega_0}{M}, \omega_{03} = \omega_0$ ;  $\omega_0$  为ESO系统的总带宽。

[0092] 需要注意的是,  $z_j: j \in \{1,2,3\}$  是估计当前  $\hat{i}_{dq,j}$  的ESO状态变量。

[0093] 另外, 三个子频率满足:  $\omega_{01} < \omega_{02} < \omega_{03} = \omega_0$ 。

[0094] CESO在数字信号处理器(或微控制器)上实现为:

$$\begin{aligned}
 \hat{z}_1(k+1) &= \hat{F}_1(k) + \alpha u(k) - \gamma_{11}[\hat{z}_1(k) - y(k)] \\
 \hat{F}_1(k+1) &= -\gamma_{21}[\hat{z}_1(k) - y(k)] \\
 \hat{z}_j(k+1) &= \sum_{j=1}^j \hat{F}_j(k) + \alpha u(k) - \gamma_{1j}[\hat{z}_j(k) - \hat{z}_{j-1}(k)] \quad \forall j \in \{2,3\} \\
 \hat{F}_j(k+1) &= -T_s \gamma_{2j}[\hat{z}_j(k) - \hat{z}_{j-1}(k)]
 \end{aligned} \tag{7}$$

[0096] 其中,  $k$  是离散瞬间,  $T_s$  是采样时间,  $\hat{z}_j(t)$  是估计当前电流预测  $\hat{i}_{dq,j}(t)$  的ESO状态变量,  $y(k) \rightarrow i_{dq}^{meas}(k)$  是测量的噪声输出信号, 所有其他变量如前所述。  $\hat{F}_j(k+1)$  是第  $j$  个子频率水平  $\omega_{0j}$  的第一步扰动预测值。

[0097] 对应的第一步电流预测为:

$$\hat{i}_{dq}(k+1) = \hat{i}_{dq}(k) + T_s [\sum_{j=1}^3 \hat{F}_j(k) + \alpha u(k)] - T_s \gamma_{13} [\hat{i}_{dq,3}(k) - \hat{i}_{dq,2}(k)] \tag{8}$$

[0099] (3-3) 级联并行ESO (CP-ESO)

[0100] 如图2(c)所示, CP-ESO在时域中描述为:

$$\left\{ \begin{aligned}
 \dot{\hat{z}}_1(t) &= \hat{F}_1(t) + \alpha u(t) - \gamma_{11}(\hat{z}_1(t) - y(t)) \\
 \dot{\hat{F}}_1(t) &= -\gamma_{21}(\hat{z}_1(t) - y(t)) \\
 \dot{\hat{z}}_2(t) &= \sum_{j=1}^2 \hat{F}_j(t) + \alpha u(t) - \gamma_{12}[\hat{z}_2(t) - \hat{z}_1(t)] \\
 \dot{\hat{F}}_2(t) &= -\gamma_{22}[\hat{z}_2(t) - \hat{z}_1(t)] \\
 \dot{\hat{z}}_3(t) &= \sum_{j=1}^3 \hat{F}_j(t) + \alpha u(t) - \gamma_{13}[\hat{z}_3(t) - \hat{z}_1(t)] \\
 \dot{\hat{F}}_3(t) &= -\gamma_{23}[\hat{z}_3(t) - \hat{z}_1(t)]
 \end{aligned} \right. \tag{9}$$

[0102] 其中,  $\hat{z}_j(t)$  是估计当前电流预测  $\hat{i}_{dq,j}(t)$  的ESO状态变量,  $y(t)$  是测量的噪声输出信号,  $\gamma_{1j}, \gamma_{2j} \forall j \in [1,2,3]$  是ESO<sub>j</sub> 的观测器增益。观测器增益进一步定义为:

$$\gamma_{11} = 2\omega_{01}, \gamma_{21} = \omega_{01}^2, \gamma_{12} = 2\omega_{02}, \gamma_{22} = \omega_{02}^2, \gamma_{13} = 2\omega_{03}, \gamma_{23} =$$

$\omega_{03}^2$ ;  $\omega_{01} = \frac{\omega_0}{M^2}$ ,  $\omega_{02} = \frac{\omega_0}{M}$ ,  $\omega_{03} = \omega_0$ ;  $\omega_0$ 为ESO系统的总带宽。

[0104] 需要注意的是,  $z_j$ ;  $j \in \{1, 2, 3\}$  是估计当前  $\hat{i}_{dq,j}$  的ESO状态变量。

[0105] 另外, 三个子频率满足:  $\omega_{01} < \omega_{02} < \omega_{03} = \omega_0$ 。

[0106] CP-ESO在数字信号处理器(或微控制器)上实现为:

$$[0107] \quad \begin{cases} \hat{z}_1(k+1) = \hat{z}_1(k) + T_s \{ \hat{F}_1(k) + \alpha u(k) - \gamma_{11}(\hat{z}_1(k) - y(k)) \} \\ \hat{F}_1(k+1) = \hat{F}_1(k) - T_s \gamma_{21}(\hat{z}_1(k) - y(k)) \\ \hat{z}_2(k+1) = \hat{z}_2(k) + T_s \sum_{j=1}^2 \hat{F}_j(k) + T_s \alpha u(k) - T_s \gamma_{12}[\hat{z}_2(k) - \hat{z}_1(k)] \\ \hat{F}_2(k+1) = \hat{F}_2(k) - T_s \gamma_{22}[\hat{z}_2(k) - \hat{z}_1(k)] \\ \hat{z}_3(k+1) = \hat{z}_3(k) + T_s \sum_{j=1}^3 \hat{F}_j(k) + T_s \alpha u(k) - T_s \gamma_{13}[\hat{z}_3(k) - \hat{z}_1(k)] \\ \hat{F}_3(k+1) = \hat{F}_3(k) - T_s \gamma_{23}[\hat{z}_3(k) - \hat{z}_1(k)] \end{cases} \quad (10)$$

[0108] 其中,  $k$  是离散瞬间,  $T_s$  是采样时间,  $\hat{z}_j(tk) \rightarrow \hat{i}_{dq,j}(k)$  是估计状态,  $y(k) \rightarrow i_{dq}^{meas}(k)$  是测量的噪声输出信号, 所有其他变量如前所述。

[0109] 对应的第一步电流预测:

$$[0110] \quad \hat{i}_{dq}(k+1) = \hat{i}_{dq}(k) + T_s [\sum_{j=1}^3 \hat{F}_j(k) + \alpha u(k)] - T_s (\gamma_{12} + \gamma_{13}) [\hat{i}_{dq,2}(k) - \hat{i}_{dq,1}(k)] \quad (11)$$

[0111] PESO具有最好的抗干扰能力。因此, 它在设备启动期间以及检测到干扰时最有用。它可以最小化瞬变期间的峰值电流。CESO具有最佳的噪声抑制特性, 将在系统稳态运行期间应用。CP-ESO将仅在从PESO到CESO的过渡期间应用。

[0112] 结合图3, 本实施例通过测量d轴电流  $i_d$ , 自适应选择观测器, 具体过程如下:

[0113] 判断dq坐标系下的d轴电流分量是否为启动电流或扰动电流;

[0114] 如果是, 则首先根据dq坐标系下的电流, 利用并联ESO进行当前电流预测值和估计的总扰动的预测; 1/2个周期后, 利用混合串联-并联ESO(带宽为  $5\omega_0$ ) 进行当前电流预测值和估计的总扰动的预测; 1/2个周期后, 利用混合串联-并联ESO(带宽为  $3\omega_0$ ) 进行当前电流预测值和估计的总扰动的预测; 1/2个周期后, 利用串联ESO进行当前电流预测值和估计的总扰动的预测; 设定个周期(比如3个周期)后, 返回重新获取dq坐标系下的d轴电流分量;

[0115] 如果否, 则首先根据dq坐标系下的电流, 直接利用串联ESO进行当前电流预测值和估计的总扰动的预测。

[0116] 本实施例中, 当下列表达式为真时, 就会出现启动电流或干扰电流:

$$[0117] \quad \Delta i_{d_4} = \left| \int_0^{t_4} \frac{d}{dt} i_d d\tau \right| \geq 0.01 i_{d\_max}$$

[0118] 其中,  $\Delta i_{d_4}$  为d轴栅极电流  $i_d$  采样4次后电流的绝对变化,  $t_4 = 4/T_s$ ;  $T_s$  为采样时间,  $i_{d\_max}$  为最大d-轴电网电流。

[0119] 对于微控制器实现, 被离散化为:

$$[0120] \quad \Delta i_{d_4} = \left| \sum_{k=1}^4 [i_d(k) - i_d(k-1)] \right| \geq 0.01 i_{d_{max}}$$

[0121] 其中,  $\Delta i_{d_4}$  为四次采样后电流的绝对变化,  $k$  为离散采样时刻,  $i_{d_{max}}$  为最大d轴电网电流。

[0122] (4) 基于当前电流预测值、估计的总扰动和选择电压矢量, 进行两步电网电流预测;

[0123] 本实施例中, 利用  $\hat{i}_{dq}(k+1)$ 、 $\hat{F}_{dq}$  和  $u_{dq}$  对等式 (6) 计算第二步电流预测  $\hat{i}_{dq}(k+2)$ 。将预测电流  $\hat{i}_{dq}(k+2)$  和使用PI控制器计算的参考电流传递到成本函数阶段。

[0124] 结合图3, 利用步骤 (3) 中得到当前时刻的第一步电流预测, 当前预测的第一步电流预测是在对ESO进行离散化后获得的 (对于PESO (5) 或CESO (8) 或CP-ESO (11))。

[0125] 当前激活的ESO (对于PESO (5) 或CESO (8) 或CP-ESO (11)) 提供  $\hat{i}_{dq}(k+1)$ ,  $\sum_{j=1}^3 \hat{F}_j(k+1)$  用于计算等式 (12) 中的第二步预测  $\hat{i}_{dq}(k+2)$ 。

[0126] 第二步电流预测如下:

$$[0127] \quad \hat{i}_{dq}(k+2) = \hat{i}_{dq}(k+1) + T_s [\sum_{j=1}^3 \hat{F}_j(k+1) + \alpha u(k)] \quad (12)$$

[0128] 其中,  $k$  是采样时刻,  $T_s$  是采样时间,  $\gamma_{12} = 2\omega_{02}$ ,  $\gamma_{13} = 2\omega_{03}$ ,  $\omega_{01} = \frac{\omega_0}{M^2}$ ,  $\omega_{02} = \frac{\omega_0}{M}$ ,  $\omega_{03} = \omega_0$ ;  $\omega_0$  是整个ESO的带宽系统,  $\hat{i}_{dq}(k+1)$  是下一次采样 ( $k+1$ ) 时刻电网电流的预测估计值,  $\hat{i}_{dq}(k)$  是当前离散样本 ( $k$ ) 的估计电流,  $T_s$  是采样时间,  $\alpha = 1/L$ ,  $u(k)$  选自表1。

[0129] 由  $i_{dq}(1)$  开关状态引起的转换器电压  $S_{abc}(k)$  是当前采样时间的测量电流,  $\hat{F}(k)$  是ESO带宽中的估计扰动。

[0130] (5) 基于两步电网电流预测结果, 以最小化成本函数作为控制目标, 得到最优的电压矢量, 进行并网变流器的开关控制。

[0131] 本实施例中, 最小化成本函数具体为:

$$[0132] \quad J = [\hat{i}_{dq}(k+2) - i_{dq}^*(k+2)]^2 \quad (13)$$

[0133] 其中,  $i_q^* = 0$ , 且  $i_d^* = i_d + (V_{dc} - V_{dc}^*) \left( k_p + \frac{k_i}{s} \right)$ ;  $k_p, k_i$  是调整后的  $V_{dc}$  PI控制器增益, 直流母线电压,  $V_{dc}^*$  是直流母线电压参考。

[0134] 对于表1中的  $n = \{0, 1, \dots, 7\}$  的值, 每个开关状态电压对于表1中的  $n = \{0, 1, \dots, 7\}$  的值, 每个开关状态电压  $u_{dq}$  在成本函数中进行评估。在这8个选项中, 应用使  $J$  最小的电压作为功率转换器的开关状态  $S_{abc}$ 。在成本函数中进行评估。在这8个选项中, 应用使  $J$  最小的电压作为功率转换器的开关状态。

[0135] 表1: 功率转换器的开关状态

$n$	$S_{abc}$	$u_{dq} = T_{park.} u_{abc}$
0	000	$0 + j0$
1	100	$\frac{V_{dc}}{3}(2 + j0)$
2	110	$\frac{V_{dc}}{3}(1 + j\sqrt{3})$
[0136] 3	010	$\frac{V_{dc}}{3}(-1 + j\sqrt{3})$
4	011	$\frac{V_{dc}}{3}(-2 + j0)$
5	001	$\frac{V_{dc}}{3}(-1 - j\sqrt{3})$
6	101	$\frac{V_{dc}}{3}(1 - j\sqrt{3})$
7	111	$0 + j0$

[0137] 图5给出了本实施例自适应ESO观测器与CESO观测器在功率转换器启动期间的比较性能。图5上面的图显示了d轴电流，可以看出，传统方法(CESO)产生的峰值d轴电流为35.55A，而本实施例方法产生的峰值电流较低，为24.55A一个。图5下面的图显示了A相电流，可以看出本实施例方法比传统方法瞬态纹波和振荡显著降低。这显示了解决方案的有效性。

[0138] 实施例二

[0139] 在一个或多个实施方式中，公开了一种基于结构自适应ESO的并网变流器预测控制系统，包括：

[0140] 数据获取模块，用于获取电网电流和电网电压数据，并转换至dq坐标系下；

[0141] 电压矢量选择模块，用于基于dq坐标系下的电压计算选择电压矢量；

[0142] 自适应状态观测模块，用于根据dq坐标系下的电流，自适应输入至并联ESO、串联ESO或混合串联-并联ESO中，得到当前电流预测值和估计的总扰动；

[0143] 两步预测模块，基于当前电流预测值、估计的总扰动和选择电压矢量，进行两步电网电流预测；

[0144] 并网变流器控制模块，基于两步电网电流预测结果，以最小化成本函数作为控制目标，得到最优的电压矢量，进行并网变流器的开关控制。

[0145] 需要说明的是，上述各模块的具体实现方式已经在实施例一中进行了详细说明，不再详述。

[0146] 实施例三

[0147] 在一个或多个实施方式中，公开了一种终端设备，包括服务器，所述服务器包括存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序，所述处理器执行所述程序时实现实施例一中的基于结构自适应ESO的并网变流器预测控制方法。为了简洁，在此不再赘述。

[0148] 应理解，本实施例中，处理器可以是中央处理单元CPU，处理器还可以是其他通用

处理器、数字信号处理器DSP、专用集成电路ASIC,现成可编程门阵列FPGA或者其他可编程逻辑器件、分立门或者晶体管逻辑器件、分立硬件组件等。通用处理器可以是微处理器或者该处理器也可以是任何常规的处理器等。

[0149] 存储器可以包括只读存储器和随机存取存储器,并向处理器提供指令和数据、存储器的一部分还可以包括非易失性随机存储器。例如,存储器还可以存储设备类型的信息。

[0150] 在实现过程中,上述方法的各步骤可以通过处理器中的硬件的集成逻辑电路或者软件形式的指令完成。

[0151] 实施例四

[0152] 在一个或多个实施方式中,公开了一种计算机可读存储介质,其中存储有多条指令,所述指令适于由终端设备的处理器加载并执行实施例一所述的基于结构自适应ESO的并网变流器预测控制方法。

[0153] 上述虽然结合附图对本发明的具体实施方式进行了描述,但并非对本发明保护范围的限制,所属领域技术人员应该明白,在本发明的技术方案的基础上,本领域技术人员不需要付出创造性劳动即可做出的各种修改或变形仍在本发明的保护范围以内。

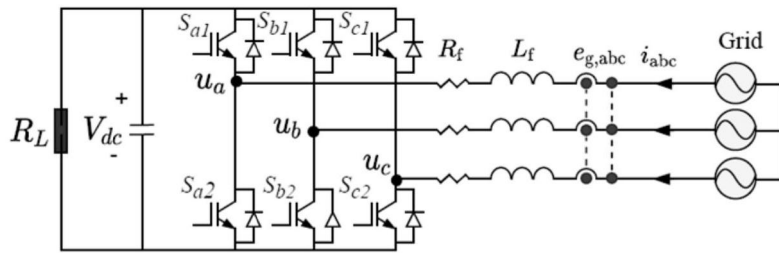


图1

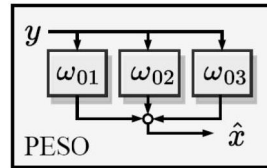


图2(a)

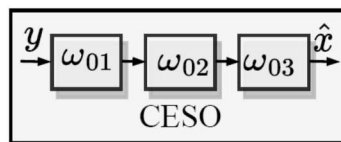


图2(b)

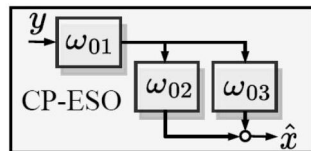


图2(c)

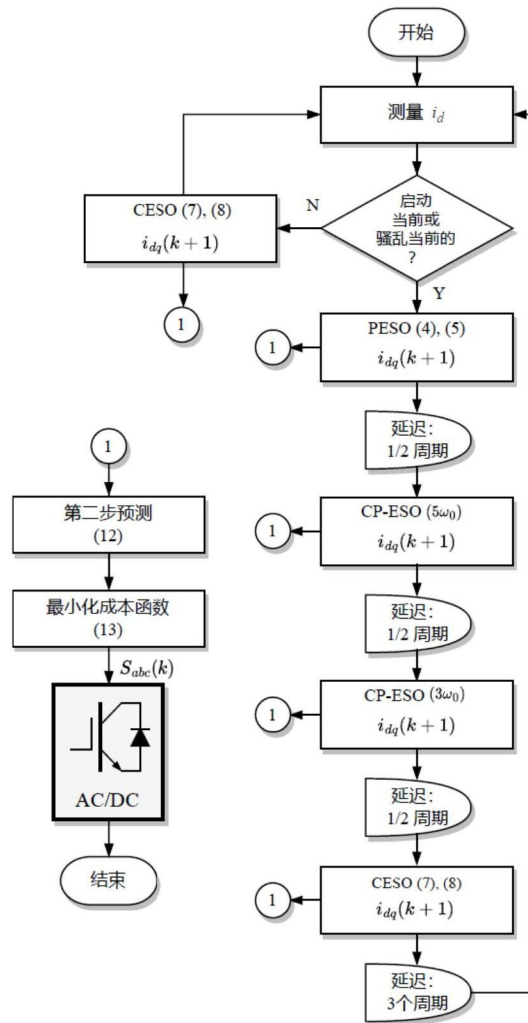


图3



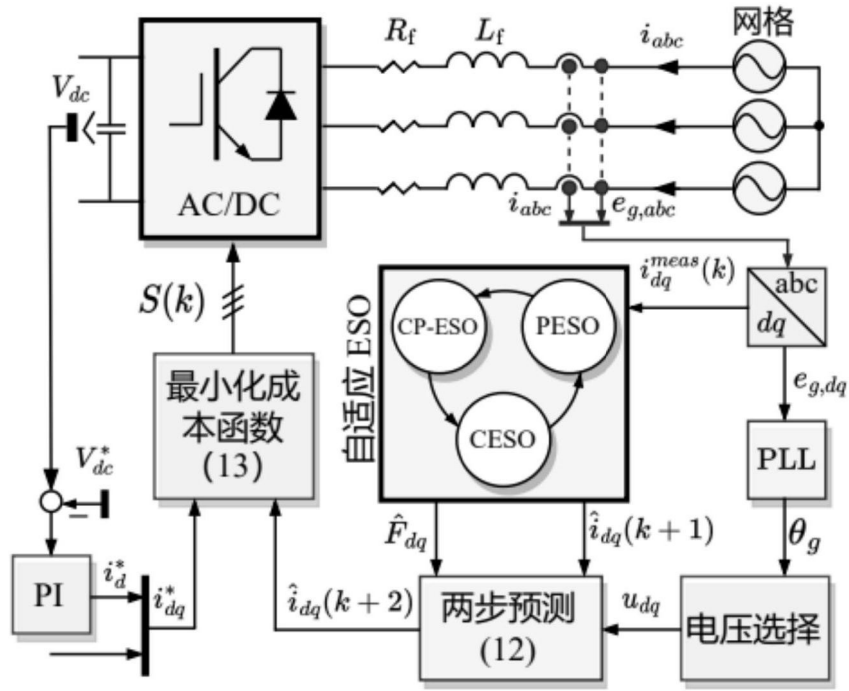


图4

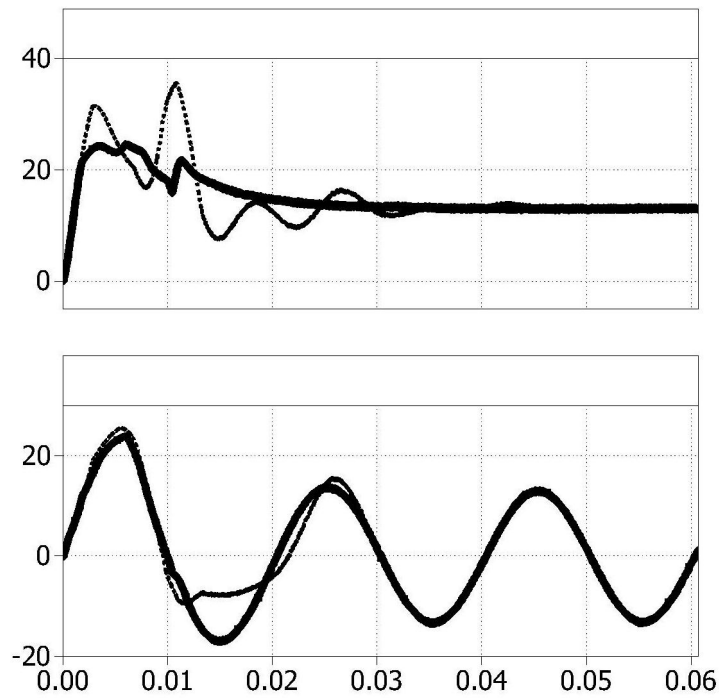


图5