



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114509945 B

(45) 授权公告日 2023. 12. 05

(21) 申请号 202210138762.2

CN 109950907 A, 2019.06.28

(22) 申请日 2022.02.15

CN 111585449 A, 2020.08.25

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 113922684 A, 2022.01.11

申请公布号 CN 114509945 A

CN 112039314 A, 2020.12.04

CN 112600431 A, 2021.04.02

(43) 申请公布日 2022.05.17

US 2020328709 A1, 2020.10.15

(73) 专利权人 山东大学

张明锐等. 基于模型预测控制的固态变压器控制策略研究.《电力系统保护与控制》.2019, 全文.

地址 250061 山东省济南市历下区经十路17923号

熊飞等. 电力电子变压器的内部能量流动协调控制策略.《电力系统自动化》.2020, 全文.

(72) 发明人 张祯滨 孔德昊 高道男 孙远翔

Dehao Kong等. Modulated Model

(74) 专利代理机构 济南圣达知识产权代理有限公司 37221

Predictive Control of Power Electronics Transformer Based on Isolated Modular Multilevel Converter. 2021 IEEE

专利代理师 闫圣娟

International Conference on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE). 2022, 全文.

(51) Int. Cl.

G05B 13/04 (2006.01)

审查员 徐莹

(56) 对比文件

CN 105048508 A, 2015.11.11

CN 107181415 A, 2017.09.19

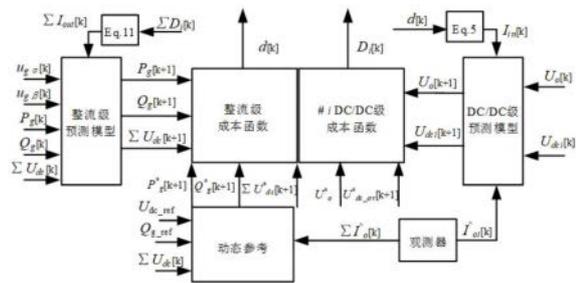
权利要求书3页 说明书8页 附图3页

(54) 发明名称

一种双级式固态变压器的动态参考预测控制方法及系统

(57) 摘要

本公开提出了一种双级式固态变压器的动态参考预测控制方法及系统,方法包括如下步骤:获取当前时刻变压器的控制目标参数数据;根据当前控制目标达到固定参考值的控制步长,设置每个控制目标的实时动态参考值的计算公式,计算获得每个控制目标参数的实时动态参考值;以变压器控制目标参数数据与对应的实时动态参考值差值最小为目标构建成本函数,根据实时动态参考值,以使得成本函数的值最小求解构建的双级式固态变压器系统模型,获得下一时刻变压器的控制参数,控制变压器的变流器。变压器的预测控制中消除了控制器外环的使用,有效地提升了固态变压器的整体动态特性,并提升了调节能力。



CN 114509945 B

1. 一种双级式固态变压器的动态参考预测控制方法,其特征在于,包括如下步骤:  
 获取当前时刻的变压器控制目标参数数据;  
 变压器的控制参数包括整流级变流器的最优调制比、DC/DC级变流器的最优移向角;  
 变压器整流级模块的控制目标参数包括:网侧有功功率、网侧无功功率以及中压直流母线电压;  
 变压器DC/DC级模块的控制目标参数包括:低压直流电压和DC/DC级模块平衡电压;  
 根据当前控制目标达到固定参考值的控制步长,设置每个控制目标的实时动态参考值的计算公式,计算获得每个控制目标参数的实时动态参考值;  
 整流级每个控制目标的实时动态参考值的计算公式,包括中压直流母线的电压参考值、变压器网侧有功功率的动态参考值和网侧无功功率的参考值的计算公式;  
 变压器网侧有功功率的动态参考值的计算中,包括当前值与固定参考值间的实时误差的修正项;  
 以变压器控制目标参数数据与对应的实时动态参考值差值最小为目标构建成本函数,根据实时动态参考值以及获取的控制目标参数数据,以使得成本函数的值最小求解构建的双级式固态变压器系统模型,获得下一时刻变压器的控制参数,控制变压器的变流器;  
 所述中压直流母线的电压参考值计算公式为:

$$\sum_{i=1}^n U_{dc}^*[k+1] = \sum_{i=1}^n U_{dc}[k] + \frac{U_{dc\_ref} - \sum_{i=1}^n U_{dc}[k]}{Ns}$$

其中, $U_{dc\_ref}$ 为中压直流母线的固定参考值, $U_{dc}^*[k+1]$ 为下一时刻的中压直流母线实时参考值; $U_{dc}[k]$ 为当前时刻的中压直流母线电压, $Ns$ 为步长,即需要多少个控制周期以达到实时动态参考值 $U_{dc}^*[k+1]$ ;

变压器网侧有功功率的动态参考值计算公式为:

$$P_g^*[k+1] = I_{dc}^*[k+1] \sum_{i=1}^n U_{dc}^*[k+1] + U_o^*[k+1] I_o^*[k] + P_{gcom}[k]$$

其中, $I_o^*$ 为观测器所观测到的DC/DC级模块负载电流 $I_{oi}$ 之和; $I_{dc}^*[k+1]$ 为满足 $\sum U_{dc}^*[k+1]$ 参考下的电容充电(放电)电流, $U_{dc}^*[k+1]$ 为下一时刻的中压直流母线实时参考值; $P_{gcom}[k]$ 为误差纠正项;

所述网侧无功功率的参考值计算公式为:

$$Q_g^*[k+1] = 3(Q_g^*[k+1] - Q_g^*[k-1]) + Q_g^*[k-2].$$

所述整流级的预测模型如下:

$$P_g[k+1] = t_1 P_g[k] - t_2 Q_g[k] + t_3 (u_{gm}^2 - u_{g\alpha}[k] u_{conv\alpha}[k] - u_{g\beta}[k] u_{conv\beta}[k])$$

$$Q_g[k+1] = t_1 Q_g[k] + t_2 P_g[k] + t_3 (u_{g\alpha}[k] u_{conv\beta}[k] - u_{g\beta}[k] u_{conv\alpha}[k])$$

$$\sum_{i=1}^n U_{dc}[k+1] = \sum_{i=1}^n U_{dc}[k] + \sum_{i=1}^n t_4 (I_{ini}[k] - I_{outi}[k])$$

其中, $t_1 = 1 - R_g T_{sc} / L_g$ ,  $t_2 = w_g T_{sc}$ ,  $t_3 = T_{sc} / L_g$ ,  $t_4 = n T_{sc} / C_1$ ,  $n$ 为整流级模块数, $T_{sc}$ 为整流

级的采样频率；

所述DC/DC级的预测模型如下：

$$U_{oi}[k+1] = U_{oi}[k] + k_2 (I_{1i}[k] - I_{oi}[k])$$

$$U_{dci}[k+1] = U_{dci}[k] + k_1 (I_{ini}[k] - I_{outi}[k])$$

其中,  $k_2 = T_{sd}/C_2$ ,  $T_{sd}$ 为DC/DC级模块的采样频率;  $k_1 = T_{sd}/C_1$ ;

所述整流级模块的成本函数如下：

$$J_{rect} = r_{Pg} (P_g^*[k+1] - P_g[k+1])^2 + r_{Qg} (Q_g^*[k+1] - Q_g[k+1])^2 + r_{dc} (\sum_{i=1}^n U_{dc}^*[k+1] - \sum_{i=1}^n U_{dc}[k+1])$$

所述DC/DC级模块的成本函数如下：

$$J_{DABi} = r_o (U_o^*[k+1] - U_o[k+1])^2 + r_{bal} (U_{dc\_av}^*[k+1] - U_{dci}[k+1])^2$$

2. 如权利要求1所述的一种双级式固态变压器的动态参考预测控制方法,其特征在于:根据变压器中各级变流器的变换关系,构建通过当前时刻参数数据预测下一时刻参数数据的双级式固态变压器的系统模型,系统模型包括整流级的预测模型和DC/DC级的预测模型。

3. 如权利要求1所述的一种双级式固态变压器的动态参考预测控制方法,其特征在于:成本函数,包括整流级模块的成本函数和DC/DC级模块的成本函数;变压器的整流级模块的成本函数为:变压器整流级模块各个控制目标参数与对应的控制目标参数参考值的差值的加权和。

4. 如权利要求3所述的一种双级式固态变压器的动态参考预测控制方法,其特征在于:变压器的DC/DC级模块的成本函数为:变压器DC/DC级模块各个控制目标参数与对应的控制目标参数参考值的差值的加权和。

5. 如权利要求1所述的一种双级式固态变压器的动态参考预测控制方法,其特征在于:中压直流母线的电压参考值为:控制中压直流母线电压靠近固定目标参考值的单步调整值与上一时刻的中压直流母线电压值之和。

6. 一种双级式固态变压器的动态参考预测控制系统,其特征在于,包括:

获取模块:被配置为用于获取当前时刻变压器的控制目标参数数据;

变压器的控制参数包括整流级变流器的最优调制比、DC/DC级变流器的最优移向角;

变压器整流级模块的控制目标参数包括:网侧有功功率、网侧无功功率以及中压直流母线电压;

变压器DC/DC级模块的控制目标参数包括:低压直流电压和DC/DC级模块平衡电压;

参考值更新模块:被配置为用于根据当前控制目标达到固定参考值的控制步长,设置每个控制目标的实时动态参考值的计算公式,计算获得每个控制目标参数的实时动态参考值;

整流级每个控制目标的实时动态参考值的计算公式,包括中压直流母线的电压参考值、变压器网侧有功功率的动态参考值和网侧无功功率的参考值的计算公式;

变压器网侧有功功率的动态参考值的计算中,包括当前值与固定参考值间的实时误差的修正项;

求解控制模块:被配置为用于以变压器控制目标参数数据与对应的实时动态参考值差值最小为目标构建成本函数,根据实时动态参考值,以使得成本函数的值最小求解构建的双级式固态变压器系统模型,获得下一时刻变压器的控制参数,控制变压器的变流器;

所述中压直流母线的电压参考值计算公式为:

$$\sum_{i=1}^n U_{dc}^*[k+1] = \sum_{i=1}^n U_{dc}[k] + \frac{U_{dc\_ref} - \sum_{i=1}^n U_{dc}[k]}{Ns}$$

其中,  $U_{dc\_ref}$  为中压直流母线的固定参考值,  $U_{dc}^*[k+1]$  为下一时刻的中压直流母线实时参考值;  $U_{dc}[k]$  为当前时刻的中压直流母线电压,  $Ns$  为步长, 即需要多少个控制周期以达到实时动态参考值  $U_{dc}^*[k+1]$ ;

变压器网侧有功功率的动态参考值计算公式为:

$$P_g^*[k+1] = I_{dc}^*[k+1] \sum_{i=1}^n U_{dc}^*[k+1] + U_o^*[k+1] I_o^*[k] + P_{gcom}[k]$$

其中,  $I_o^*$  为观测器所观测到的DC/DC级模块负载电流  $I_{oi}$  之和;  $I_{dc}^*[k+1]$  为满足  $\sum U_{dc}^*[k+1]$  参考下的电容充电(放电)电流,  $U_{dc}^*[k+1]$  为下一时刻的中压直流母线实时参考值;  $P_{gcom}[k]$  为误差纠正项;

所述网侧无功功率的参考值计算公式为:

$$Q_g^*[k+1] = 3(Q_g^*[k+1] - Q_g^*[k-1]) + Q_g^*[k-2].$$

所述整流级的预测模型如下:

$$P_g[k+1] = t_1 P_g[k] - t_2 Q_g[k] + t_3 (u_{gm}^2 - u_{g\alpha}[k] u_{conv\alpha}[k] - u_{g\beta}[k] u_{conv\beta}[k])$$

$$Q_g[k+1] = t_1 Q_g[k] + t_2 P_g[k] + t_3 (u_{g\alpha}[k] u_{conv\beta}[k] - u_{g\beta}[k] u_{conv\alpha}[k])$$

$$\sum_{i=1}^n U_{dc}[k+1] = \sum_{i=1}^n U_{dc}[k] + \sum_{i=1}^n t_4 (I_{ini}[k] - I_{outi}[k])$$

其中,  $t_1 = 1 - R_g T_{sc} / L_g$ ,  $t_2 = w_g T_{sc}$ ,  $t_3 = T_{sc} / L_g$ ,  $t_4 = n T_{sc} / C_1$ ,  $n$  为整流级模块数,  $T_{sc}$  为整流级的采样频率;

所述DC/DC级的预测模型如下:

$$U_{oi}[k+1] = U_{oi}[k] + k_2 (I_{i1}[k] - I_{oi}[k])$$

$$U_{dci}[k+1] = U_{dci}[k] + k_1 (I_{ini}[k] - I_{outi}[k])$$

其中,  $k_2 = T_{sd} / C_2$ ,  $T_{sd}$  为DC/DC级模块的采样频率;  $k_1 = T_{sd} / C_1$ ;

所述整流级模块的成本函数如下:

$$J_{rect} = r_{Pg} (P_g^*[k+1] - P_g[k+1])^2 + r_{Qg} (Q_g^*[k+1] - Q_g[k+1])^2 + r_{dc} (\sum_{i=1}^n U_{dc}^*[k+1] - \sum_{i=1}^n U_{dc}[k+1])$$

所述DC/DC级模块的成本函数如下:

$$J_{DABi} = r_o (U_o^*[k+1] - U_o[k+1])^2 + r_{bal} (U_{dc\_av}^*[k+1] - U_{dci}[k+1])^2$$

7. 一种电子设备, 其特征在于, 包括存储器和处理器以及存储在存储器上并在处理器上运行的计算机指令, 所述计算机指令被处理器运行时, 完成权利要求1-5任一项方法所述的步骤。

8. 一种计算机可读存储介质, 其特征在于, 用于存储计算机指令, 所述计算机指令被处理器执行时, 完成权利要求1-5任一项方法所述的步骤。

## 一种双级式固态变压器的动态参考预测控制方法及系统

### 技术领域

[0001] 本公开涉及变压器控制相关技术领域,具体的说,是涉及一种双级式固态变压器的动态参考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公开相关的背景技术信息,并不必然构成在先技术。

[0003] 在双级式固态变压器控制策略中,当前较为成熟的方案为基于多线性控制器(如比例积分PI控制器)的级联控制结构。即固态变压器两级各由一套级联控制系统控制:在每级变换系统中,通过外环PI控制器实时输出内环参考值,进而由内环PI控制器输出本级的调制命令;这类控制策略存在以下原理性缺陷:(1)属于“误后校正”型控制,无法保证控制目标的动态性能;(2)属于控制目标有限的优化方法,难以兼顾固态变压器多个控制目标;(3)无法灵活包含多种非线性约束(如,开关频率、散热需求等);(4)在动态特性、调节范围、调解能力方面,固态变压器的DC/DC级通常远高于其整流级,双极间无联动易导致直流母线波动甚至失稳。

[0004] 模型预测控制作为新兴的第三代控制策略,已成为固态变压器更有前景的控制方法,模型预测控制的使用有效地提升了固态变压器内环的响应速度,一定程度上解决了多线性控制器控制存在的问题。然而,模型预测控制的整流级外环仍然使用了PI作为其控制器。其控制系统的动态特性将取决于外环,使整体的动态特性无法得到大幅提升。尤其是考虑到新型配电网中频繁的双向功率流动,该问题将更加明显。固态变压器的DC/DC级面临着相同的问题。另一方面,DC/DC级需要 $n-1$ 个( $n$ 为模块个数)输入电压平衡控制环。其本质是根据模块实时输入电压与电压平均值之间的差值生成内环模型预测控制纠正项。对于模型预测控制的成本函数而言,此时的参考命令并非全局最优命令,因此所求出的解也并非全局最优解。在一定程度上限制了控制系统对低压直流母线的调节能力和输入电压的平衡能力。

[0005] 综上,应用于双级式固态变压器的传统模型预测控制的动态特性主要取决于外环,导致其动态特性较低。同时,传统模型预测控制的控制器的成本函数无法实时求解出最优解,限制了其调节能力。

### 发明内容

[0006] 本公开为了解决上述问题,提出了一种双级式固态变压器的动态参考预测控制方法及系统,变压器的预测控制中消除了控制器外环的使用,有效地提升了固态变压器的整体动态特性,并提升了调节能力。

[0007] 为了实现上述目的,本公开采用如下技术方案:

[0008] 一个或多个实施例提供了一种双级式固态变压器的动态参考预测控制方法,包括如下步骤:

- [0009] 获取当前时刻变压器的控制目标参数数据;
- [0010] 根据当前控制目标达到固定参考值的控制步长,设置每个控制目标的实时动态参考值的计算公式,计算获得每个控制目标参数的实时动态参考值;
- [0011] 以变压器控制目标参数数据与对应的实时动态参考值差值最小为目标构建成本函数,根据实时动态参考值以及获取的控制目标参数数据,以使得成本函数的值最小求解构建的双级式固态变压器系统模型,获得下一时刻变压器的控制参数,控制变压器的变流器。
- [0012] 一个或多个实施例提供了一种双级式固态变压器的动态参考预测控制系统,包括:
- [0013] 获取模块:被配置为用于获取当前时刻变压器的控制目标参数数据;
- [0014] 参考值更新模块:被配置为用于根据当前控制目标达到固定参考值的控制步长,设置每个控制目标的实时动态参考值的计算公式,计算获得每个控制目标参数的实时动态参考值;
- [0015] 求解控制模块:被配置为用于以变压器控制目标参数数据与对应的实时动态参考值差值最小为目标构建成本函数,根据实时动态参考值以及获取的控制目标参数数据,以使得成本函数的值最小求解构建的双级式固态变压器系统模型,获得下一时刻变压器的控制参数,控制变压器的变流器。
- [0016] 一种电子设备,包括存储器和处理器以及存储在存储器上并在处理器上运行的计算机指令,所述计算机指令被处理器运行时,完成上述方法所述的步骤。
- [0017] 一种计算机可读存储介质,用于存储计算机指令,所述计算机指令被处理器执行时,完成上述方法所述的步骤。
- [0018] 与现有技术相比,本公开的有益效果为:
- [0019] 本公开中去除了固态变压器各级所使用的基于PI控制器的外环,每一级仅通过一个成本函数即可控制全部控制目标,使系统带宽得到了较大提升,进而大幅提升了系统整体的响应速度。同时,DC/DC级通过该成本函数可以直接求解同时满足输入平衡和输出电压参考命令下的最优解,提高了其调节能力。
- [0020] 本公开的优点以及附加方面的优点将在下面的具体实施例中进行详细说明。

## 附图说明

- [0021] 构成本公开的一部分的说明书附图用来提供对本公开的进一步理解,本公开的示意性实施例及其说明用于解释本公开,并不构成对本公开的限定。
- [0022] 图1是本公开实施例1的双级式固态变压器图单相电路拓扑图;
- [0023] 图2(a)是本公开实施例1的变压器的整流级模块采用的两电平变流器拓扑图;
- [0024] 图2(b)是本公开实施例1的变压器的整流级模块采用的三电平变流器拓扑图;
- [0025] 图2(c)是本公开实施例1的变压器的DC/DC级模块采用的双有源桥变换器拓扑图;
- [0026] 图3是本公开实施例1的双级式固态变压器的动态参考预测控制框图;
- [0027] 图4是本公开实施例1的双级式固态变压器的动态参考预测控制方法流程图。

**具体实施方式：**

[0028] 下面结合附图与实施例对本公开作进一步说明。

[0029] 应该指出,以下详细说明都是示例性的,旨在对本公开提供进一步的说明。除非另有指明,本文使用的所有技术和科学术语具有与本公开所属技术领域的普通技术人员通常理解的含义。

[0030] 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公开的示例性实施方式。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。需要说明的是,在不冲突的情况下,本公开中的各个实施例及实施例中的特征可以相互组合。下面将结合附图对实施例进行详细描述。

[0031] 实施例1

[0032] 如图1所示,双级式固态变压器单相拓扑可以如图1所示。该变压器交流侧接入中压交流配电网,经整流级变换器形成中压直流母线,后经DC/DC级变换器形成低压直流母线。低压直流母线可接入储能、新能源,或作为低压直流电网接口。

[0033] 在一个或多个实施方式公开的技术方案中,如图1-4所示,一种双级式固态变压器的动态参考预测控制方法,包括如下步骤:

[0034] 步骤1:获取当前时刻变压器的控制目标参数数据;

[0035] 步骤2:根据变压器中各级变流器的变换关系,构建通过当前时刻参数数据预测下一时刻参数数据的双级式固态变压器的系统模型;

[0036] 步骤3:根据当前控制目标达到固定参考值的控制步长,设置每个控制目标的实时动态参考值的计算公式,计算获得每个控制目标参数的实时动态参考值;

[0037] 步骤4:以变压器控制目标参数数据与对应的实时动态参考值差值最小为目标构建成本函数,根据实时动态参考值以及获取的控制目标参数数据,求解系统模型使得成本函数的值最小,获得下一时刻变压器的整流级变流器的最优调制比、DC/DC级变流器的最优移向角,控制变压器的变流器开关管的通断。

[0038] 本实施例中,去除了固态变压器各级所使用的基于PI控制器的外环,每一级仅通过一个成本函数即可控制全部控制目标,使系统带宽得到了较大提升,进而大幅提升了系统整体的响应速度。同时,DC/DC级通过该成本函数可以直接求解同时满足输入平衡和输出电压参考命令下的最优解,提高了其调节能力。

[0039] 步骤1:变压器控制目标参数包括变压器整流级模块的控制目标参数和变压器DC/DC级模块的控制目标参数。

[0040] 变压器整流级模块的控制目标参数包括:网侧有功功率 $P_g$ 、网侧无功功率 $Q_g$ 以及中压直流母线电压 $\Sigma U_{dc}$ ;

[0041] 变压器DC/DC级模块的控制目标参数包括:低压直流电压和DC/DC级模块平衡电压;

[0042] 如图3所示为双级式固态变压器的动态参考预测控制框图。

[0043] 步骤1中,获取当前时刻的变压器控制目标参数数据,具体包括如下步骤:

[0044] 步骤11:获取传感器采样的网侧电压、电流并转换到 $\alpha\beta$ 坐标系,如图中的 $U_g[k+1]$

和 $U_{g\beta}[k+1]$ ,通过功率计算公式计算得到当前网侧有功功率 $P_g$ 、无功功率 $Q_g$ ;

[0045] 步骤12:获取传感器采样到的整流级模块电容电压 $U_{dci}$ ,各模块电压相加后得到当前中压直流母线电压值 $\Sigma U_{dc}$ 。

[0046] 步骤13:将当前中压直流母线电压值 $\Sigma U_{dc}$ 除以整流级模块数 $n$ ,以得到整流级模块平均电压 $U_{dc,av}$ ,该平均电压即为DC/DC级平衡控制的参考值。

[0047] 步骤2中,双级式固态变压器的系统模型包括整流级的预测模型和DC/DC级的预测模型,构建过程如下:

[0048] 为简化分析,本实施例中以两电平变换器为例作为整流级模块进行分析,同时仅分析固态变压器A相的系统模型,其它两相可以根据A相模型进行类推。

[0049] 图1中的双级式固态变压器单相拓扑整体为输入串联、输入并联结构,可实现功率的双向流动,即四象限运行。

[0050] 可选的,双级式固态变压器的整流级可为两电平变换器,如图2(a)所示;或者为三电平变换器,如图2(b)所示;DC/DC级可以为双有源桥变换器,如图2(c)所示。

[0051] 如图1所示,该双级式固态变压器A相包括电感器 $L_g$ ,寄生电阻 $R_g$ ;模块中压直流母线电容 $C_1$ ,低压直流母线电容 $C_2$ ;将电流从电网流入固态变压器的方向定义为正方向,记为 $i_g$ ,电网电压为 $u_g$ ,中压直流母线第 $i$ 个模块的电压为 $U_{dci}$ ,变换器端口对地点电压为 $u_{conv}$ 。

[0052] 其中,网侧功率动态模型如下:

$$[0053] \quad \frac{dP_g}{dt} = \frac{R_g}{L_g} P_g - \omega_g Q_g + \frac{1}{L_g} (u_{gm}^2 - u_{g\alpha} u_{conv\alpha} - u_{g\beta} u_{conv\beta}) \quad (1)$$

$$[0054] \quad \frac{dQ_g}{dt} = \frac{R_g}{L_g} Q_g + \omega_g P_g + \frac{1}{L_g} (u_{g\alpha} u_{conv\beta} - u_{g\beta} u_{conv\alpha}) \quad (2)$$

[0055] 其中, $P_g$ 、 $Q_g$ 分别为网侧有功、无功功率; $u_{g\alpha}$ 、 $u_{g\beta}$ 、 $u_{conv\alpha}$ 、 $u_{conv\beta}$ 分别为电网电压、变换器端口电压的实轴、虚轴分量; $u_{gm}$ 为电网电压的幅值。

[0056] 整流级模块控制目标为中压直流母线电压,因此,中压直流母线电压的动态模型如下:

$$[0057] \quad \sum_{i=1}^n \frac{dU_{dci}}{dt} = \sum_i \frac{1}{C_1} (I_{ini} - I_{outi}) \quad (3)$$

[0058] 其中, $I_{ini}$ 与 $I_{outi}$ 分别为第 $i$ 个模块输入到电容与电容输出的电流。

[0059] 变换器端口电压与每一个子模块直流电压关系如下:

$$[0060] \quad U_{conv} = d \sum_{i=1}^n U_{dci} \quad (4)$$

[0061] 其中, $d$ 为整流级的调制比。

[0062] 整流级模块的直流输出电流与网侧电流的关系如下:

$$[0063] \quad I_{in} = i_{g\alpha} d_\alpha + i_{g\beta} d_\beta \quad (5)$$

[0064] 其中, $I_{in}$ 为全部模块直流输出电流的总和( $I_{in} = \Sigma I_{ini}$ ); $d_\alpha$ 与 $d_\beta$ 分别为整流级调制比的实轴、虚轴分量。

[0065] 由于模型预测控制需要在离散空间下完成,因此通过前向欧拉公式将公式(1)-(3)进行离散,可得到交流侧系统的离散模型,即为整流级的预测模型如公式(6)-(8):

$$[0066] \quad P_g[k+1] = t_1 P_g[k] - t_2 Q_g[k] + t_3 (u_{gm}^2 - u_{g\alpha}[k] u_{conv\alpha}[k] - u_{g\beta}[k] u_{conv\beta}[k]) \quad (6)$$

$$[0067] \quad Q_g[k+1] = t_1 Q_g[k] + t_2 P_g[k] + t_3 (u_{ga}[k] u_{conv\beta}[k] - u_{g\beta}[k] u_{conv\alpha}[k]) \quad (7)$$

$$[0068] \quad \sum_{i=1}^n U_{dc}[k+1] = \sum_{i=1}^n U_{dc}[k] + \sum_{i=1}^n t_4 (I_{ini}[k] - I_{outi}[k]) \quad (8)$$

[0069] 其中,  $t_1 = 1 - R_g T_{sc} / L_g$ ,  $t_2 = w_g T_{sc}$ ,  $t_3 = T_{sc} / L_g$ ,  $t_4 = n T_{sc} / C_1$ ,  $n$ 为整流级模块数,  $T_{sc}$ 为整流级的采样频率。

[0070] DC/DC级的控制目标为使低压直流母线电压追踪其参考值和使DC/DC级模块输入电压平衡,

[0071] DC/DC级的控制目标为使低压直流母线电压追踪其参考值,即为:  $U_o = U_o^*$ ; DC/DC级的另一个目标为控制使DC/DC级模块输入电压平衡,即使每个DC/DC级模块的输入电压为所有输入电压的平均数,即为:  $U_{dc1} = U_{dc2} = \dots = U_{dci} = \sum U_{dc} / n$ 。

[0072] 低压直流母线的动态方程为:

$$[0073] \quad \frac{dU_{oi}}{dt} = (I_{1i} - I_{oi}) / C_2 \quad (9)$$

[0074] 其中,  $I_{1i}$ 为第*i*个DC/DC级模块输出电流;  $I_{oi}$ 为第*i*个DC/DC级模块的负载电流。DC/DC级模块即为DC/DC变流器。

[0075] DC/DC级模块输入电压的动态方程为:

$$[0076] \quad \frac{dU_{dci}}{dt} = (I_{ini} - I_{outi}) / C_1 \quad (10)$$

[0077] DC/DC级模块的输入电流  $I_{outi}$ 、输出电流  $I_{1i}$  与该级模块的移向角  $D_i$  的关系如下:

$$[0078] \quad I_{outi}[k] = \frac{U_{oi}[k]}{2kL_k f_{sd}} D_i (1 - |D_i|) \quad (11)$$

$$[0079] \quad I_{1i}[k] = \frac{U_{dci}[k]}{2kL_k f_{sd}} D_i (1 - |D_i|) \quad (12)$$

[0080] 其中,  $k$ 为DC/DC级模块的高频变压器变比;  $L_k$ 为高频变压器折合到一次侧的漏电感;  $f_{sd}$ 为DC/DC级模块的开关频率。

[0081] 由于模型预测控制需要在离散空间下完成,因此通过前向欧拉公式将公式(9)和(10)进行离散,可得到低压直流侧系统的离散模型,即为DC/DC级的预测模型如下:

$$[0082] \quad U_{oi}[k+1] = U_{oi}[k] + k_2 (I_{1i}[k] - I_{oi}[k]) \quad (13)$$

$$[0083] \quad U_{dci}[k+1] = U_{dci}[k] + k_1 (I_{ini}[k] - I_{outi}[k]) \quad (14)$$

[0084] 其中,  $k_2 = T_{sd} / C_2$ ,  $T_{sd}$ 为DC/DC级模块的采样频率;  $k_1 = T_{sd} / C_1$ 。

[0085] 通过公式(6)-(8)得到整流级的预测模型;通过公式(13)和(14)得到DC/DC级的预测模型。

[0086] 在步骤4中的求解过程中,系统模型的求解,其中公式(8)中所需的 $\Sigma I_{out}[k]$ 可通过公式(11)与当前DC/DC级成本函数求解出的最优移向角 $D_i[k]$ 得到。公式(14)中所需的 $I_{ini}[k]$ 可由公式(5)与当前整流级成本函数求解出的最优调制比 $d[k]$ 得到。

[0087] 步骤4中,以变压器控制目标参数数据与对应的实时动态参考值差值最小为目标构建成本函数,包括整流级模块的成本函数和DC/DC级模块的成本函数。

[0088] 模型预测控制本质是求解使成本函数最小的最优解的问题。整流级与DC/DC级对各自的控制目标的控制均仅由其自身的成本函数完成,免去了基于PI的外环的使用。

[0089] 本实施例中,变压器整流级控制目标参数包括:网侧有功功率、网侧无功功率和中压直流母线电压。

[0090] 变压器的整流级模块的成本函数为:变压器整流级模块各个控制目标参数与对应的控制目标参数参考值的差值的加权和。

[0091] 求解该成本函数的最优解为成本函数的使成本函数最小的解。整流级模块的成本函数如下:

$$[0092] \quad J_{rect} = r_{Pg} (P_g^*[k+1] - P_g[k+1])^2 + r_{Qg} (Q_g^*[k+1] - Q_g[k+1])^2 + r_{dc} (\sum_{i=1}^n U_{dc}^*[k+1] - \sum_{i=1}^n U_{dc}[k+1])$$

(15)

[0093] 本实施例中,变压器DC/DC级控制目标包括低压直流电压和DC/DC级模块平衡电压。

[0094] 变压器的DC/DC级模块的成本函数为:变压器DC/DC级模块各个控制目标参数与对应的控制目标参数参考值的差值的加权和。求解该成本函数的最优解为成本函数的使成本函数最小的解。

[0095] DC/DC级模块的成本函数如下:

$$[0096] \quad J_{DABi} = r_o (U_o^*[k+1] - U_o[k+1])^2 + r_{bal} (U_{dc\_av}^*[k+1] - U_{dc}[k+1])^2 \quad (16)$$

[0097] 步骤3中,根据当前控制目标达到固定参考值的控制步长,设置整流级每个控制目标的实时动态参考值的计算公式,包括中压直流母线的电压参考值、变压器网侧有功功率的动态参考值和网侧无功功率的参考值的计算公式。

[0098] 中压直流母线的电压参考值计算公式为:

$$[0099] \quad \sum_{i=1}^n U_{dc}^*[k+1] = \sum_{i=1}^n U_{dc}[k] + \frac{U_{dc\_ref} - \sum_{i=1}^n U_{dc}[k]}{Ns} \quad (17)$$

[0100] 其中, $U_{dc\_ref}$ 为中压直流母线的固定参考值, $U_{dc}^*[k+1]$ 为下一时刻的中压直流母线实时参考值; $U_{dc}[k]$ 为当前时刻的中压直流母线电压, $Ns$ 为步长,即需要多少个控制周期以达到实时动态参考值 $U_{dc}^*[k+1]$ 。

[0101] 中压直流母线的电压参考值,具体的:控制中压直流母线电压靠近固定目标参考值的单步调整值与上一时刻的中压直流母线电压值之和。

[0102] 可见,中压直流母线电压是每个控制周期是实时更新的,是根据调整后的电压调

整值步步更新的。实时动态更新的参考值,相比于固定参考值的调控,能够提高电压调整的准确度。

[0103] 变压器网侧有功功率的动态参考值包括:当前值与固定参考值间的实时误差的修正项 $P_{gcom}[k]$ ,变压器网侧有功功率的动态参考值具体如下:

$$[0104] \quad P_g^*[k+1] = I_{dc}^*[k+1] \sum_{i=1}^n U_{dc}^*[k+1] + U_o^*[k+1] \hat{I}_o[k] + P_{gcom}[k] \quad (18)$$

[0105] 其中, $\hat{I}_o$ 为观测器所观测到的DC/DC级模块负载电流 $I_{oi}$ 之和; $I_{dc}^*[k+1]$ 为满足 $\sum U_{dc}^*[k+1]$ 参考下的电容充电(放电)电流, $U_{dc}^*[k+1]$ 为下一时刻的中压直流母线实时参考值; $P_{gcom}[k]$ 为误差纠正项。

[0106] 上式中的电容充电(放电)电流 $I_{dc}^*[k+1]$ 应满足下式:

$$[0107] \quad I_{dc}^*[k+1] = \frac{C1}{nNsT_{sc}} \left( \sum_{i=1}^n U_{dc}^*[k+1] - \sum_{i=1}^n U_{dc}[k] \right) \quad (19)$$

[0108] 为消除系统的参数误差,或低开关频率引起的误差,在系统的网侧有功功率参考中加入一个纠正项 $P_{gcom}[k]$ ,该项如下式所示:

$$[0109] \quad P_{gcom}[k] = \int (U_{dc\_ref} - \sum_{i=1}^n U_{dc}[k]) \quad (20)$$

[0110] 该修正项 $P_{gcom}[k]$ 包含了当前值与固定参考值间的实时误差,进而消除由于参数误差或低开关频率所引起的误差。

[0111] 网侧无功功率的参考值如下:

$$[0112] \quad Q_g^*[k+1] = 3(Q^*[k+1] - Q^*[k-1]) + Q^*[k-2]. \quad (21)$$

[0113] 步骤3中的实时参考值的求解,由中压直流电压固定参考值 $U_{dc\_ref}$ 、网侧无功固定参考值 $Q_{g\_ref}$ 、当前时刻中压直流电压 $\sum U_{dc}[k]$ 以及由观测器观测到的模块负载电流之和 $\hat{I}_o[k]$ 通过公式(17)、(18)、(21)可生成整流级实时动态参考值 $P_g^*[k+1]$ 、 $Q_g^*[k+1]$ 、 $\sum U_{dc}^*[k+1]$ 。

[0114] 本实施例提出的动态参考预测控制方法,提高了系统整体动态特性,增加了系统的调节能力。该方法去除了各级所使用的基于PI的外环控制器,每一级仅通过一个成本函数即可控制全部控制目标,使系统带宽得到了较大提升,进而大幅提升了系统整体的响应速度。DC/DC级通过该成本函数可以直接求解同时满足输入平衡和输出电压参考命令下的最优解,提高了该级调节能力。

[0115] 实施例2

[0116] 基于实施例1,本实施例提供一种双级式固态变压器的动态参考预测控制系统,包括:

[0117] 获取模块:被配置为用于获取当前时刻变压器的控制目标参数数据;

[0118] 参考值更新模块:被配置为用于根据当前控制目标达到固定参考值的控制步长,

设置每个控制目标的实时动态参考值的计算公式,计算获得每个控制目标参数的实时动态参考值;

[0119] 求解控制模块:被配置为用于以变压器控制目标参数数据与对应的实时动态参考值差值最小为目标构建成本函数,根据实时动态参考值,以使得成本函数的值最小求解构建的双级式固态变压器系统模型,获得下一时刻变压器的控制参数,控制变压器的变流器。

[0120] 实施例3

[0121] 本实施例提供一种电子设备,包括存储器和处理器以及存储在存储器上并在处理器上运行的计算机指令,所述计算机指令被处理器运行时,完成实施例1的方法所述的步骤。

[0122] 实施例4

[0123] 本实施例提供一种计算机可读存储介质,用于存储计算机指令,所述计算机指令被处理器执行时,完成实施例1的方法所述的步骤。

[0124] 以上所述仅为本公开的优选实施例而已,并不用于限制本公开,对于本领域的技术人员来说,本公开可以有各种更改和变化。凡在本公开的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本公开的保护范围之内。

[0125] 上述虽然结合附图对本公开的具体实施方式进行了描述,但并非对本公开保护范围的限制,所属领域技术人员应该明白,在本公开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公开的保护范围以内。

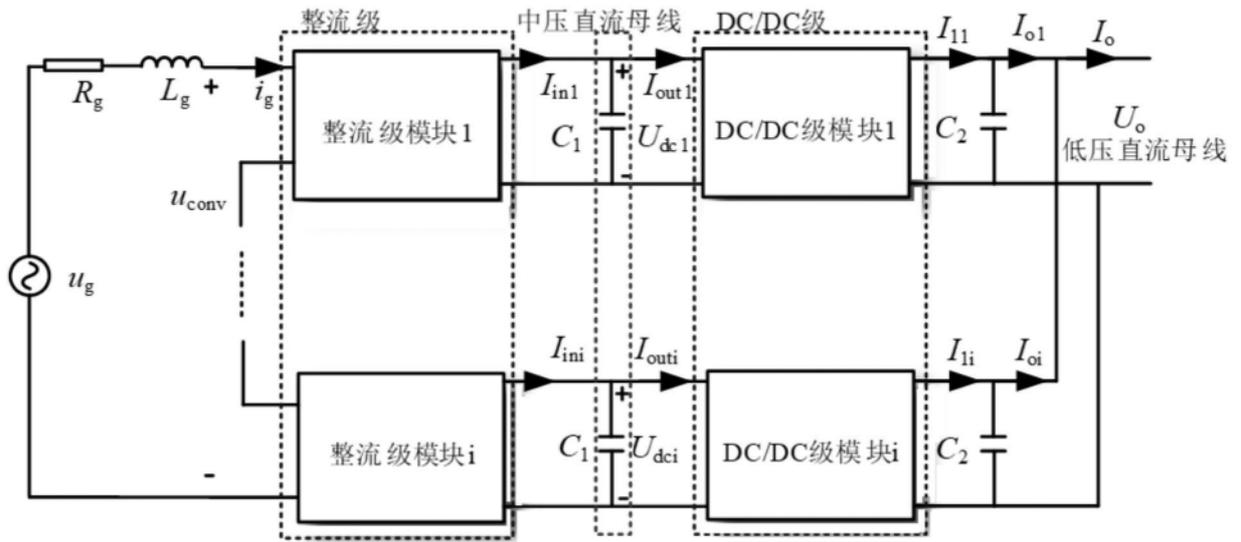


图1

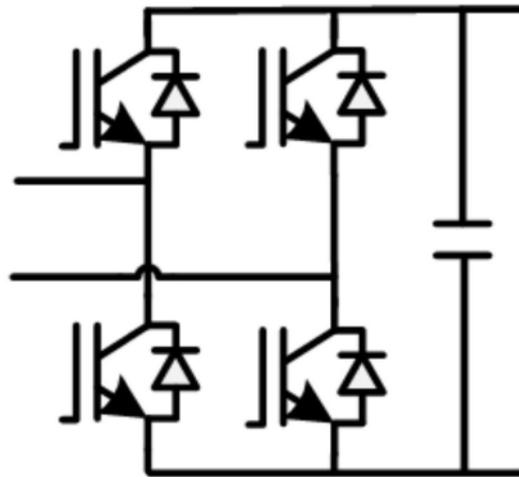


图2(a)

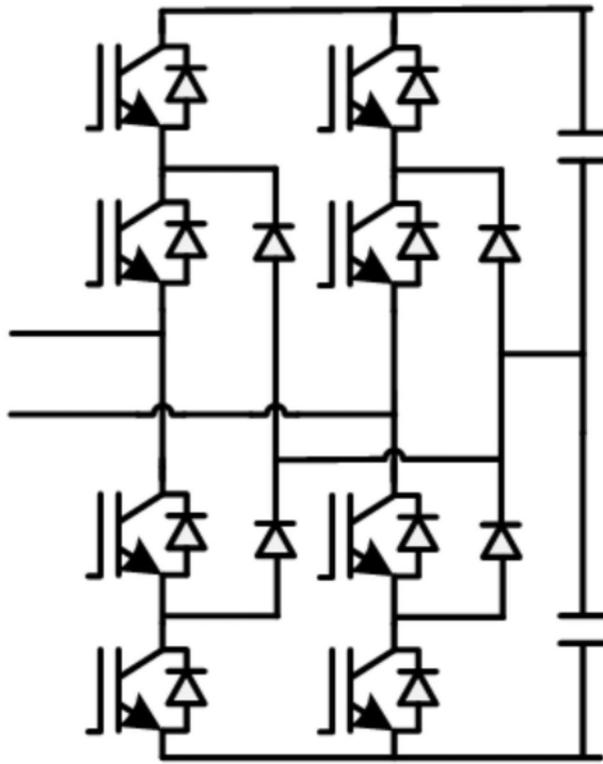


图2(b)

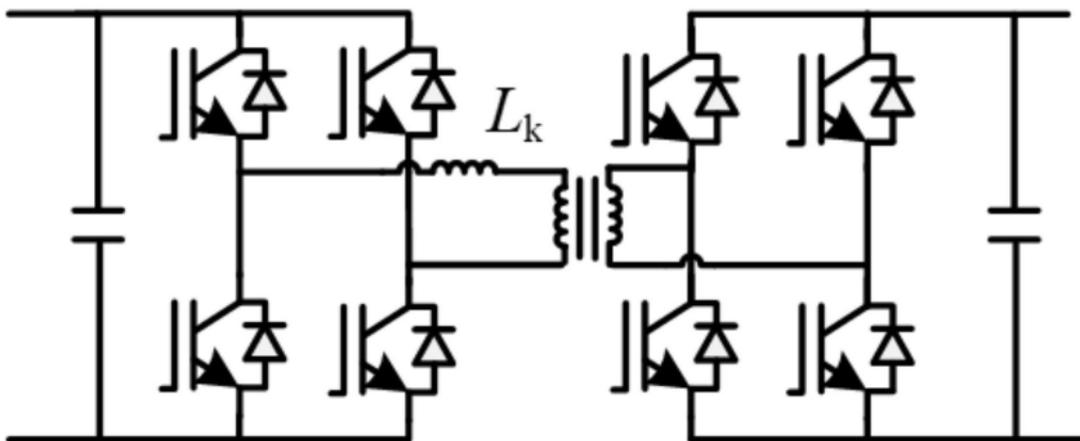


图2(c)

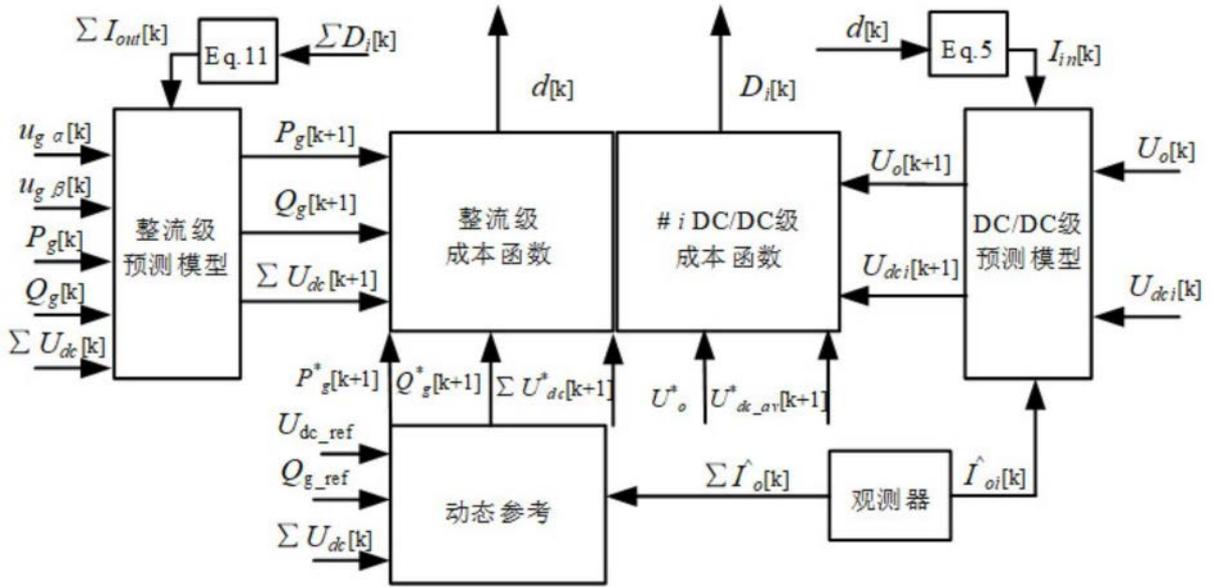


图3

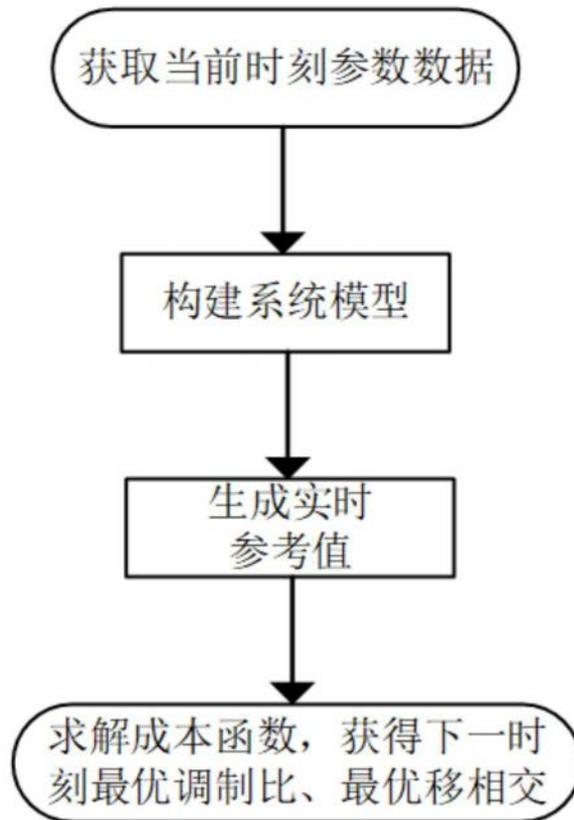


图4