

不间断电源系统电气状态量预测方法、控制方法、系统

交叉引用

本申请要求 2021 年 11 月 30 日提交的中国专利申请号 202111441452.X 的权益，所述申请以引用的方式整体并入本申请。

5

技术领域

本发明涉及 UPS 控制技术领域，特别是一种 UPS 系统电气状态量预测方法、控制方法、系统。

背景技术

- 10 如图 1，大功率 UPS（不间断电源）系统的拓扑为 T 型三电平整流器，T 型三电平逆变器，三电平三相直流变换器共直流母线结构，其中直流母线上有 C1，C2 两个稳压电容，并且配备由晶闸管组成的电磁旁路开关（由晶闸管组成）。其中 T 型三电平整流器连接交流电网，直流侧电容引出两条直流母线；T 型三电平逆变器连接负载，三电平双向直流变换器连接储能电池，蓄电池通过三电平双向直流变换器接入直流母线。T 型三电平逆变器在直流母线取电逆变成交流电为用电负荷供电。电磁旁路开关连接于市电和负载之间。UPS 系统总共有 4 种工作模式：旁路工作模式、UPS 供电模式、蓄电池供电模式、蓄电池馈电模式。

图 2 为功率 UPS 工作模式图，大功率 UPS 共有 4 种工作模式：分别为旁路工作模式、UPS 供电模式、蓄电池供电模式、蓄电池馈电模式。

- 20 旁路工作模式：此时 UPS 故障，或者手动失能旁路开关，此时电网直接向负载供电，UPS 闭锁。

UPS 供电模式：当市电、UPS 均正常时，此时旁路开关断开，T 型三电平整流器工作于 PWM 整流状态，T 型三电平逆变器工作于 PWM 逆变状态，电网通过整流器、逆变器给负载供电，同时三电平双向直流变换器从直流母线上获取电能给蓄电池充电。

- 25 蓄电池供电模式：当市电异常，而 UPS 正常时，电磁旁路开关断开，T 型三电平整流模块闭锁，蓄电池可通过双向直流变换器、T 型三电平逆变模块直接向负载供电，保证供电的持续。

蓄电池馈电模式：当市电、UPS 均正常，负载无需供电且蓄电池 SOC(State of Charge, 荷电状态) > 0.8 时，电磁旁路开关断开，T 型三电平逆变模块闭锁，蓄电池通过双向直

流变换器、T型三电平整流器（工作于逆变模式）向电网回馈电能。近年来，UPS 不断朝着大型化、模块化发展，系统集成与中央监控也不断完善。但是随着市场的不断扩大，UPS 使用的场合也越随之增加，负载越来越复杂，不间断电源需要适应的恶劣条件越来越多，给 UPS 提出了许多调整要求。如何实现 UPS 的大功率应用，并且提高 UPS 系统运行的效率和控制稳定性是现阶段 UPS 技术和产业发展的重要研究课题。

发明内容

本发明所要解决的技术问题是，针对现有技术不足，提供一种不间断电源系统电气状态量预测方法、控制方法、系统，解决现有 UPS 系统多变换器控制复杂，可靠性低的问题。

为解决上述技术问题，本发明所采用的技术方案是：一种 UPS 系统电气状态量预测方法，包括：

UPS 系统 T 型三电平整流器输出交流电流预测值 $i_g(k+1)$ 的计算公式为：

$$i_g(k+1) = (1 - \frac{R_s T_s}{L_s}) i_g(k) + \frac{T_s}{L_s} [u(k) - u_g(k)];$$

UPS 系统 T 型三电平整流器输出交流电压参考值 $u_{r_ref}(k)$ 的计算公式为：

$$u_{r_ref}(k) = \frac{L_s}{T_s} i_{ig_ref}(k) + (R_s - \frac{L_s}{T_s}) i_g(k) + u_g(k);$$

UPS 系统 T 型三电平逆变器输出交流电压参考值 $u_{i_ref}(k)$ 的计算公式为：

$$u_{i_ref}(k) = u_n(k);$$

UPS 系统交流电压预测值 $u(k+1)$ 的计算公式为：

$$u(k+1) = u(k) e^{j\omega T_s};$$

UPS 系统直流侧稳压电容预测值 $U_{cn}(k+1)$ 的计算公式为：

$$U_{cn}(k+1) = U_{cn}(k) + \frac{T_s}{C_n} i_{cn}(k);$$

UPS 系统三电平三相直流变换器电感电流预测值 $i_L(k+1)$ 的计算公式为：

$$i_L(k+1) = \frac{T_s}{L} [U_{ES} - (T_1 \parallel T_3) U_{c1}(k) - (T_2 \parallel T_4) U_{c2}(k)] + i_L(k);$$

其中， $u(k)$ 为 T 型三电平整流器输出交流电压， L_s 为 T 型三电平整流器输出滤波电感值， T_s 为采样间隔时间， R_s 是 UPS 系统输出线路电阻， $i_g(k)$ 是 k 采样时刻的网侧电流，

$u_g(k)$ 为 k 采样时刻电网电压; $u_{r_ref}(k)$ 为 k 采样时刻 T 型三电平整流器交流侧输出指令电压, $i_{rg_ref}(k)$ 是 k 采样时刻的网侧电流指令值; $u_n(k)$ 为负载额定电压在 k 采样时刻的采样值; ω 为电网角频率; $U_{cn}(k+1)$ 为 $k+1$ 采样时刻 T 型三电平整流器直流侧电容 C_n 的电压值, $U_{cn}(k)$ 为 k 采样时刻 C_n 的电压值, $i_{cn}(k)$ 为 k 采样时刻流过 C_n 的电流值; U_{ES} 为储能
5 电池电压, L 为 UPS 系统三电平三相直流变换器电感值, $T1 \sim T4$ 为三电平三相直流变换器开关管输出状态, $i_L(k)$ 为 k 时刻三电平双向直流变换器电感电流值; $n=1, 2$;
|||表示逻辑或运算。

本发明可以预测各个开关量对应的电气状态, 便于在 UPS 系统控制过程中整体优化控制 UPS 系统, 从而解决了现有 UPS 系统多变换器控制复杂, 可靠性低的问题。

10 本发明还提供了一种 UPS 系统电气状态量预测系统, 其包括处理器和存储器; 所述处理器用于执行所述存储器存储的计算机程序; 所述计算机程序被配置为用于执行本发明所述预测方法的步骤。

本发明还提供了一种 UPS 系统控制方法, 包括:

当 UPS 系统工作于 UPS 供电模式时, 若蓄电池 $SOC \geq 0.8$, 则构造优化函数

$$15 \quad Q=J_1+J_2;$$

当 UPS 系统工作于 UPS 供电模式时, 若蓄电池 $SOC < 0.8$, 则构造优化函数

$$Q=J_1+J_2+J_3;$$

当 UPS 系统工作于蓄电池供电模式时, 或者 UPS 系统工作于蓄电池馈电模式时, 若蓄电池 $SOC > 0.2$, 则构造优化函数 $Q=J_2+J_4$;

20 其中,

$$J_1 = |u_{ra_ref}(k+1) - u_{ra}(k+1)| + |u_{rb_ref}(k+1) - u_{rb}(k+1)| + \lambda_1 |U_{c1}(k+1) - U_{c2}(k+1)|;$$

$$J_2 = |u_{ia_ref}(k+1) - u_{ia}(k+1)| + |u_{ib_ref}(k+1) - u_{ib}(k+1)|;$$

$$J_3 = |U_{dc_ref} - U_{dc}(k+1)| + |i_{L_ref} - i_L(k+1)|;$$

$$J_4 = |U_{dc_ref} - U_{dc}(k+1)| + |i_{L_ref} - i_L(k+1)| + \lambda_2 |U_{c1}(k+1) - U_{c2}(k+1)|;$$

25 $u_{ra}(k+1)$ 为 $k+1$ 采样时刻 T 型三电平整流器输出交流电压 $u_r(k+1)$ 在 α 轴的投影, $u_{ra_ref}(k+1)$ 为 T 型三电平整流器输出交流电压参考值 $u_{r_ref}(k+1)$ 在 α 轴的投影; $u_{rb}(k+1)$ 为 $k+1$ 采样时刻 T 型三电平整流器输出交流电压 $u_r(k+1)$ 在 β 轴的投影, $u_{rb_ref}(k+1)$ 为 $k+1$

- 采样时刻 T 型三电平整流器输出交流电压参考值 $u_{r_ref}(k+1)$ 在 β 轴的投影; $U_{c1}(k+1)$, $U_{c2}(k+1)$ 分别表示 $k+1$ 采样时刻 T 型三电平整流器直流侧电容 C_1 , C_2 的电压值, $u_{i\alpha}(k+1)$ 为 $k+1$ 采样时刻 T 型三电平逆变器输出交流电压 $u_i(k+1)$ 在 α 轴的投影, $u_{i\alpha_ref}(k+1)$ 为 $k+1$ 采样时刻 T 型三电平逆变器输出交流电压参考值 $u_{i_ref}(k+1)$ 在 α 轴的投影, $u_{i\beta}(k+1)$ 为 $k+1$ 采样时刻 T 型三电平逆变器输出交流电压参考值 $u_{i_ref}(k+1)$ 在 β 轴的投影, $u_{i\beta_ref}(k+1)$ 为 T 型三电平逆变器输出交流电压参考值 $u_{i_ref}(k+1)$ 在 β 轴的投影, λ_1 为 T 型三电平整流器控制权重, λ_2 为三电平三相直流变换器控制权重; i_{L_ref} 为 T 型三电平三相直流变换器电感电流值; U_{dc_ref} 为 T 型三电平整流器直流侧电压指令值, $U_{dc}(k+1)$ 为直流侧电容电压在 $k+1$ 时刻的值;
- 10 选取优化函数最小时的各开关管输出量 (1 代表开关管导通, 0 代表开关管关断), 根据相应开关管输出量对应控制 T 型三电平整流器开关管、T 型三电平逆变器开关管、三电平三相直流变换器开关管的通断;

其中, $u_{r_ref}(k+1)$ 、 $u_{i_ref}(k+1)$ 根据本发明所述预测方法计算得到, 或者, 采用本发明所述预测系统计算 $u_{r_ref}(k+1)$ 、 $u_{i_ref}(k+1)$;

- 15 其中, $u_{r_ref}(k+1)$ 、 $u_{i_ref}(k+1)$ 根据本发明 UPS 系统电气状态量预测方法计算得到, 或者, 采用本发明 UPS 系统电气状态量预测系统计算得到 $u_{r_ref}(k+1)$ 、 $u_{i_ref}(k+1)$ 。

- 本发明的 UPS 系统控制方法相比传统控制方法 (PI 控制, 电流跟踪控制等) 在多端变换器系统中具备显著优势, 因传统控制方法的控制对象多为某个系统, 如 UPS 中的储能输出端口, UPS 整流器输入端口, UPS 逆变器输出端口等, 每个端口的最优开关控制可能存在相互制约, 难以实现综合优化, 而本发明的 UPS 系统控制方法则提前预测各个开关量对应的电气状态, 并利用综合优化函数实现多端口系统的整体优化控制, 各个端口的最优开关控制之间不存在相互制约的问题。
- 20 控制可能存在相互制约, 难以实现综合优化, 而本发明的 UPS 系统控制方法则提前预测各个开关量对应的电气状态, 并利用综合优化函数实现多端口系统的整体优化控制, 各个端口的最优开关控制之间不存在相互制约的问题。

- 利用整体目标函数进行开关量寻优的控制方法可以实现多端口的协调优化函数, 通过优化函数 Q 寻找可快速接近指令值的开关组合, 相比传统的 PI 控制, 本发明的响应速度更快且可靠性更高。
- 25 速度更快且可靠性更高。

本发明中, $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$, 由于 T 型三电平整流器与三相直流变换器的直流侧平衡在控制时可能存在相互制约的现象, 故根据功率裕量确定变换器进行直流侧电容平衡

控制，而系统整体平衡因素为 1， λ_1 ， λ_2 为各自控制器的权重，根据控制器裕量设置。本发明设置 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 可以克服 T 型三电平整流器与三相直流变换器的直流侧平衡在控制时存在的相互制约的问题。

作为一个发明构思，本发明还提供了一种 UPS 系统控制系统，包括处理器和存储器；所述处理器用于执行所述存储器存储的计算机程序；所述计算机程序被配置为用于执行本发明所述控制方法的步骤。

与现有技术相比，本发明所具有的有益效果为：本发明通过 MPC(模型预测控制)构造目标优化控制函数遍历各种开关状态下目标优化控制函数的代价值 Q 获取了各个时刻的最优开关变量，提升了 UPS 系统的工作效率和运行稳定性。本发明解决了多变换器组合系统协同控制复杂，控制优化困难等问题，提高了大功率 UPS 系统的工作效率和控制系统的稳定性，使大功率 UPS 系统能够更广泛地应用于各种工业应用场合。

附图说明

图 1 为大功率 UPS 的整体结构图；

图 2 (a) ~ 图 2 (d) 为大功率 UPS 四种工作模式示意图；其中，图 2 (a) 为旁路供电模式；图 2 (b) 为 UPS 供电模式；图 2 (c) 为蓄电池供电模式；图 2 (d) 为蓄电池馈电模式；

图 3 (a) ~ 图 3 (c) 为本发明的 T 型三电平变换器 A 相开关模态示意图；其中，图 3 (a) 中 $S_{a1}=1$ ， $S_{a2}=1$ ，输出 P；图 3 (b) 中 $S_{a3}=1$ ， $S_{a4}=1$ ，输出 n；图 3 (c) 中 $S_{a2}=1$ ， $S_{a2}=1$ ，输出 O；

图 4 为本发明 T 型三电平 27 中开关状态向量示意图；

图 5 (a) ~ 图 5 (h) 为本发明双向直流变换器 8 种开关模态示意图；其中，图 5 (a) 为蓄电池对 C2 馈电；图 5 (b) 为蓄电池对 C1 馈电；图 5 (c) 为蓄电池对电感 L 馈电；图 5 (d) 为蓄电池对电容 C1、C2 馈电；图 5 (e) 为 C1 对蓄电池充电；图 5 (f) 为 C2 对蓄电池充电；图 5 (g) 为电感 L 对蓄电池放电；图 5 (h) 为 C1、C2 对蓄电池充电；

图 6 为本发明的大功率 UPS 模型预测控制示意图；

图 7 (a) ~ 图 7 (d) 为利用本发明所控制方法进行的 UPS 仿真结果图；图 7 (a) 为直流侧电容仿真图；图 7 (b) 为系统输出功率指令图；图 7 (c)、在模式切换时的电

流波形图，图 7（d）为系统在模态切换时的电压波形图。

具体实施方式

参见图 3，为本发明 T 型三电平输出模态，以 A 相为例分析，当 Sa1=1，Sa2=1 时，此时 T 型三电平输出记为 P；当 Sa3=1，Sa4=1，此时 T 型三电平输出记为 N；当 Sa2=1，
5 Sa3=1，此时 T 型三电平输出记为 O（其中 1 为开关管闭合，未提及表示开关管断开）。

由于电网是一个三相系统，每一相均有三种输出模态（P，N，O），三相组合共有可能出现的 $3^3=27$ 种可能的开关组合向量（例如 NPN、OP0、N0N 等）。图 4 为 T 型三电平变换器图 5 为双向直流变换器可能存在的 8 种模态，分为充电和馈能两种工作模式。

馈电模式：当 T2=1 时，蓄电池给直流侧稳压电容 C_2 充电，当 T3=1 时；蓄电池给
10 直流侧稳压电容 C_1 充电；当 T2=T3=1 时，此时蓄电池给储能电感充电。当开关管均断开时，储能电池给两个稳压电容充电。

充电模式：当 T1=1 时，稳压电容 C_1 给蓄电池充电；当 T4=1 时，稳压电容 C_2 给蓄电池充电；当开关管均断开时，此时蓄电池给储能电感充电；当 T1=T4=1，此时稳压电容 C_1 ， C_2 共同为蓄电池供电。

15 UPS 系统各个变换器的电气状态量预测值计算方法如下：通过电气状态量预测计算，可以根据现有 k 时刻的状态量，结合电气开关量状态可预测 $k+1$ 时刻电气状态量，进而根据优化函数确定最优的开关量。

本发明的各优化函数计算公式、电气状态预测量计算公式中，均不考虑各参数的量纲，代入计算时，只考虑各参数的值，其中电压值对应的量纲为 V，电流值对应的量纲
20 为 A。

整流器输出交流电流预测值 $i_g(k+1)$ ：

$$i_g(k+1) = (1 - \frac{R_s T_s}{L_s}) i_g(k) + \frac{T_s}{L_s} [u(k) - u_g(k)];$$

其中 $u(k)$ 为整流器输出交流电压， L_s 为 UPS 整流器输出滤波电感值， T_s 为采样间隔时间， R_s 是系统输出线路电阻， $i_g(k)$ 是 k 采样时刻的网侧电流， $u_g(k)$ 为 k 采样时刻电网电压。

25 整流器输出交流电压参考值 $u_{r_ref}(k)$ ：

$$u_{r_ref}(k) = \frac{L_s}{T_s} i_{ig_ref}(k) + (R_s - \frac{L_s}{T_s}) i_g(k) + u_g(k);$$

其中 $u_{r_ref}(k)$ 为 k 采样时刻交流侧输出指令电压, $i_{ig_ref}(k)$ 是 k 采样时刻的网侧电流指令值。

逆变器输出交流电压参考值 $u_{i_ref}(k)$:

$$u_{i_ref}(k) = u_n(k);$$

- 5 其中 $u_n(k)$ 为负载额定电压在 k 时刻的采样值。

交流电压预测值 $u(k+1)$ 的计算:

$$u(k+1) = u(k) e^{j\omega T_s};$$

其中 ω 为系统角频率。

直流侧稳压电容预测值 $U_{cn}(k+1)$:

$$10 \quad U_{cn}(k+1) = U_{cn}(k) + \frac{T_s}{C_n} i_{cn}(k);$$

其中 $U_{cn}(k+1)$ 为 $k+1$ 采样时刻 $C_n(n=1, 2)$ 的电容电压值, $U_{cn}(k)$ 为 k 采样时刻 $C_n(n=1, 2)$ 的电容电压值, $i_{cn}(k)$ 为 k 采样时刻流过 $C_n(n=1, 2)$ 的电容电流值。

三电平双向直流变换器电感电流预测值 $i_L(k+1)$:

$$i_L(k+1) = \frac{T_s}{L} [U_{ES} - (T_1 \parallel T_3) U_{C1}(k) - (T_2 \parallel T_4) U_{C2}(k)] + i_L(k);$$

- 15 其中 U_{ES} 为储能电池电压, L 为三电平双向直流变换器电感值, T_1 - T_4 为开关管输出状态(1 为开关管闭合, 0 为开关管断开), $U_{C1}(k)$ 为 k 采样时刻 C_1 的电容电压值, $U_{C2}(k)$ 为 k 采样时刻 C_2 的电容电压值。 $i_L(k)$ 为 k 时刻三电平双向直流变换器电感电流值。

参见图 6 为基于 MPC 的大功率 UPS 系统的协调控制流程图:

当 UPS 工作于 UPS 供电模式时, 首先检测蓄电池的 SOC 状态。

- 20 1) 当蓄电池 SOC>0.8 时, 此时三电平双向直流变换器工作于闭锁状态, 蓄电池旁路于系统。负载由整流器和逆变器共同供电, 构造优化函数如下(整流器进行

电容电压平衡控制)；若满足优化函数优化函数 Q 最小，则既能保证直流侧上下电容 $C1, C2$ 的平衡，又能实现控制指令的精准跟踪。

$$J_1 = |u_{ra_ref}(k+1) - u_{ra}(k+1)| + |u_{rb_ref}(k+1) - u_{rb}(k+1)| + \lambda_1 |U_{c1}(k+1) - U_{c2}(k+1)|;$$

$$J_2 = |u_{ia_ref}(k+1) - u_{ia}(k+1)| + |u_{ib_ref}(k+1) - u_{ib}(k+1)|;$$

$$Q = J_1 + J_2;$$

上式中， J_1 ， J_2 ， Q 分别为整流器优化代价函数，逆变器目标优化量，系统目标优化量。其中 $u_{ra}(k+1)$ 为 $k+1$ 采样时刻整流器输出交流电压在 α 轴的投影， u_{ra_ref} 为整流侧输出交流电压指令值在 α 轴的投影。其中 $u_{rb}(k+1)$ 为 $k+1$ 采样时刻整流器输出交流电压在 β 轴的投影， u_{rb_ref} 为整流器输出交流电压指令值在 β 轴的投影。 $U_{c1}(k+1)$ ， $U_{c2}(k+1)$ 分别表示 $k+1$ 采样时刻直流电容 C_1 ， C_2 的直流电压， $u_{ia}(k+1)$ 为 $k+1$ 采样时刻逆变器输出交流电压在 α 轴的投影， $u_{ia}(k+1)$ 为 $k+1$ 采样时刻逆变器输出交流电压在 α 轴的投影， u_{ia_ref} 为逆变器输出交流电压指令值在 α 轴的投影。其中 $u_{ib}(k+1)$ 为 $k+1$ 采样时刻逆变器输出交流电压在 β 轴的投影， u_{ib_ref} 为逆变器输出交流电压指令值在 β 轴的投影。 λ 为权重系数，它的取值决定了所控制变量在全局优化中的优先级(λ_1 为整流器控制权重， λ_2 为直流变换器控制权重)。

其中 α 轴， β 轴分别为两相坐标轴的两个坐标轴，三相交流电压由静止坐标 abc 轴向量变换到垂直的两相坐标轴的表达式如下：

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}$$

控制器需要在一个采样周期内遍历寻优整流器与逆变器开关状态 $m=(27)^2$ 次，选取形成代价函数 Q 最小的开关数字信号 S_{op} 。

2) 当蓄电池 $SOC < 0.8$ 时，此时三电平双向直流变换器工作于充电模式，蓄电池充电。整流器给负载和蓄电池供电，构造优化函数如下（整流器进行电容电压平衡控制）：若满足优化函数优化函数 Q 最小，则既能保证直流侧上下电容 $C1$ ， $C2$ 的平衡，又能实现控制 UPS 输出指令、蓄电池输出电流指令的精准跟踪。

$$J_1 = |u_{ra_ref}(k+1) - u_{ra}(k+1)| + |u_{rb_ref}(k+1) - u_{rb}(k+1)| + \lambda_1 |U_{c1}(k+1) - U_{c2}(k+1)|;$$

$$J_2 = |u_{ia_ref}(k+1) - u_{ia}(k+1)| + |u_{ib_ref}(k+1) - u_{ib}(k+1)|;$$

$$J_3 = |U_{dc_ref} - U_{dc}(k+1)| + |i_{L_ref} - i_L(k+1)|;$$

$$Q = J_1 + J_2 + J_3;$$

其中 i_{L_ref} 为三电平双向直流变换器电感电流值。 U_{dc_ref} 为直流侧电压指令值, $U_{dc}(k+1)$

5 为直流侧电容电压在 $k+1$ 时刻的值, 计算方法为 $U_{c1}(k+1) + U_{c2}(k+1)$ 。

此时三电平双向直流变换器存在两种工作模式 $S2=1$, $[S2, S3]=1$, 控制器需要在一个采样周期内遍历寻优整流器、逆变器和直流变换器开关状态 $m=2*(27)^2$ 次, 选取形成代价函数 Q 最小的开关数字信号 S_{op} 。

当 UPS 工作于蓄电池供电模式时, 首先检测蓄电池的 SOC 状态。

10 若 $SOC < 0.2$, 此时 UPS 工作于闭锁状态;

若 $0.2 < SOC$, 此时蓄电池进入独立供电模式, 由蓄电池通过直流变换器和逆变器向负荷供电, 构造优化函数如下: 若满足优化函数 Q 最小 (Q 最小时对应的值为 Q_{on}), 则能实现控制 UPS 输出指令的精准跟踪。

$$J_2 = |u_{ia_ref}(k+1) - u_{ia}(k+1)| + |u_{ib_ref}(k+1) - u_{ib}(k+1)|;$$

$$15 \quad J_4 = |U_{dc_ref} - U_{dc}(k+1)| + |i_{L_ref} - i_L(k+1)| + \lambda_2 |U_{c1}(k+1) - U_{c2}(k+1)|;$$

$$Q = J_2 + J_4;$$

此时三电平双向直流变换器由于需要控制直流侧电压稳定、电容 $C1 \setminus C2$ 的平衡。电压的存在 8 种工作模式 $S1=1, S2=1, S3=1, S4=1, [S1, S4]=1, [S2, S3]=1, 0(+, -)$

20 控制器需要在一个采样周期内遍历寻优逆变器和直流变换器开关状态 $m=8*27$ 次, 选取形成代价函数 Q 最小的开关数字信号 S_{op} 。

当 UPS 工作于蓄电池馈电模式时, 首先检测蓄电池的 SOC 状态。

若 $SOC < 0.2$, 此时 UPS 工作于闭锁状态。

若 $0.2 < SOC$, 此时蓄电池进入独立供电模式, 由蓄电池通过直流变换器和整流器 (工作于逆变模式) 向电网馈电, 构造优化函数如下: 若满足优化函数 Q 最小,

则能实现控制 UPS 馈电指令的精准跟踪。

$$J_1 = |u_{ra_ref}(k+1) - u_{ra}(k+1)| + |u_{rb_ref}(k+1) - u_{rb}(k+1)|;$$

$$J_4 = |U_{dc_ref} - U_{dc}(k+1)| + |i_{L_ref} - i_L(k+1)| + \lambda_2 |U_{c1}(k+1) - U_{c2}(k+1)|$$

$$Q = J_2 + J_4;$$

- 5 此时三电平双向直流变换器由于需要控制直流侧电压稳定、电容 C1\C2 的平衡。电压的存在 8 种工作模式 S1=1, S2=1, S3=1, S4=1, [S1, S4]=1, [S2, S3]=1, 0(+,-)。

0(+,-): 表示变换器输出为 0, +表示电池通过电感 L 正向充电为电感 L 储能, -表示电池通过电感 L 反向充电为电感 L 储能。

- 10 控制器需要在一个采样周期内遍历寻优逆变器和直流变换器开关状态 $m=8*27$ 次, 选取形成代价函数 Q 最小的开关数字信号 Q_{op} 。

通过 PSim 仿真验证本发明所提控制方法的有效性和先进性。

- 15 图 7 (a)、图 7 (b)、图 7 (c)、图 7 (d) 为利用本发明所提拓扑和控制方法进行的 UPS 仿真, 整体系统容量为 200KVA。其中图 7(a)为直流侧电容仿真图, 其中 $udc1, udc2$ 分别表示三电平上下直流侧电容电压, 可见通过本发明电压均衡控制; 系统在 10ms 内快速实现了上下电容均压, 图 7(b)为系统输出功率指令图, 其中功率指令输出为 100kw, 可见通过本发明系统控制, 输出功率可在 20ms(一个电网周期内)快速跟踪指令, 且误差 <1%; 附图 7 (c)、图 7 (d) 为系统在模态切换时的电流电压图, 可见当系统由并网模态切换至孤岛模态, 系统电流, 电压快速响应, 均在 10ms 内完成输出调节。可见本发明装置响应迅速, 可快速实现 UPS 功能。

权利要求

1、一种不间断电源系统电气状态量预测方法，其特征在于，包括：

UPS 系统 T 型三电平整流器输出交流电流预测值 $i_g(k+1)$ 的计算公式为：

$$i_g(k+1) = (1 - \frac{R_s T_s}{L_s}) i_g(k) + \frac{T_s}{L_s} [u(k) - u_g(k)];$$

UPS 系统 T 型三电平整流器输出交流电压参考值 $u_{r_ref}(k)$ 的计算公式为：

$$u_{r_ref}(k) = \frac{L_s}{T_s} i_{rg_ref}(k) + (R_s - \frac{L_s}{T_s}) i_g(k) + u_g(k);$$

UPS 系统 T 型三电平逆变器输出交流电压参考值 $u_{i_ref}(k)$ 的计算公式为：

$$u_{i_ref}(k) = u_n(k);$$

UPS 系统交流电压预测值 $u(k+1)$ 的计算公式为：

$$u(k+1) = u(k) e^{j\omega T_s};$$

UPS 系统直流侧稳压电容预测值 $U_{cn}(k+1)$ 的计算公式为：

$$U_{cn}(k+1) = U_{cn}(k) + \frac{T_s}{C_n} i_{cn}(k);$$

UPS 系统三电平三相直流变换器电感电流预测值 $i_L(k+1)$ 的计算公式为：

$$i_L(k+1) = \frac{T_s}{L} [U_{ES} - (T_1 \parallel T_3) U_{c1}(k) - (T_2 \parallel T_4) U_{c2}(k)] + i_L(k);$$

其中， $u(k)$ 为 T 型三电平整流器输出交流电压， L_s 为 T 型三电平整流器输出滤波电感值， T_s 为采样间隔时间， R_s 是 UPS 系统输出线路电阻， $i_g(k)$ 是 k 采样时刻的网侧电流， $u_g(k)$ 为 k 采样时刻电网电压； $u_{r_ref}(k)$ 为 k 采样时刻 T 型三电平整流器交流侧输出指令电压， $i_{rg_ref}(k)$ 是 k 采样时刻的网侧电流指令值； $u_n(k)$ 为负载额定电压在 k 采样时刻的采样值； ω 为电网角频率； $U_{cn}(k+1)$ 为 $k+1$ 采样时刻 T 型三电平整流器直流侧电容 C_n 的电压值， $U_{cn}(k)$ 为 k 采样时刻 C_n 的电压值， $i_{cn}(k)$ 为 k 采样时刻流过 C_n 的电流值； U_{ES} 为储能电池电压， L 为 UPS 系统三电平三相直流变换器电感值， $T_1 \sim T_4$ 为三电平三相直流变换器开关管输出状态， $i_L(k)$ 为 k 时刻三电平双向直流变换器电感电流值； $n=1, 2$ ； $\parallel$ 表示逻辑或运算。

2、一种不间断电源系统电气状态量预测系统，其特征在于，包括处理器和存储器；

所述处理器用于执行所述存储器存储的计算机程序；所述计算机程序被配置为用于执行权利要求 1 所述方法的步骤。

3、一种不间断电源系统控制方法，其特征在于，包括：

当 UPS 系统工作于 UPS 供电模式时，若蓄电池 SOC ≥ 0.8 ，则构造优化函数 $Q=J_1+J_2$ ；

当 UPS 系统工作于 UPS 供电模式时，若蓄电池 SOC < 0.8 ，则构造优化函数 $Q=J_1+J_2+J_3$ ；

当 UPS 系统工作于蓄电池供电模式时，或者 UPS 系统工作于蓄电池馈电模式时，若蓄电池 SOC > 0.2 ，则构造优化函数 $Q=J_2+J_4$ ；

其中，

$$J_1 = |u_{\alpha_ref}(k+1) - u_{\alpha}(k+1)| + |u_{\beta_ref}(k+1) - u_{\beta}(k+1)| + \lambda_1 |U_{c1}(k+1) - U_{c2}(k+1)|;$$

$$J_2 = |u_{i\alpha_ref}(k+1) - u_{i\alpha}(k+1)| + |u_{i\beta_ref}(k+1) - u_{i\beta}(k+1)|;$$

$$J_3 = |U_{dc_ref} - U_{dc}(k+1)| + |i_{L_ref} - i_L(k+1)|;$$

$$J_4 = |U_{dc_ref} - U_{dc}(k+1)| + |i_{L_ref} - i_L(k+1)| + \lambda_2 |U_{c1}(k+1) - U_{c2}(k+1)|;$$

$u_{\alpha}(k+1)$ 为 $k+1$ 采样时刻 T 型三电平整流器输出交流电压 $u_i(k+1)$ 在 α 轴的投影，

$u_{\alpha_ref}(k+1)$ 为 T 型三电平整流器输出交流电压参考值 $u_{r_ref}(k+1)$ 在 α 轴的投影；

$u_{\beta}(k+1)$ 为 $k+1$ 采样时刻 T 型三电平整流器输出交流电压 $u_i(k+1)$ 在 β 轴的投影，

$u_{\beta_ref}(k+1)$ 为 $k+1$ 采样时刻 T 型三电平整流器输出交流电压参考值 $u_{r_ref}(k+1)$ 在 β 轴的投影； $U_{c1}(k+1)$ ， $U_{c2}(k+1)$ 分别表示 $k+1$ 采样时刻 T 型三电平整流器直流侧电容 C_1 ， C_2 的电压值， $u_{i\alpha}(k+1)$ 为 $k+1$ 采样时刻 T 型三电平逆变器输出交流电压 $u_i(k+1)$ 在 α 轴的投影， $u_{i\alpha_ref}(k+1)$ 为 $k+1$ 采样时刻 T 型三电平逆变器输出交流电压参考值 $u_{i_ref}(k+1)$ 在 α 轴的投影， $u_{i\beta}(k+1)$ 为 $k+1$ 采样时刻 T 型三电平逆变器输出交流电压参考值 $u_{i_ref}(k+1)$ 在 β 轴的投影， $u_{i\beta_ref}(k+1)$ 为 T 型三电平逆变器输出交流电压参考值 $u_{i_ref}(k+1)$ 在 β 轴的投影， λ_1 为 T 型三电平整流器控制权重， λ_2 为三电平三相直流变换器控制权重； i_{L_ref} 为 T 型三电平三相直流变换器电感电流值； U_{dc_ref} 为 T 型三电平整流器直流侧电压指令值， $U_{dc}(k+1)$ 为直流侧电容电压在 $k+1$ 时刻的值；

选取优化函数最小时的各开关管输出量，输出量 1 代表开关管开通，输出量 0 代表开关管关断，根据相应开关管输出量对应控制 T 型三电平整流器开关管、T 型三电平逆变器开关管、三电平三相直流变换器开关管的通断；

其中， $u_{r_ref}(k+1)$ 、 $u_{i_ref}(k+1)$ 根据权利要求 1 所述预测方法计算得到，或者，采用权利要求 2 所述系统计算 $u_{r_ref}(k+1)$ 、 $u_{i_ref}(k+1)$ 。

- 4、根据权利要求 3 所述的不间断电源系统控制方法，其特征在于， $\lambda_1+\lambda_2=1$ 。
- 5、一种不间断电源系统控制系统，其特征在于，包括处理器和存储器；所述处理器用于执行所述存储器存储的计算机程序；所述计算机程序被配置为用于执行权利要求 3 或 4 所述方法的步骤。