



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104660089 A

(43) 申请公布日 2015. 05. 27

(21) 申请号 201510083187. 0

(22) 申请日 2015. 02. 15

(71) 申请人 南京埃斯顿自动控制技术有限公司
地址 211100 江苏省南京市江宁开发区将军大道 155 号

(72) 发明人 陈彦鹏 姚瑛 郑再然 张瑞
赵进 李文龙

(74) 专利代理机构 南京天翼专利代理有限责任
公司 32112

代理人 奚铭

(51) Int. Cl.
H02M 7/72(2006. 01)

权利要求书1页 说明书5页 附图5页

(54) 发明名称

用于伺服驱动的 PWM 整流器回馈滞环控制方法

(57) 摘要

用于伺服驱动的 PWM 整流器回馈滞环控制方法, PWM 整流器为双闭环控制, 外环为电压环, 内环为电流环, 将电压环的控制目标设定为一个区间, 按区间将 PWM 整流器的工作状态分为整流工作状态, 回馈工作状态和中间工作状态, 中间工作状态时 PWM 整流器既不进行整流也不进行能量回馈。本发明针对 PWM 整流器在伺服电机驱动领域的应用问题, 提出了一种新的电压环回馈滞环控制方法, 可以减少能量回馈的次数和回馈能量的大小, 降低了能量回馈过程中的损耗, 提高了伺服驱动装置中 PWM 整流器的效率。



1. 用于伺服驱动的 PWM 整流器回馈滞环控制方法, PWM 整流器为双闭环控制, 外环为电压环, 内环为电流环, 其特征是 PWM 整流器用于伺服驱动器时, 将电压环的控制目标设定为一个区间, 区间的上下限分别为整流目标电压 U_{rect} 和回馈起始电压 U_{back} , 且回馈起始电压 U_{back} 要大于整流目标电压 U_{rect} , 当直流侧电压低于整流目标电压 U_{rect} 时 PWM 整流器处于整流工作状态, 从电网吸取能量; 当直流侧电压高于回馈起始电压 U_{back} 时 PWM 整流器处于回馈工作状态, 将电机制动产生的能量回馈电网; 当直流侧电压大于整流目标电压 U_{rect} 小于回馈起始电压 U_{back} 时, 定义此时 PWM 整流器的状态为中间工作状态, PWM 整流器既不进行整流也不进行能量回馈, 将能量先暂存于直流侧电容中, 直至直流侧电压高于回馈起始电压 U_{back} 。

2. 根据权利要求 1 所述的用于伺服驱动的 PWM 整流器回馈滞环控制方法, 其特征是所述整流目标电压 U_{rect} 和回馈起始电压 U_{back} 在 PWM 整流器和伺服驱动器安全工作电压范围内进行设置, 整流目标电压 U_{rect} 为伺服驱动器正常工作时需要的电压; 回馈起始电压 U_{back} 根据伺服驱动器泵升电压进行设置, 以尽量减少回馈电网的能量为设置原则。

3. 根据权利要求 1 所述的用于伺服驱动的 PWM 整流器回馈滞环控制方法, 其特征是 PWM 整流器工作状态的控制具体为:

当直流侧电压 U_{dc} 低于整流目标电压 U_{rect} 时, PWM 整流器工作于整流工作状态, 电压误差 $U_{dcErr} = U_{rect} - U_{dc}$, 电压误差经电压环 PI 控制器, 得到两相旋转 dq 坐标系下 d 轴电流环的参考值 I_d^* ;

当直流侧电压 U_{dc} 高于回馈起始电压 U_{back} 时, PWM 整流器工作于回馈工作状态, 电压误差 $U_{dcErr} = U_{back} - U_{dc}$, 电压误差经电压环 PI 控制器, 得到两相旋转 dq 坐标系下 d 轴电流环的参考值 I_d^* ;

当直流侧电压 U_{dc} 高于整流目标电压 U_{rect} 但低于回馈起始电压 U_{back} 时, PWM 整流器工作于中间工作状态, 电压环 PI 控制器输出 d 轴电流环的参考值 I_d^* 为 0, 这样 PWM 整流器就会既不处于整流工作状态也不处于回馈工作状态。

4. 根据权利要求 1 或 2 或 3 所述的用于伺服驱动的 PWM 整流器回馈滞环控制方法, 其特征是三相静止坐标系下电网电流 i_a 、 i_b 经 $3s/2s$ 变换到两相静止坐标系下得到 i_α 、 i_β , 再经 $2s/2r$ 变换到两相旋转 dq 坐标系下得到 I_d 、 I_q , dq 坐标系中定义 d 轴指向电网电势, 则 I_d 表示有功分量, 为保证整流工作状态和回馈工作状态切换至中间工作状态的平滑切换, 依据直流侧电压 U_{dc} 以及电流 I_d 的方向切换工作状态, 具体如下:

当前一时刻 PWM 整流器处于整流工作状态, 即 U_{dc} 由低于整流目标电压 U_{rect} 上升到高于整流目标电压 U_{rect} 时, 若 $I_d > 0$ 则电压误差 $U_{dcErr} = U_{rect} - U_{dc}$, 否则将电压误差 U_{dcErr} 与电压误差积分和 $U_{dcErrInt}$ 强制为 0;

当前一时刻 PWM 整流器处于回馈工作状态, 即 U_{dc} 由高于回馈起始电压 U_{back} 下降到低于回馈起始电压 U_{back} 时, 若 $I_d < 0$ 则电压误差 $U_{dcErr} = U_{back} - U_{dc}$, 否则将电压误差 U_{dcErr} 与电压误差积分和 $U_{dcErrInt}$ 强制为 0;

若前一时刻 PWM 整流器处于中间工作状态, 则将电压误差 U_{dcErr} 与电压误差积分和 $U_{dcErrInt}$ 继续强制为 0。

用于伺服驱动的 PWM 整流器回馈滞环控制方法

技术领域

[0001] 本发明属于机电控制领域,涉及 PWM 整流器,为一种用于伺服驱动的 PWM 整流器回馈滞环控制方法。

背景技术

[0002] 目前 PWM 整流器已经应用于电机驱动领域,如参考专利 [1] 和 [2],使用 PWM 整流电路代替二极管整流电路。由于二极管整流电路能量只能单相传输,电机制动时的再生电能会不断在直流侧电容上累积,产生泵升电压,需要通过能耗制动的方式抑制泵升电压,而能耗制动会造成能量的浪费,同时二极管整流电路对电网谐波污染严重,功率因数较低。PWM 整流器使用可控功率器件如 IGBT,可以实现能量的双向流动,当电机处于电动工作状态时,PWM 整流器运行于整流工作状态,从电网吸取能量;当电机处于再生制动工作状态时,PWM 整流器运行于回馈工作状态,将电机制动产生的能量回馈到电网,抑制泵升电压。PWM 整流器不仅将电机再生制动产生的能量回馈到电网,达到节能的效果,而且可以实现单位功率因数运行,极大减小对电网的谐波污染。

[0003] PWM 整流器的控制器结构图如图 1 所示, $S_1 \sim S_6$ 为可控功率器件, $VT_1 \sim VT_3$ 为电压传感器, CT_1 和 CT_2 为电流传感器, L_1 、 L_2 和 L_3 为电抗器, C 为直流侧电容。PWM 整流器的控制器输入模拟信号为电网线电压 e_{ab} 、 e_{bc} ,电网电流 i_a 、 i_b ,以及直流侧电压 U_{dc} ,控制器输出控制信号为 6 路 PWM 信号 PWM1 ~ PWM6。三相静止坐标系下电网线电压 e_{ab} 、 e_{bc} 和电流 i_a 、 i_b 经 $3s/2s$ 变换到两相静止坐标系下,得到 e_a 、 e_β 、 i_a 、 i_β ,再经 $2s/2r$ 变换到两相旋转 dq 坐标系下得到 E_d 、 E_q 、 I_d 、 I_q 。 e_a 、 e_β 经锁相后输出 $\sin \theta$ 和 $\cos \theta$,用于 $2s/2r$ 或 $2r/2s$ 变换。 $3s/2s$ 变换指 3 相静止坐标到 2 相静止坐标的变换, $2s/2r$ 变换指 2 相静止坐标到 2 相旋转坐标的变换, $2s/2r$ 变换与 $2r/2s$ 相反。dq 坐标系中定义 d 轴指向电网电势,这样 E_d 、 I_d 表示有功分量, E_q 、 I_q 表示无功分量,电流方向规定为 PWM 整流器处于整流工作状态时 I_d 大于 0,回馈工作状态时 I_d 小于 0。PWM 整流器为双闭环控制,外环为电压环,内环为电流环。电压外环的作用主要是控制 PWM 整流器直流侧电压;电流内环的作用主要是按电压外环输出的电流指令进行电流控制,采用前馈解耦的方式消除 dq 轴电流耦合关系,实现有功、无功电流分量的独立控制。参考电压 U_{ref} 与直流侧电压 U_{dc} 之差经电压环控制器,得到两相旋转 dq 坐标系下 d 轴电流环的参考值 I_d^* ,令 q 轴电流环参考值为 $I_q^* = 0$,即无功分量为零。d、q 轴电流分别经过各自的电流 PI 环控制器,产生 U_d 和 U_q , U_d 和 U_q 经坐标变换得到两相静止坐标系下电压分量 U_a 和 U_β ,再经过 SVPWM 模块后输出脉冲 PWM1 ~ PWM6,用以驱动 PWM 整流桥各开关。

[0004] 如图 1 所示,PWM 整流器电压环参考给定一般为固定值 U_{ref} ,电压环控制流程图如图 2 所示,当直流侧电压 U_{dc} 低于 U_{ref} 时,电压误差 U_{dcErr} 大于 0,经电压环 PI 控制器输出 d 轴电流 PI 环控制器的参考值 I_d^* ,此时 PWM 整流器运行于整流工作状态,从电网吸取能量;当直流侧电压 U_{dc} 高于 U_{ref} 时,电压误差 U_{dcErr} 小于 0,经 PI 控制器输出 d 轴电流 PI 环控

制器的参考值 I_d^* ，此时 PWM 整流器运行于回馈工作状态，将电机制动产生的能量回馈电网。其中图 2 的 K_I 和 K_P 为电压环 PI 控制器的参数。而在伺服驱动应用场合下，由于电机的频繁启动 / 停止或加速 / 减速，能量会频繁的回馈电网，导致 PWM 整流器的效率降低。

[0005] 参考专利 [1] 200810085700. X 用于改善电机驱动功率因数控制的系统和方法

[0006] 参考专利 [2] 201210187179. 7 一种基于能量优化的永磁电机控制装置和方法

发明内容

[0007] 本发明要解决的问题是：现有 PWM 整流器控制系统为双闭环控制，对外环的电压环采用固定值作为参考给定值，而对于伺服驱动应用场合下，电压环的这种控制方式使得电机的频繁启动 / 停止或加速 / 减速，能量会频繁的回馈电网，导致 PWM 整流器的效率降低。

[0008] 本发明的技术方案为：用于伺服驱动的 PWM 整流器回馈滞环控制方法，PWM 整流器为双闭环控制，外环为电压环，内环为电流环，PWM 整流器用于伺服驱动器时，将电压环的控制目标设定为一个区间，区间的上下限分别为整流目标电压 U_{rect} 和回馈起始电压 U_{back} ，且回馈起始电压 U_{back} 要大于整流目标电压 U_{rect} ，当直流侧电压低于整流目标电压 U_{rect} 时 PWM 整流器处于整流工作状态，从电网吸取能量；当直流侧电压高于回馈起始电压 U_{back} 时 PWM 整流器处于回馈工作状态，将电机制动产生的能量回馈电网；当直流侧电压大于整流目标电压 U_{rect} 小于回馈起始电压 U_{back} 时，定义此时 PWM 整流器的状态为中间工作状态，PWM 整流器既不进行整流也不进行能量回馈，将能量先暂存于直流侧电容中，直至直流侧电压高于回馈起始电压 U_{back} 。

[0009] 进一步的，所述整流目标电压 U_{rect} 和回馈起始电压 U_{back} 在 PWM 整流器和伺服驱动器安全工作电压范围内进行设置，整流目标电压 U_{rect} 为伺服驱动器正常工作时需要的电压；回馈起始电压 U_{back} 根据伺服驱动器泵升电压进行设置，以尽量减少回馈电网的能量为设置原则。

[0010] 进一步的，PWM 整流器工作状态的控制具体为：

[0011] 当直流侧电压 U_{dc} 低于整流目标电压 U_{rect} 时，PWM 整流器工作于整流工作状态，电压误差 $U_{dcErr} = U_{rect} - U_{dc}$ ，电压误差经电压环 PI 控制器，得到两相旋转 dq 坐标系下 d 轴电流环的参考值 I_d^* ；

[0012] 当直流侧电压 U_{dc} 高于回馈起始电压 U_{back} 时，PWM 整流器工作于回馈工作状态，电压误差 $U_{dcErr} = U_{back} - U_{dc}$ ，电压误差经电压环 PI 控制器，得到两相旋转 dq 坐标系下 d 轴电流环的参考值 I_d^* ；

[0013] 当直流侧电压 U_{dc} 高于整流目标电压 U_{rect} 但低于回馈起始电压 U_{back} 时，PWM 整流器工作于中间工作状态，电压环 PI 控制器输出 d 轴电流环的参考值 I_d^* 为 0，这样 PWM 整流器就会既不处于整流工作状态也不处于回馈工作状态。

[0014] 三相静止坐标系下电网电流 i_a 、 i_b 经 $3s/2s$ 变换到两相静止坐标系下得到 i_α 、 i_β ，再经 $2s/2r$ 变换到两相旋转 dq 坐标系下得到 I_d 、 I_q ，dq 坐标系中定义 d 轴指向电网电势，则 I_d 表示有功分量，为保证整流工作状态和回馈工作状态切换至中间工作状态的平滑切换，依据直流侧电压 U_{dc} 以及电流 I_d 的方向切换工作状态，具体如下：

[0015] 当前一时刻PWM整流器处于整流工作状态,即 U_{dc} 由低于整流目标电压 U_{rect} 上升到高于整流目标电压 U_{rect} 时,若 $I_d > 0$ 则电压误差 $UdcErr = U_{rect} - U_{dc}$,否则将电压误差 $UdcErr$ 与电压误差积分和 $UdcErrInt$ 强制为0;

[0016] 当前一时刻PWM整流器处于回馈工作状态,即 U_{dc} 由高于回馈起始电压 U_{back} 下降到低于回馈起始电压 U_{back} 时,若 $I_d < 0$ 则电压误差 $UdcErr = U_{back} - U_{dc}$,否则将电压误差 $UdcErr$ 与电压误差积分和 $UdcErrInt$ 强制为0;

[0017] 若前一时刻PWM整流器处于中间工作状态,则将电压误差 $UdcErr$ 与电压误差积分和 $UdcErrInt$ 继续强制为0。

[0018] 本发明主要对PWM整流器应用于伺服电机驱动领域时存在的问题进行分析,与普通电机不同的是,伺服电机工作时需要频繁的启动/停止或加速/减速运行,例如伺服压力机,每分钟冲压数百次,其使用的伺服电机也会频繁的启动/停止或加速/减速运行,这样导致PWM整流器也会每分钟数百次将电机再生制动产生的能量回馈给电网,由于能量经过PWM整流器时会有一定的损耗,频繁的能量回馈会降低PWM整流器的效率。针对此问题,本发明提出一种PWM整流器回馈滞环控制方法,电机再生制动产生的能量不是立即回馈电网,而是先暂存于直流侧电容中,这部分能量在下次电机启动或加速时可以使用,当电容电压高于回馈起始定值时才进行能量回馈,这样可以减少能量回馈的次数和回馈能量的大小,降低了能量回馈过程中的损耗,提高了伺服驱动装置中PWM整流器的效率。

附图说明

[0019] 图1为现有技术中PWM整流器控制系统结构图。

[0020] 图2为现有技术的电压环控制流程图。

[0021] 图3为本发明的电压环回馈滞环控制器输入。

[0022] 图4为本发明的电压环回馈滞环控制流程图。

[0023] 图5为PWM整流器经本发明的电压环改进前实验结果。

[0024] 图6为PWM整流器经本发明的电压环改进前实验结果局部放大图。

[0025] 图7为PWM整流器在本发明方法下的电压环回馈滞环控制实验结果。

[0026] 图8为PWM整流器在本发明方法下的电压环回馈滞环控制实验结果局部放大图。

具体实施方式

[0027] 针对现有技术中,PWM整流器在伺服驱动中应用时遇到的问题,本发明对PWM整流器的电压环控制进行改进,并提出一种回馈滞环控制方法,此控制方法中电压环控制的目标不再是一个固定值,而是一个区间,如图3所示,区间的上下限分别为整流目标电压 U_{rect} 和回馈起始电压 U_{back} ,且回馈起始电压 U_{back} 要大于整流目标电压 U_{rect} 。当直流侧电压低于整流目标电压 U_{rect} 时PWM整流器处于整流工作状态,当直流侧电压高于回馈起始电压 U_{back} 时PWM整流器处于回馈工作状态,当直流侧电压大于整流目标电压 U_{rect} 小于回馈起始电压 U_{back} 时,定义此时PWM整流器的状态为中间工作状态,整流器既不进行整流也不进行能量回馈,优点是电机再生制动产生的能量不是立即回馈电网,而是先暂存于直流侧电容中,这部分能量在下次电机启动或加速时可以使用,可以减少不必要的能量回馈,提高PWM整流器的效率。

[0028] 在进行控制区间的设置时,整流目标电压和回馈起始电压需要在 PWM 整流器和伺服驱动器安全工作电压范围内进行设置,整流目标电压为伺服驱动器正常工作时需要的电压;回馈起始电压根据伺服驱动器泵升电压进行设置,原则是尽量减少回馈电网的能量。

[0029] 综上,在电压环回馈滞环控制方法中 PWM 整流器有三种工作状态,整流工作状态、中间工作状态和回馈工作状态,进一步的,回馈滞环控制的重点还在于三种工作状态的平滑切换,为保证三种工作状态的平滑切换,除需要依据直流侧电压外,还需要对电流 I_d 的方向进行判断。

[0030] 电压环回馈滞环控制流程图如图 4 所示,在现有技术的图 2 的基础上增加了 PWM 整流器工作状态的判断和切换:

[0031] 当直流侧电压 U_{dc} 低于整流目标电压 U_{rect} 时, PWM 整流器工作于整流工作状态,令表示工作状态的标志位 $Mode = 1$,电压误差 $UdcErr = U_{rect} - U_{dc}$,经电压环 PI 控制器输出 d 轴电流环参考 I_d^* ;

[0032] 当直流侧电压 U_{dc} 高于回馈起始电压 U_{back} 时, PWM 整流器工作于回馈工作状态,令标志位 $Mode = 2$,电压误差 $UdcErr = U_{back} - U_{dc}$,经电压环 PI 控制器输出 d 轴电流环参考 I_d^* ;

[0033] 当直流侧电压 U_{dc} 高于整流目标电压 U_{rect} 但低于回馈起始电压 U_{back} 时, PWM 整流器工作于中间工作状态,标志位 $Mode = 0$,电压环 PI 控制器输出 d 轴电流环参考 I_d^* 应当为 0,这样 PWM 整流器就会既不处于整流工作状态也不处于回馈工作状态。

[0034] 但是由于电压环 PI 控制器中积分环节存在惯性,输出 d 轴电流环参考 I_d^* 不会立即改变方向,如果强制 I_d^* 立即为 0,会造成电压环输出的波动,此时为保证工作状态的平滑切换,需要根据电流 I_d 的方向进行状态的切换,具体切换方式如下:

[0035] 当前一时刻 PWM 整流器处于整流工作状态 ($Mode = 1$),即 U_{dc} 由低于整流目标电压 U_{rect} 上升到高于整流目标电压 U_{rect} 时,若 $I_d > 0$ 则电压误差 $UdcErr = U_{rect} - U_{dc}$,否则将电压误差 $UdcErr$ 与电压误差积分和 $UdcErrInt$ 强制为 0,同时令 $Mode = 0$;

[0036] 当前一时刻 PWM 整流器处于回馈工作状态 ($Mode = 2$),即 U_{dc} 由高于回馈起始电压 U_{back} 下降到低于回馈起始电压 U_{back} 时,若 $I_d < 0$ 则电压误差 $UdcErr = U_{back} - U_{dc}$,否则将电压误差 $UdcErr$ 与电压误差积分和 $UdcErrInt$ 强制为 0,同时令 $Mode = 0$;

[0037] 若前一时刻 PWM 整流器处于中间工作状态 ($Mode = 0$),则将电压误差 $UdcErr$ 与电压误差积分和 $UdcErrInt$ 继续强制为 0,保持标志位 $Mode = 0$ 。

[0038] 本发明相比现有 PWM 整流的双闭环控制,仅针对电压环的控制目标进行了改进,电流环控制为现有技术,上述电压误差积分和 $UdcErrInt$ 以及电压环输出的参考值 I_d^* 的计算为电压环 PI 控制器的现有技术,不再详述。

[0039] 电压环控制改进前后实验结果如图 5、图 6、图 7、图 8 所示,每个图形分别有三条曲线,分别为直流侧电压 U_{dc} 、电网 A 相相电压 e_a 、电网 A 相电流 i_a ,PWM 整流器处于整流工作状态时电网相电压 e_a 与电网电流 i_a 同相位,PWM 整流器处于回馈工作状态时电网相电压 e_a 与电网电流 i_a 相位相反,依次作为判断 PWM 整流器实际工作状态的依据。电压环控制改进前实验结果如图 5、图 6 所示,当直流侧电压 U_{dc} 高于 U_{ref} 时,见图 6 中 a 区域, e_a 与 i_a 相位相反,PWM 整流器运行于回馈工作状态;直流侧电压 U_{dc} 低于 U_{ref} 时,见图 6 中 b 区域, e_a 与 i_a

同相位, PWM 整流器运行于整流工作状态。电压环控制改进后, 即本发明的回馈滞环控制实验结果如图 7、图 8 所示, 当直流侧电压 U_{dc} 高于回馈起始电压 U_{back} 时, 见图 8 中 b 区域, e_a 与 i_a 相位相反, PWM 整流器工作于回馈工作状态; 当直流侧电压 U_{dc} 低于整流目标电压 U_{rect} 时, 见图 8 中 d 区域, e_a 与 i_a 相位相同, PWM 整流器工作于整流工作状态; 当直流侧电压 U_{dc} 高于整流目标电压 U_{rect} 但低于回馈起始电压 U_{back} 时, 见图 8 中 a、c 区域, PWM 整流器工作于中间工作状态, 电网电流 i_a 基本为 0, 电网和直流侧电容之间没有能量的流动。若直流侧电压一直低于回馈起始值 U_{back} , 则不会有能量回馈到电网。

[0040] 在伺服电机驱动领域, 本发明的回馈滞环控制可以减少能量回馈的次数和回馈能量的大小, 降低了能量回馈过程中的损耗, 提高了伺服驱动装置中 PWM 整流器的效率。

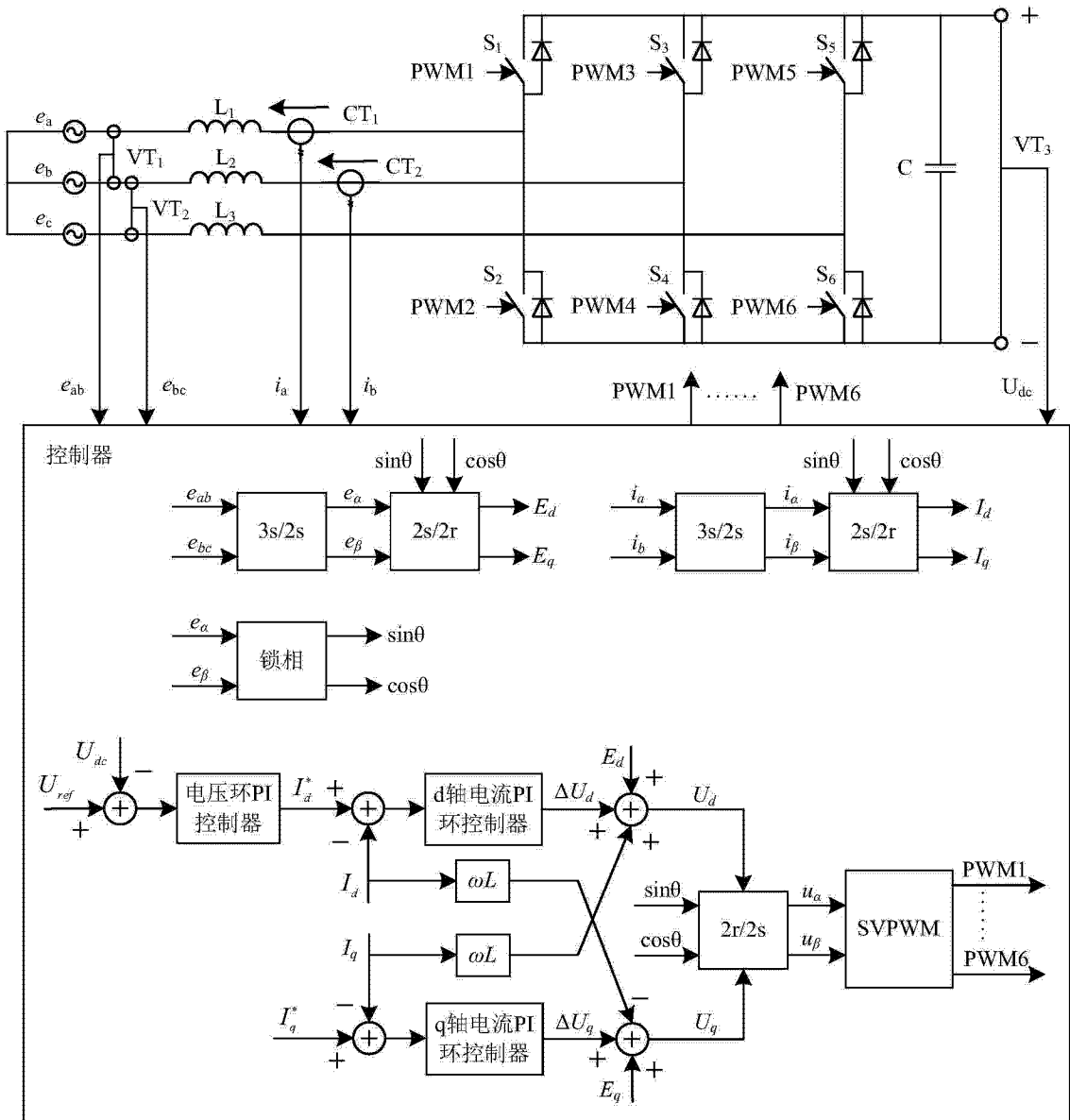


图 1

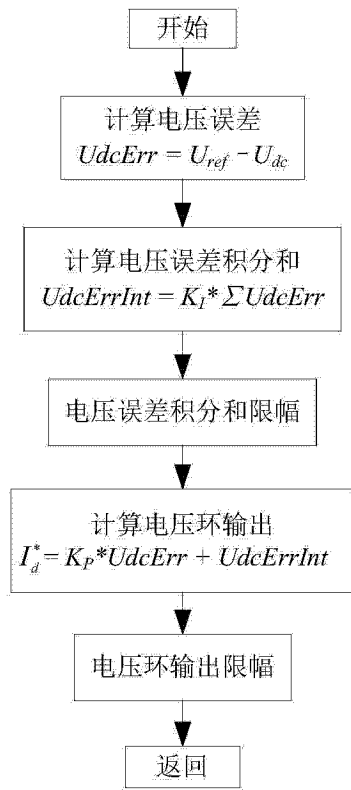


图 2

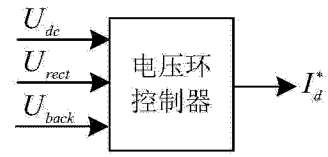


图 3

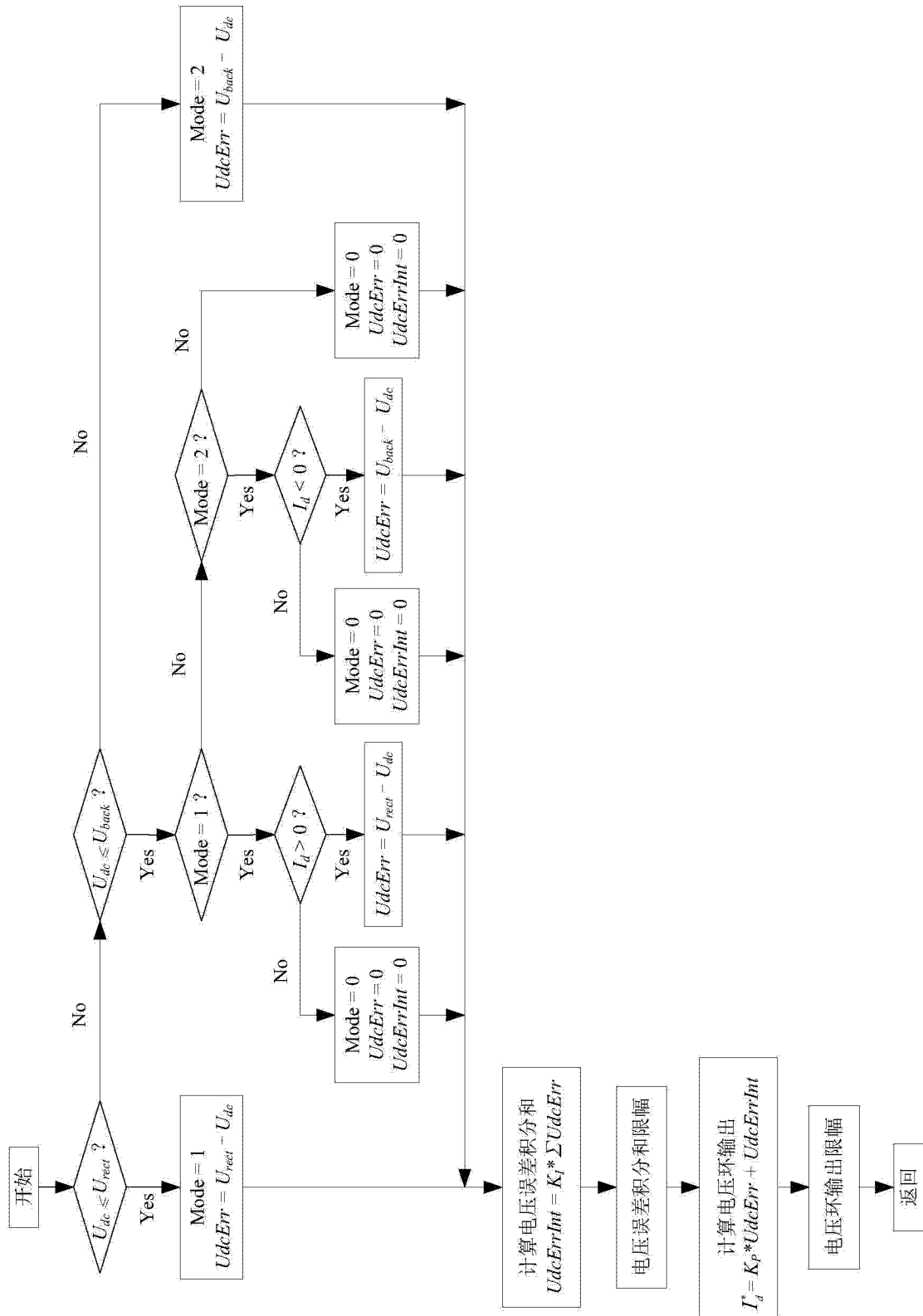


图 4

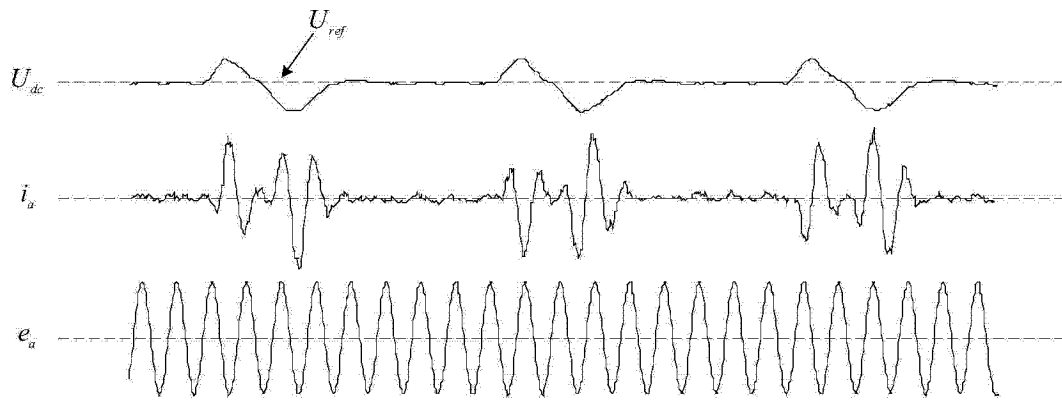


图 5

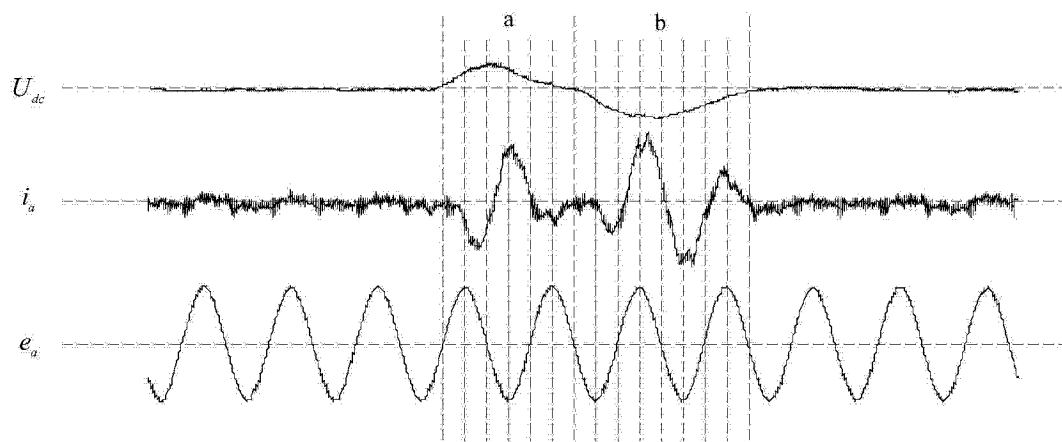


图 6

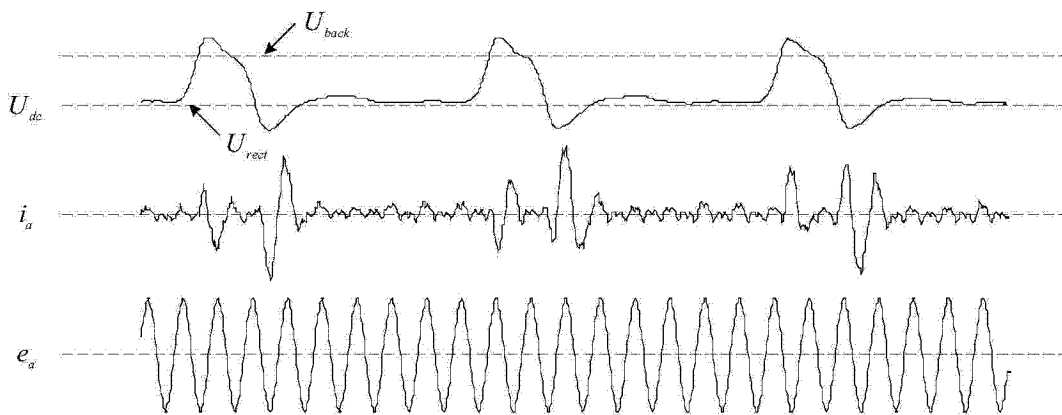


图 7

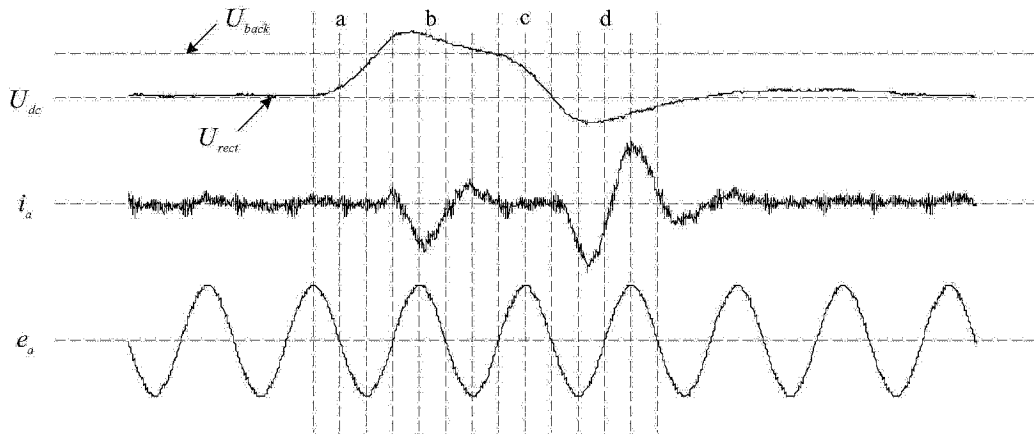


图 8