

谐振极逆变器驱动无刷直流电机的控制器设计

贺虎成

(西安科技大学, 陕西 西安 710054)

摘要:针对应用于无刷直流电机驱动系统的新型谐振极软开关电压源逆变器和新型 $T_{PWM}+T_{ON}$ 控制策略,利用脉宽调制专用集成芯片和复杂可编程逻辑器件,设计了新型谐振极电压源逆变器驱动无刷直流电机(BLDCM)的控制器。数字仿真和实验结果表明,设计的控制器验证了电路结构、理论分析和控制策略的正确性与可行性。

关键词:逆变器;无刷直流电机;脉宽调制;控制器

中图分类号:TM464

文献标识码:A

文章编号:1000-100X(2010)07-0009-03

Controller Design of Brushless DC Motor Driven by Resonant Pole Inverter

HE Hu-cheng

(Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: According to the principle of novel resonant pole(RP) soft-switching voltage source inverter and control strategy of $T_{PWM}+T_{ON}$ for brushless DC motor(BLDCM) drive system, a controller is designed for BLDCM driven by RP inverter which use of pulse width modulation(PWM) specific integrated chip and complex programmable logic device(CPLD). The Digital simulation and experimental results show that the soft switching inverter structure, theoretical analysis and control scheme are verified by the designed controller.

Keywords: inverter; brushless DC motor; pulse width modulation; controller

Foundation Project: Supported by Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China(No.2009JQ7012)

1 引言

无刷直流电机(Brushless Direct Current Motor, 简称 BLDCM)以其优越的性能获得了迅猛发展^[1],然而, BLDCM 通常采用硬开关逆变器驱动,它存在的一些问题限制了大功率 BLDCM 驱动系统功率密度和性能的进一步提高。

为解决硬开关逆变器的诸多问题,人们研究开发了软开关技术。用于交流电机驱动的软开关电压源逆变器主要包括谐振直流环节逆变器和谐振极逆变器两种^[2]。谐振直流环节软开关逆变器的研究产生了许多拓扑和控制方法^[3],该类逆变器共同的特点是在直流母线上串接一个开关器件,其导通损耗将严重影响逆变器效率的提高,且直流母线凹槽也会影响直流电压的利用率。

谐振极逆变器的辅助电路接在逆变器的 3 个输出端,直流环节母线电压不受谐振的影响。这里探讨了谐振极逆变器驱动 BLDCM 时的控制器设计问题。为了便于后续分析,先简单介绍谐振极软开关逆变器的工作原理。

2 谐振极软开关逆变器的工作原理

提出了一种专用于 BLDCM 驱动系统的谐振极软开关逆变器,如图 1 所示^[4]。三相桥臂的极点连接

谐振网络。每相谐振网络含有 1 个双向开关和 1 个小的缓冲谐振电容,三相共用 1 个小的谐振电感和 2 个形成直流母线中点电压的电容。

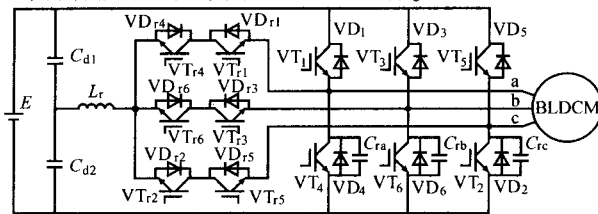


图 1 BLDCM-RPI 电压源逆变器

该谐振极软开关逆变电路具有以下特点:①主功率开关器件的 PWM 调制开通与关断均在零电压开关(ZVS)条件下进行;②辅助双向开关的开通与关断均在零电流开关(ZCS)条件下进行,且其电压应力仅为直流母线电压的一半;③谐振过程所用的时间较短且只用 1 个电感,谐振单元消耗的能量较小;④续流二极管实现了软性关断,克服了反向恢复问题;⑤主开关和辅助开关器件的开关频率均为 PWM 频率的一半,有利于系统的高频化运行。

BLDCM 的 6 个状态完全独立可控,为简化分析过程,以 ac 相通电的 1 个工作状态为例介绍原理,即电流从 a 相流入电机,c 相流出电机。该型逆变器的工作状态分为上管调制和下管调制。

2.1 $H_{PWM-LON}$ 工作方式

$H_{PWM-LON}$ 方式时 BLDCM 工作在上管 VT_1 PWM 调制、下管 VT_2 恒通的状态时段。 $H_{PWM-LON}$ 逆变器过渡状态时的等效电路如图 2 所示,电压和电流的参考方向如图中标定。图 3 示出 $H_{PWM-LON}$ 逆变器状

基金项目:陕西省自然科学基金研究计划资助项目(2009JQ7012)

定稿日期:2010-01-26

作者简介:贺虎成(1977-),男,甘肃渭源人,博士,研究方向为软开关逆变技术、智能自动化装置、运动控制技术。

态过渡期间动作时序。图中, PWM 为调制信号, d_{VT1} , d_{VT4} , d_{VT1} , d_{VT2} 分别为功率管 VT_{r1} , VT_{r4} , VT_1 , VT_2 的控制信号, u_{Ca} 为电容 C_{ra} 两端的电压, i_{Lr} 为谐振电感 L_r 的电流。1 个 PWM 周期可分为 6 个工作模式。

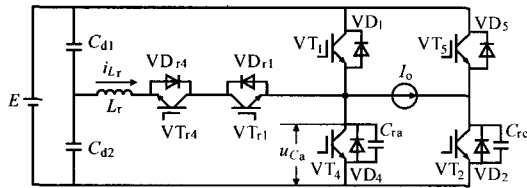


图 2 逆变器 $H_{PWM-L_{ON}}$ 运行等效电路

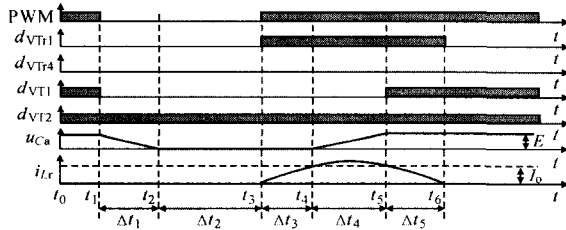


图 3 逆变器 $H_{PWM-L_{ON}}$ 运行动作时序

(1) 模式 1 [$t_0 \sim t_1$] 假定这是电路的初始工作状态, VT_1, VT_2 导通, 辅助谐振电路不工作, 与硬开关逆变器驱动 BLDCM 工作情况相同。电源向电机负载提供能量, 现期望 VT_1 PWM 调制关断。

(2) 模式 2 [$t_1 \sim t_2$] 当 $t=t_1$ 时, 由于存在 C_{ra} , 在 ZVS 条件下直接关断 VT_1 , C_{ra} 向电机放电。当 $t=t_2$ 时, 电容放电完毕。

(3) 模式 3 [$t_2 \sim t_3$] 当 $t=t_2$ 时, $U_{Ca}(t_2)=0$, 续流二极管 VD_4 导通, 此时完全等效于传统逆变器工作状态。

(4) 模式 4 [$t_3 \sim t_4$] 当 $t=t_3$ 时, PWM 逆变桥需要开关操作, 即 VT_1 调制开通。辅助谐振电路要为逆变桥开关提供 ZVS 条件, 开通 VT_{r1} , 由于 i_{Lr} 不能突变, 所以该开通为 ZCS。则 i_{Lr} 正向线性增加, 使流过 VD_4 的电流线性减小。当 $t=t_4$ 时, i_{Lr} 和负载电流 I_o 相等, 使 VD_4 软关断。

(5) 模式 5 [$t_4 \sim t_5$] 当 $t=t_4$ 时, i_{Lr} 和 I_o 相等且继续增加, i_{Lr} 中的一部分和 I_o 保持平衡, 另一部分使 L_r 和 C_{ra} 自然谐振, C_{ra} 电压上升。

(6) 模式 6 [$t_5 \sim t_6$] 当 $t=t_5$ 时, $I_{Lr}(t_5)=I_o, U_{Ca}(t_5)=E$, 故 C_{ra} 停止充电, 此时开通 VT_1 则为 ZVS 动作。 VT_1 ZVS 开通后直流电源向电机提供能量, 则 L_r 两端承受负电压使其正向电流迅速减小到零, 然后即可 ZCS 关断 VT_{r1} 。

当 $t=t_6$ 时, 电路状态又回到模式 1, 完成了一次 $H_{PWM-L_{ON}}$ 运行。

2.2 $H_{ON-L_{PWM}}$ 工作方式

$H_{ON-L_{PWM}}$ 方式时 BLDCM 工作在 VT_2 PWM 调制, VT_1 恒通的状态时段。工作过程类似 $H_{PWM-L_{ON}}$ 一次运行, 只不过辅助开关 VT_2 需要开通, 为 VT_2 的 PWM 调制开通提供 ZVS 条件。

3 谐振极软开关逆变器的 PWM 控制

3.1 传统 PWM 控制

$H_{PWM-L_{ON}}, H_{ON-L_{PWM}}, PWM-ON, ON-PWM, H_{PWM-L_{PWM}}$ 为 5 种常用的调制方式, 前 4 种常称为单斩方式, 后一种称为双斩方式。 PWM-ON 方式指各功率器件在导通的前 60° 进行调制, 后 60° 保持恒通; ON-PWM 方式指各功率器件在导通的前 60° 恒通, 后 60° 进行 PWM 调制; $H_{PWM-L_{PWM}}$ 方式指上下桥臂各功率器件在导通的 120° 内同时进行 PWM 调制。若将传统的 PWM 方法用于新型谐振极软开关逆变器, 将会引起严重的直流电源中点电位的不平衡, 甚至电路不能正常工作。为此, 需采用 $T_{PWM}+T_{ON}$ 控制。

3.2 $T_{PWM}+T_{ON}$ 控制

$T_{PWM}+T_{ON}$ 控制的基本思想是将两个 PWM 周期作为逆变器开关的一个控制周期, 在导通的 120° 的区间里, 开关器件在一个 PWM 开关周期进行 PWM 调制, 在另一个 PWM 开关周期处于恒通状态, 并依次循环工作。在同一个开关周期中, 两个工作开关器件的工作状态不同, 一个开关器件进行 PWM 调制, 另一个处于恒通工作状态。

$T_{PWM}+T_{ON}$ 控制逻辑如图 4 所示。若 BLDCM 处于 VT_1, VT_2 为工作器件的状态。在 $(k+1)T$ 开关周期, VT_1 开通后处于恒通状态, VT_2 则处于调制状态。在 $(k+2)T$ 开关周期, VT_1 为 PWM 调制状态, VT_2 开通后则处于恒通状态。开关需要开通时, 谐振网络为逆变器主电路的开关器件创造零电压条件, 其控制时间安排在 PWM 信号的上升沿, 并让逆变桥开关的导通稍微滞后一定时间, 以便在开关端电压谐振到零时动作。开关需要关断时, 因存在缓冲电容, 可在 PWM 信号的下降沿直接 ZVS 关断。

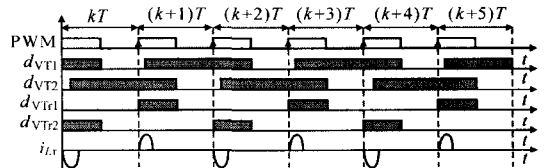


图 4 $T_{PWM}+T_{ON}$ 控制逻辑

4 逆变器 PWM 控制器原理

首先, 控制器要能根据 BLDCM 的位置反馈信号实现电机的正常换相; 其次, 要能实现 BLDCM 在硬开关逆变器和谐振极软开关逆变器驱动下的 PWM 控制。设计的控制器采用 PWM 脉宽集成芯片 SG3525 和 CPLD, 控制电路的 PWM 信号源由集成芯片 SG3525 实现。

$T_{PWM}+T_{ON}$ 调制策略、时序逻辑控制和换相逻辑综合等由 MAX7000S 系列器件 EPM7128SL84 完成, 可对软开关运行、硬开关运行、停车以及保护信号进行逻辑处理, 输出逆变器相应开关器件的控制信号。图 5 示出 CPLD 逻辑综合电路接口。下面对接

口电路内部各功能模块和管脚功能做简要说明。

时钟与定时逻辑单元：通过外部时钟输入引脚 CK, 产生 PWM 调制所需的各种时间序列。

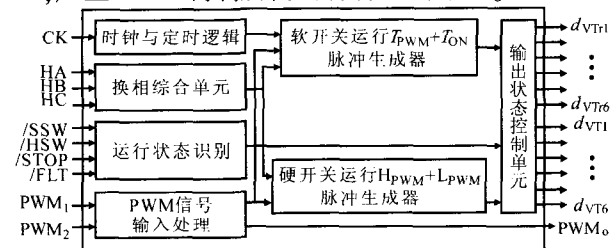


图5 CPLD逻辑综合电路接口

换相综合单元：根据 BLDCM 的霍尔逻辑信号, 产生 BLDCM 三相 6 状态 120° 的工作方式。

运行状态识别单元：根据外部给定信号/SSW (软开关运行启动信号输入, 下降沿脉冲有效), /HSW (硬开关运行启动信号输入, 下降沿脉冲有效), /STOP (停车信号输入, 下降沿脉冲有效) 和 /FLT (故障信号输入, 低电平有效), 辨识电机的运行状态。

PWM 信号输入处理单元：接收 SG3525 的两路 PWM 脉冲信号, 并对两路信号进行处理, 产生内部使用的 PWM 控制周期信号。

软开关运行 $T_{PWM}+T_{ON}$ 脉冲信号生成器：根据 $T_{PWM}+T_{ON}$ 调制策略, 生成 $T_{PWM}+T_{ON}$ 调制时的辅助开关控制信号 $d_{VT1} \sim d_{VT6}$ 和逆变桥开关控制信号 $d_{VT1} \sim d_{VT6}$ 。

硬开关运行 $H_{PWM}+L_{PWM}$ 脉冲生成器：产生硬开关双斩运行的逆变桥开关控制信号 $d_{VT1} \sim d_{VT6}$ 。

输出状态控制单元：根据电机运行状态综合软开关和硬开关脉冲生成器的脉冲信号, 给出接口电路最终的控制信号。

PWM0：内部 PWM 运算结果的输出测试信号。

5 实验结果

图 6 示出实验波形。实验时 BLDCM 的额定电压为 24 V, 极数为 4; PWM 载波频率为 20 kHz。

由图 6a 可知, 主开关器件实现了 ZVS 开通和关断。开通时当开关两端电压降到零后驱动信号才产生, 关断时在驱动信号完全消失后开关两端电压才斜线上升; 由图 6b 可知, 辅助开关的关断亦为 ZCS, 开通时开关两端电压与电流基本无重叠, 实现了 ZCS 开通; 由图 6c, d 可知, 当电感中流过正向电流时, 上桥开关两端电压下降; 当电感中流过负向电流时, 下桥开关两端电压下降, 开关端电压降到零时可实现主开关的 ZVS 开通。因有谐振缓冲电容存在, 开关关断时辅助电路不工作, 电感无电流流过。图 6e 为 PWM 信号与 $T_{PWM}+T_{ON}$ 控制时主开关器件的控制信号波形。主开关器件在一个 PWM 周期恒通, 另一个 PWM 周期进行 PWM 调制, 与前述 $T_{PWM}+T_{ON}$

理论吻合。从理论分析部分可知, 电感电流的不同方向表示不同的辅助开关器件在工作, 可知辅助开关器件的开关频率仅为 PWM 信号频率的一半。

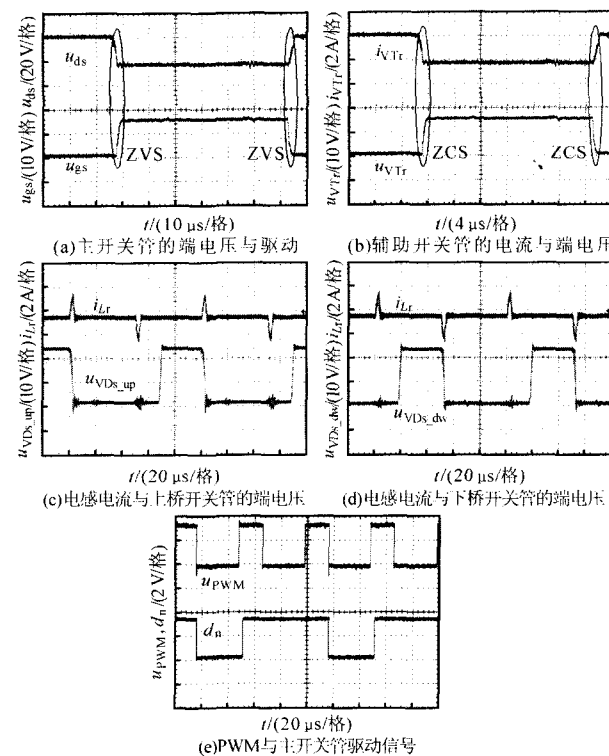


图6 实验波形

6 结论

利用 CPLD 和 SG3525 设计了无刷直流电机的控制器, 它采用谐振极软开关逆变器驱动和 $T_{PWM}+T_{ON}$ 控制。使用 MAX+PLUS II 对 CPLD 实现谐振极逆变器的控制功能和硬开关状态进行了仿真, 软件仿真和实验结果均证明设计的控制器能满足无刷直流电机的谐振极逆变器驱动和相应的 $T_{PWM}+T_{ON}$ 控制策略, 这对于谐振极逆变器无刷直流电机驱动系统的工程化应用具有重要的实际意义。

参考文献

- [1] 李钟明, 刘卫国. 稀土永磁电机[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [2] Jung G Cho, Hack S Kim, Gyu H Cho. Novel Soft Switching PWM Converter Using a New Parallel Resonant DC-Link[A]. Proc. PESC'91[C]. 1991: 241-247.
- [3] Edison Roberto Cabral da Silva, Marcelo Cabral Cavalcanti, Cursino Brandao Jacobina. Comparative Study of Pulsed DC-Link Voltage Converters[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2003, 18(4): 1028-1033.
- [4] 贺虎成, 刘卫国, 解恩. 一种新型无刷直流电机谐振极软开关逆变器研究[J]. 电工技术学报, 2008, 23(12): 99-106.