

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司

支持

王鹏, 陈奉国.
基于恒流自适应功能的大功率变频器预
充电方案设计.
电机与控制应用, 2022, 49(3): 99.



SEARI
上電科

NCMS
上科电机

www.nems.com.cn

掌握电机行业制造核心技术,
辐射智能制造产业发展



· 业务范围 ·



异步电机装配线



永磁电机装配线



悬挂链电机喷漆线

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.nems.com.cn

地址: 上海市武宁路505号 手机: 18918357509 电话: 021-62574990-436

传真: 021-62163904 邮箱: wangcj@seari.com.cn

基于恒流自适应功能的大功率变频器 预充电方案设计

王 鹏, 陈奉国

[施耐德电气(中国)有限公司研发中心, 上海 200120]

摘 要: 针对传统变频器预充电电路需要光耦隔离和额外电路参与, 以及软件算法复杂、调试不便等弊端, 设计出了一种具有恒流自适应功能的预充电电路。该电路采用类似 Buck 电路的结构, 自适应维持闭环稳定, 为晶闸管触发提供相对稳定的供电, 可以实现每相晶闸管交错开通而不再依赖软件参与, 同时不需要光耦隔离, 也不必关注开关电源优先工作的时序问题。PSIM 仿真与实物平台测试结果吻合。测试波形表明, 该电路方案切实可行, 调试方便, 具有一定的参考价值。

关键词: 变频器; 晶闸管; 预充电; 恒流自适应

中图分类号: TM301.2; TN773 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)03-0099-04

doi: 10.12177/emca.2021.185

Design of Precharge Scheme for High Power Inverter Based on Constant Current Adaptive Function

WANG Peng, CHEN Fengguo

[R&D Center of Schneider Electric (China) Co., Ltd., Shanghai 200120, China]

Abstract: Aiming at the disadvantages of traditional inverter precharge circuit such as optocoupler isolation and additional circuit participation, complex software algorithm and inconvenient debugging, a precharge circuit with constant current adaptive function is designed. The circuit adopts a structure similar to buck circuit. It adaptively maintains closed-loop stability, provides relatively stable power supply for thyristor triggering, and can realize alternate opening of each phase thyristor without relying on software participation. At the same time, there is no need to pay attention to the optocoupler isolation and the timing issue of switching power supply priority. The PSIM simulation results are consistent with the test results of the physical platform. The test waveform shows that the circuit scheme is feasible and easy to debug, and it has certain reference value.

Key words: inverter; thyristor; precharge; constant current adaption

0 引 言

变频器在现代工业控制领域有着广泛应用, 其拓扑结构中需加入预充电电路, 作为上电时限制储能电容的充电电流, 防止过大电流冲击损坏功率模块^[1-2]。目前大功率变频器(45 kW 以上)预充电电路一般采用微控制单元(MCU)控制晶

闸管开通角度的方案来实现^[3-6]。该方案结构简单, 技术成熟, 但芯片控制方式复杂, 调试不便。为进一步优化预充电电路的实现方案, 本文设计了一种具有恒流自适应功能的晶闸管控制方法, 全部使用硬件实现, 不再需要 MCU 发波支持, 同时避免了光耦和开关电源时序问题, 一定程度上简化了调试难度。

收稿日期: 2021-11-22; 收到修改稿日期: 2022-01-12

作者简介: 王 鹏(1986—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力电子与电气传动。

1 传统大功率变频器预充电电路

大功率变频器一般采用晶闸管加二极管作为半控整流模块单元。图 1 为其原理框图。当三相交流接入时,同步电路采集输入电压并转换成电平信号,由光耦隔离送入 MCU,再通过算法控制晶闸管的开通角度,使得母线电压逐步抬升,充电完成后,MCU 依然要精确控制晶闸管的开通角使其工作于二极管模式。

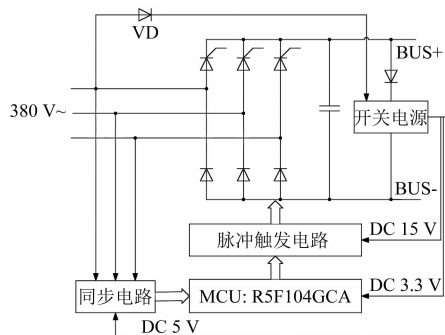


图 1 传统大功率变频器预充电电路框图

这种电路主要存在以下问题:(1)因同步电路采样的信号需要光耦隔离,在高低温恶劣环境中光耦性能需要额外补偿;(2)使用 MCU 软件控制晶闸管开通角,算法复杂,调试不便;(3)必须注意时序问题。需要额外增加电路以使开关电源最先工作,保证控制电路优先供电。

2 新型大功率变频器预充电电路

新型大功率变频器预充电电路原理框图如图 2 所示。在工作过程中主要由二极管充电和晶闸管控制单元两个环节组成。与传统电路拓扑相比,使用二极管 VD4 和电阻 R_1 直接给母线充电,母线电压平稳后进入晶闸管控制阶段,即半控整流模块在变频器运行中充当整流角色。晶闸管控制单元主要是对变频器工作过程中三相电压和母线电压进行采集,通过恒流自适应电路实现 3 路晶闸管门极导通角的良好控制,以此实现对整个变频器运行系统的稳定控制。二极管 VD4 的最大电流由输入线电压、 R_1 及母线电容决定,从充电时间和充电电流两方面折中考虑,电阻 R_1 一般取 $30 \sim 40 \Omega$ 为宜,此时与传统预充电方案相比,充电时间基本一致。

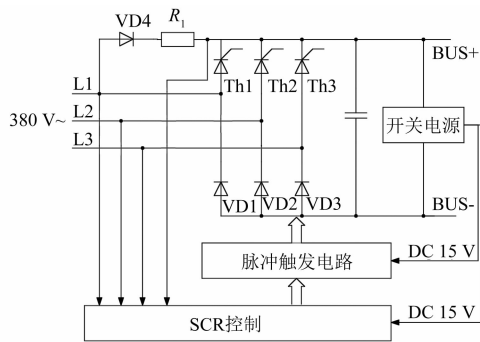


图 2 新型大功率变频器预充电电路框图

2.1 晶闸管控制单元设计

晶闸管控制单元是变频器预充电电路中非常重要的环节,在具体的工作过程中主要分为以下步骤:(1)接收三相输入电压和母线电压信号,与预设参考电压进行比较产生各相晶闸管门极驱动 MOS 的主信号,以便产生每相晶闸管交错开通约 180° 的特征;(2)控制晶闸管门极驱动 MOS 的供电 VG。由 MOS、二极管、电感、电流采样电阻构成恒流源,以及放大电路和滞回比较器放在一起组成闭环小系统,实现 MOS 门极自适应通断,维持闭环系统稳定。在母线电压平稳后,该闭环自适应系统立即开始工作,其中对电流的限制既实现了自适应振荡,又实现了对晶闸管门极开通时的电流限制要求。同时添加了过流保护和欠压保护模块,也用于控制 MOS 通断,使得控制功能更加完善,兼具过流保护和欠压保护功能,从模块化设计角度来看,结构清晰,便于仿真和调试,大大简化设计工作量。具体结构如图 3 所示。

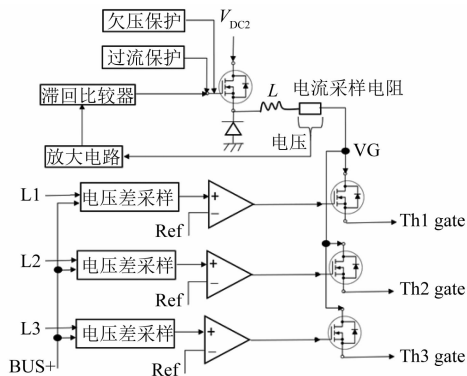


图 3 晶闸管控制单元结构

2.2 恒流自适应供电

晶闸管是电流驱动型器件,恒流自适应电路为

3 路晶闸管门极驱动提供足够电流,其电路结构如图 4 所示。MOS Q1, 电感 L , 二极管 VD 构成类 Buck 电路, R_3 为电流采样电阻, 运放 OP1 及电阻 $R_4=R_5, R_6=R_7$ 构成放大电路, 放大系数为 α :

$$\alpha = R_7/R_5 \quad (1)$$

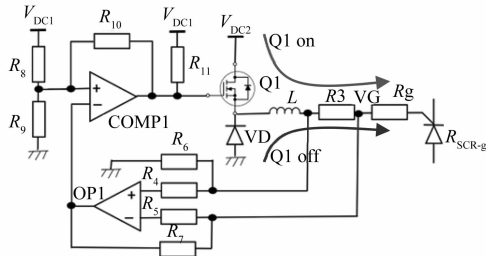


图 4 恒流自适应电路

比较器 COMP1 和电阻 R_8, R_9, R_{10} 构成滞回比较电路, 输出只有 0 V 和 V_{DC1} 两种状态, 其正向阈值电压为

$$V_{t+} = V_{DC1} \cdot \frac{R_9 \parallel R_{10}}{R_8 + R_9 \parallel R_{10}} \quad (2)$$

负向阈值电压为

$$V_{t-} = V_{DC1} \cdot \left(\frac{R_9 \parallel R_{10}}{R_8 + R_9 \parallel R_{10}} + \frac{R_8 \parallel R_9}{R_{10} + R_8 \parallel R_9} \right) \quad (3)$$

因此滞回回差电压:

$$\Delta V_t = V_{t-} - V_{t+} = V_{DC1} \cdot \frac{R_8 \parallel R_9}{R_{10} + R_8 \parallel R_9} \quad (4)$$

同时, 滞回回差由电感电流纹波的峰谷值来决定, 即:

$$\Delta V_t = \alpha \Delta I \cdot R_3 \quad (5)$$

式中: ΔI 为电感电流纹波。若同时设定 I_{g1} 为电流纹波谷值, I_{g2} 为电流纹波峰值, 即: $\Delta I = I_{g2} - I_{g1}$ 。

在电流纹波谷值处, Q1 开通, 滞回比较器正向阈值电压对应为该谷值采样后的放大值, 即:

$$V_{t+} = \alpha I_{g1} \cdot R_3 \quad (6)$$

由式(2)、式(6)得:

$$I_{g1} = \frac{V_{DC1}}{\alpha \cdot R_3} \cdot \frac{R_9 \parallel R_{10}}{R_8 + R_9 \parallel R_{10}} \quad (7)$$

当 Q1 打开时, 电感 L 充电, 电感电流近似斜坡上升, 根据基尔霍夫电压定律, 即有以下算式:

$$L \frac{\Delta I}{\Delta t_1} + \frac{I_{g1} + I_{g2}}{2} \cdot (R_3 + R_g + R_{SCR-g}) = V_{DC2} \quad (8)$$

式中: Δt_1 为 Q1 开通时间; R_g 为晶闸管门极驱动电阻; R_{SCR-g} 为晶闸管门极内部等效电阻。

当 Q1 断开时, 电感 L 放电, 电感电流近似斜坡下降, 根据基尔霍夫电压定律, 即有以下算式:

$$L \frac{\Delta I}{\Delta t_2} = \frac{I_{g1} + I_{g2}}{2} \cdot (R_3 + R_g + R_{SCR-g}) + V_D \quad (9)$$

式中: Δt_2 为 Q1 关断时间; V_D 为二极管 VD 正向导通电压。

由式(7)、式(5)可以看出, 当电路电阻值确定时, 电感电流纹波 ΔI 及谷值 I_{g1} 都是确定的, 与 R_3 后端的负载无关, 因此可以看作是带有纹波的固定电流源。

三相晶闸管依次交替开通约 180° , 在某一时刻, 只存在一相晶闸管开通或者两相同时开通这两种状态。这两种状态相当于 $R_g + R_{SCR-g}$ 的值变更, 由式(8)、式(9)可以看出, 此时电路会自适应调节 Q1 的占空比达到新的平衡, $\Delta t_1, \Delta t_2$ 自动更新, 但电感电流平均值不变。

2.3 电路仿真

使用 PSIM 对电路进行仿真, 参数选择如下: $L = 220 \mu\text{H}$, $R_3 = 0.2 \Omega$, $R_4 = R_5 = 1.5 \text{ k}\Omega$, $R_6 = R_7 = 15 \text{ k}\Omega$, $R_8 = 30.1 \text{ k}\Omega$, $R_9 = 18.2 \text{ k}\Omega$, $R_{10} = 100 \text{ k}\Omega$, $V_{DC1} = 5 \text{ V}$, $V_{DC2} = 15 \text{ V}$ 。理论计算滞回回差电压 0.51 V , 电感电流纹波 0.25 A , 纹波峰值 1.1 A 。仿真波形如图 5 所示, 其中图 5(b) 是图 5(a) 中 t 时刻的放大波形, V_L 为 L 两端电压, $I(L)$ 和 $I(R_g)$ 分别表示电感 L 和电阻 R_g 的电流。仿真结果显示电感电流纹波 0.2536 A , 纹波峰值 1.1017 A , 这与理论计算结果一致。 R_3 处的电流可以看成是带有纹波的固定电流源, 形如图 5 中的 $I(L)$ 。

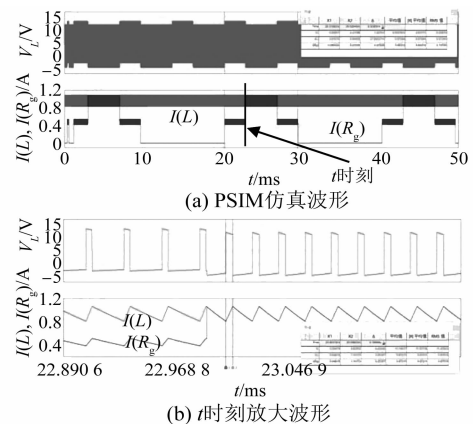


图 5 恒流自适应供电仿真波形

3 实例验证

以上文的新型预充电拓扑为基础, 搭建

60 kW 变频器样机平台。半控整流模块使用塞米控的 SEMiX365DH16, 其门极触发电流最小为 0.1 A。充电电阻 R_1 选择 $36\ \Omega/55\ \text{W}$ 。恒流自适应电路参数同仿真参数。三相 380 V 交流接入, 变频器运行正常。实测 Q1 开通时间为 $5.25\ \mu\text{s}$, [见图 6, 其中 CH3: $I(L)$; CH4: V_L], 与仿真结果 (图 5) $5.1\ \mu\text{s}$ 基本一致, 实测电感电流纹波 249.4 mA。调整滞回回差电压, 即可调整晶闸管门极电流的大小, 调试方便灵活。

图 7 为预充电电路实测波形。其中 CH1: L1 对母线的电压; CH2: 母线电压; CH3: $V_{\text{DC}2}$; CH4:

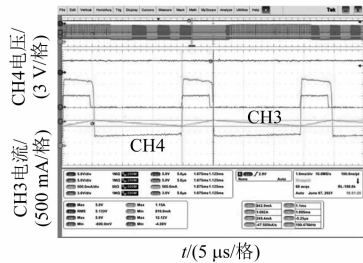


图 6 实测自适应供电电路波形

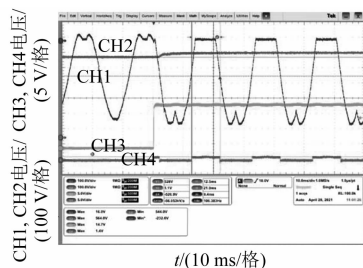


图 7 实测预充电电路波形

晶闸管 Th1 门极电压。当 L1 对母线电压超过 $-232\ \text{V}$ 时, 晶闸管 Th1 开通。各相晶闸管交替开通约 180° , 符合预期控制效果, 方案具有可行性。

4 结 语

本文针对传统变频器预充电电路存在的问题, 设计了一种具有恒流自适应功能的预充电电路。该电路可以自适应维持稳定, 为晶闸管触发提供相对稳定的供电, 以此实现对每相晶闸管精确控制, 不再依赖软件参与, 同时避免了光耦和开关电源时序问题。通过 PSIM 仿真和实物平台测试表明, 该电路方案切实可行, 调试方便, 具有一定的参考价值。

【参考文献】

- [1] 李方园. 变频器技术及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [2] 张铁军. 变频器软充电单元设置与否的计算分析[J]. 电机与控制应用, 2012, 39(1): 36.
- [3] 唐白山, 黄翠柏. 一种新型单象限变频器预充电电路设计[J]. 工矿自动化, 2013, 39(2): 20.
- [4] 刘祖超, 张加胜, 肖喜鹏, 等. 基于变频器的新型预充电电路的研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(2): 95.
- [5] 张臻, 金龙, 沈湛, 等. 适用于大功率逆变器的预充电方案研究[J]. 电气自动化, 2015, 37(2): 1.
- [6] 王彦红, 靳宝会. 变频器预充电电路的改进设计[J]. 煤矿机电, 2012(6): 108.
- [7] 高琴, 刘清晨, 陈亦平, 等. 不同调速器死区特性对系统频率稳定的影响分析[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3575.
- [8] 段正阳, 李冰, 黄珣, 等. 适应电网侧 AGC 不同控制模式的光伏发电参与电网频率调节[J]. 可再生能源, 2020, 38(3): 373.
- [9] 井文辉. 电池储能参与电网辅助调频的控制策略及优化配置研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [10] 严干贵, 刘莹, 段双明, 等. 电池储能单元群参与电力系统二次调频的功率分配策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 26.
- [11] 雷敏, 魏务卿, 曾进辉, 等. 考虑需求响应的负荷控制对供电可靠性影响分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10): 53.
- [12] 包宇庆, 李扬, 王春宁, 等. 需求响应参与大规模风电接入下的电力系统频率调节研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 32.
- [13] 杨济如, 石坤, 崔秀清, 等. 需求响应下的变频空调群组削峰方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(24): 44.
- [14] GAO Z. Active disturbance rejection control: a paradigm shift in feedback control system design[C] // 2006 American Control Conference, 2006.
- [15] 郭瑞, 胡鹏程, 樊亚敏. 基于时间尺度的一类典型高阶系统的二阶线性自抗扰控制[J]. 计算机科学, 2016, 43(10): 40.