

10 kV 永磁断路器驱动电路设计及其脉宽调制仿真

于庆广, 肖宜, 赵彪

(电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市海淀区 100084)

Design of Driving Circuit for 10 kV Permanent Magnetic Vacuum Circuit Breaker and PWM-Based Simulation of Its Realization

YU Qing-guang, XIAO Yi, ZHAO Biao

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments (Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: It is a new application field of permanent magnetic vacuum circuit breakers to be used as voltage/current zero-crossing switch. As for the common-used direct discharge of capacitor to the coil of permanent-magnetic vacuum circuit breaker, the nonuniformity of switching current leads to the dispersivity of the motion of permanent-magnetic vacuum circuit breakers. For this reason, the authors design a new driving circuit for permanent-magnetic vacuum circuit breaker, which follows given working current of the coil to ensure that the switching current of permanent-magnetic vacuum circuit breaker can be kept consistent. The way to select suitable parameters of the circuit as well as its scope of application are given. The proposed circuit is simulated by software, and the feasibility of the proposed driving circuit is verified.

KEY WORDS: permanent-magnetic vacuum circuit breakers; driving circuit; pulse width modulation (PWM)

摘要: 永磁断路器作为过零投切开关使用是一个新的应用领域。针对目前普遍采取的直接电容对断路器线圈放电, 断路器线圈开关电流不一致而导致永磁断路器开关动作存在分散性的问题, 设计了一种新型永磁断路器驱动电路, 跟踪给定线圈工作电流, 保证线圈开关动作电流相同, 并给出了的电路参数选择方法及适用范围, 最后用软件进行了仿真, 验证了方案的可行性。

关键词: 永磁断路器; 驱动电路; 脉宽调制

0 引言

永磁断路器以其零部件少、结构简单、可靠性

高、寿命长、免维护等特点备受关注^[1-2], 但目前主要还是用于保护、测量等方面。其驱动均采取直接电容、电感放电模式, 充放电电容没有测量电压单元^[3-6], 导致断路器线圈每次开关动作电流波形并不一致, 断路器工作时, 指令发出时刻与开关动作时刻之间的延时不是固定值且分散性较大, 通过实测发现特瑞德公司生产的 12~24 kV 户内真空开关其分散性在 10~20 ms 之间, 这种情况就不能将断路器再作为过零投切开关来使用。

1 驱动器原理

针对目前驱动电路存在分散性的问题, 本文设计如下电路来跟踪断路器线圈工作理想电流, 原理见图 1。

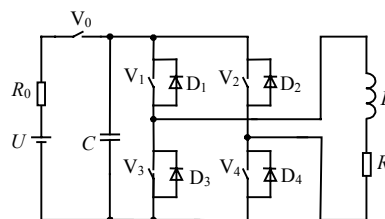


图 1 永磁断路器驱动原理

Fig. 1 The schematic diagram of the driving of permanent magnetic breakers

图 1 中, V_0 、 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 为绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT), U 为直流电源, R_0 为充电电阻, C 为充电电容, D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 为二极管, R 为线路及断路器等效电阻, L 为线圈等效的可变电感^[7-8]。

电路有 2 个工作过程: 电容充电和充放电过程。

1) 电容充电过程: V_0 闭合, V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目) (2009CB-724304)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB724304).

断开, 直流电源对电容进行充电直到电容器电压达到电源电压。

2) 电容放电过程: V_0 断开, 采用脉宽调制(pulse width modulation, PWM)电流跟踪策略, 控制开关管 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 动作, 跟踪断路器工作的理想电流。

根据实际情况, 放电过程中有 2 种可选择的电流衰减模式。以跟踪正向电流为例, 一种是 V_1 一直闭合, 控制开关管 V_4 闭合使断路器线圈增大; 控制开关管 V_4 断开, 利用 D_2 续流衰减断路器线圈电流, 本文称为一阶电流衰减。另一种是控制 V_1 、 V_4 同时闭合使断路器线圈电流增大; 控制 V_1 、 V_4 同时断开, 利用 D_2 、 D_3 续流衰减断路器线圈电流, 本文称为二阶电流衰减。2 种模式均满足 PWM 电流跟踪条件^[9], 可以采取实时 PWM 电流跟踪。

2 驱动器参数设计

2.1 电容充电电路参数约束

此时电路为一阶电路, 原理如图 2。

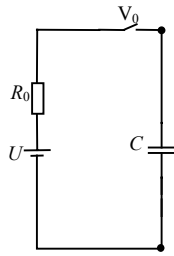


图 2 充电回路原理

Fig. 2 The schematic diagram of charge circuit

分析图 2, 有

$$\begin{cases} u_C = U_0(1 - e^{-\frac{1}{RC}t}) \\ i_C = \frac{U_0}{R_0} e^{-\frac{1}{RC}t} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_C 为电容电压; i_C 为电容电流; U_0 为直流电源电压。

为了保证电路正常工作, 有

$$\begin{cases} i_C \leq I_{\max} \\ R_0 C \leq 10 \end{cases} \quad (2)$$

式中 I_{\max} 为 V_0 允许通过的最大电流。

此为充电电路的参数约束方程。 V_0 耐压即为电源电压。

2.2 电容放电电路参数约束

2.2.1 一阶电流衰减模式

2.2.1.1 电路原理

一阶电流衰减模式下, V_1 、 V_4 同时闭合与 V_1 闭合、 V_4 断开依次对应原理如图 3。

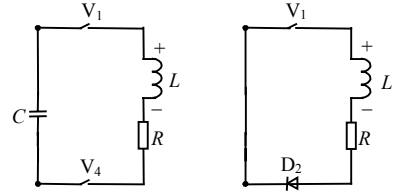


图 3 一阶衰减电路原理图

Fig. 3 The schematic diagram of first-order current damping circuit

2.2.1.2 开关管频率选择、电压及电流约束
分析图 3, V_1 、 V_4 同时闭合时^[10]

$$u_C = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (3)$$

式中 i 为断路器线圈电流。

V_1 闭合、 V_4 断开时

$$Ri + L \frac{di}{dt} = 0 \quad (4)$$

对 1 个 PWM 周期内的 di/dt 进行简化, 有

$$u_C = Ri + L \frac{\Delta i}{DT} \quad (5)$$

式中: T 为 PWM 周期; Δi 为滞环宽度; D 为占空比。

$$Ri + L \frac{-\Delta i}{(1-D)T} = 0 \quad (6)$$

可以得到开关管工作频率为

$$f = \frac{1}{T} = \frac{D(1-D)u_C}{L\Delta i} \leq \frac{U_0}{4L\Delta i} \quad (7)$$

为了保证电路正常工作, 开关管的频率必须大于等于该极限值, 即

$$f_{\inf} \geq \frac{U_0}{4L\Delta i} \quad (8)$$

式中: L 取等效电感的极小值; f_{\inf} 为开关管的最大工作频率。开关管最大耐压为电源电压, 最大电流为非振荡电路最大电流。

2.2.1.3 电路 RLC 参数选择

为了保证电路正常工作, 需满足 2 个条件: 放电回路电流最大值大于参考电流最大值、变化率大于参考电流变化率。即

$$\begin{cases} i_{\max} > (i_{\text{ref}})_{\max} \\ \left| \frac{di}{dt} \right| > \left| \frac{di_{\text{ref}}}{dt} \right| \end{cases} \quad (9)$$

式中: i_{\max} 为放电回路断路器线圈可以达到的最大电流; i_{ref} 为断路器线圈电流参考值。

先考虑 $i_{\max} > (i_{\text{ref}})_{\max}$, 根据需要将电路设计在非振荡放电模式^[11-12], 有

$$\begin{cases} i_L = -C \frac{du_C}{dt} = -CA_1 p_1 e^{p_1 t} - CA_2 p_2 e^{p_2 t} \\ t_m = \frac{\ln(p_2 / p_1)}{p_1 - p_2} \end{cases} \quad (10)$$

式中： $A_1 = p_2 U_0 / (p_2 - p_1)$ ； $A_2 = -p_1 U_0 / (p_2 - p_1)$ ； i_L 为放电回路电感电流； p_1 、 p_2 为电路方程的特征根。

在 t_m 时刻，振荡电路电流达到最大值，此时 i_L 需比参考电流最大值大。

对于 $|di/dt| > |di_{ref}/dt|$ ，包含 2 个约束：驱动电路能够达到的电流上升率和电流下降率都比参考电流波形的任意电流值下的对应值都要大。

对于电流上升率的要求，可直接考虑电流上升率的最小值大于参考电流波形上升率的最大值

$$\min\left(\frac{di}{dt}\right) > \max\left(\frac{di_{ref}}{dt}\right) \quad (11)$$

由二阶电路特性可以知道，电流上升率大小与电感两端电压大小成正比，在其上升到最大值之前电感电压逐渐减小，电流上升率为一个减函数，于是有

$$\left.\frac{di}{dt}\right|_{i=\max(i_{ref})} > \max\left(\frac{di_{ref}}{dt}\right) \quad (12)$$

式中 $|di/dt|_{i=\max(i_{ref})}$ 为参考电流最大值 $(i_{ref})_{\max}$ 对应的电流上升率。

对于电流下降率的要求，在一阶电流衰减下，有

$$\left.\frac{di}{dt}\right| = \frac{R}{L} i_L \quad (13)$$

由于电路本身的约束，导致该种电流衰减方式下，其对于电流值较小时电流跟踪有局限，因此存在一个最小电流跟踪极限 i_{\min} ，考虑在 $i_{\min} \leq i \leq (i_{ref})_{\max}$ 满足电流下降率的要求有：

$$\frac{R}{L} i_L \geq \left|\frac{di_{ref}}{dt}\right| \quad (14)$$

式中 L 取等效电感的极大值，可通过适当的串联电阻或者并联电感，来满足电流下降率的要求。

综上一阶衰减电路 RLC 参数需要满足的约束为式(2)(10)(12)和式(14)。

2.2.2 二阶电流衰减模式

2.2.2.1 电路原理

二阶电流衰减模式下， V_1 、 V_4 同时闭合与断开，依次对应原理如图 4 所示。

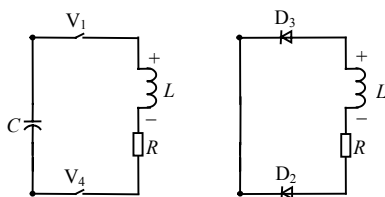


图 4 二阶衰减电路原理图

Fig. 4 The schematic diagram of second-order current damping circuit

2.2.2.2 开关管频率选择、电压及电流约束

分析图 1、图 2 后，得 V_1 、 V_4 同时闭合时

$$u_C = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (15)$$

V_1 、 V_4 同时断开时

$$-u_C = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (16)$$

开关管最大工作频率 f_{inf} 满足

$$f_{inf} \geq \frac{U_0}{2L\Delta i} \quad (17)$$

开关管最大耐压为电源电压的一半，最大电流为非振荡电路最大电流。

2.2.2.3 电路 RLC 参数选择

电路参数分析除电流下降率分析外，其他均与一阶电路一致。下面只对电流下降率对电路参数约束进行分析。

此时电路也为二阶电路，直接考虑电路的最小电流下降率大于参考电流波形最大电流下降率，即满足式(17)。根据二阶电路特性可知，其电流下降率大小与电感两端电压大小成正比，故有

$$\left.\frac{di}{dt}\right|_{i=0} > \left|\frac{di_{ref}}{dt}\right| \quad (18)$$

式中 $di/dt|_{i=0}$ 为电流为 0 时电路电流下降率。

综上二阶衰减电路 RLC 参数需要满足的约束为式(2)(10)(12)和式(18)。

3 驱动器仿真设计

3.1 参考波形拟合

仿真以特瑞德公司生产的 12~24 kV 户内真空开关为例进行展开。图 5 为该断路器工作时对应的参数变化情况。

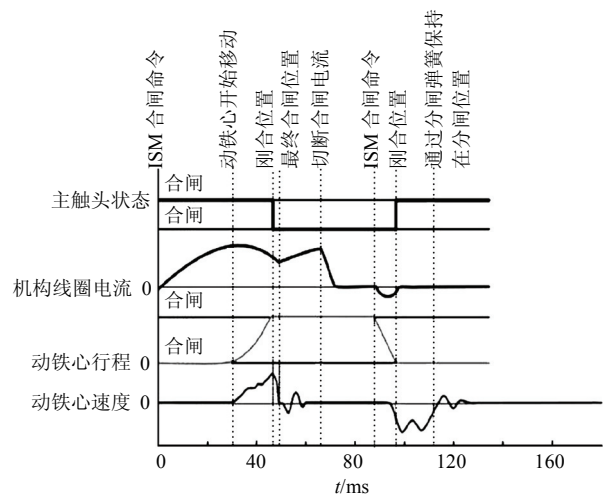


图 5 永磁断路器开关动作波形

Fig. 5 The wave of permanent magnetic breakers switching

断路器线圈电流正向最大值为 10 A, 反向最大值为 1 A, 据此将线圈电流进行如下拟合

$$i_{ref} = \begin{cases} \sin\frac{2\pi}{4 \times 0.03}t, & 0 \leq t \leq 0.05 \\ \frac{0.9 - \sin(\frac{0.05 \times 2\pi}{4 \times 0.03})}{0.065 - 0.05}(t - 0.05) + \sin(\frac{0.05 \times 2\pi}{4 \times 0.03}), & 0.05 \leq t \leq 0.07 \\ \frac{0.9}{0.07 - 0.065}(0.07 - t), & 0.065 \leq t \leq 0.07 \\ 0.1 \sin[\frac{2\pi(t - 0.088)}{2 \times (0.098 - 0.088)}], & 0.088 \leq t \leq 0.098 \end{cases} \quad (19)$$

3.2 驱动器建模及仿真

3.2.1 仿真模型

本文采用滞环 PWM 来进行电流跟踪^[13-15], 根据驱动器原理, 在电力系统分析仿真软件(power system computer aided design, PSCAD)中搭建出仿真模型如图 6 所示。

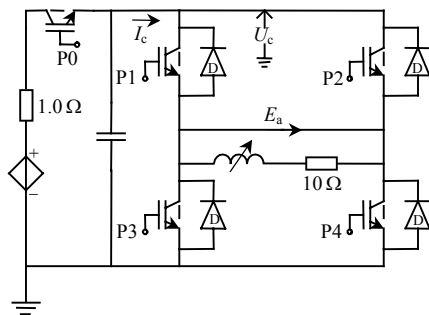


图 6 永磁断路器驱动仿真模型

Fig. 6 The simulation model of the driving of permanent magnetic breakers

3.2.2 一阶衰减模式仿真

根据式(2)(10)(12)和(14)选取如下参数: $R=16 \Omega$, L 为从 0.01~0.05 H 变化, $C=10\ 000 \mu\text{F}$ 。仿真之后得到的结果如图 7 所示。

3.2.3 二阶电流衰减

根据式(2)(10)(12)和(18), 选定电路参数如下: $R=10 \Omega$, L 从 0.05~0.09 H 变化(串入调节电感), $C=10\ 000 \mu\text{F}$, 仿真之后得到的结果如图 8。

从波形对比可以看到, 实际电流波形能够较好的跟踪上参考电流波形踪。在开关管频率较低、断路器线圈对接近零部分电流波形要求较低、对系统可靠性要求较高时, 应优先考虑采用一阶电流衰减下的电流跟踪; 如果开关管频率足够高、断路器线圈对波形要求较严格应优先考虑采用二阶电流衰减下的滞环 PWM 来实现。

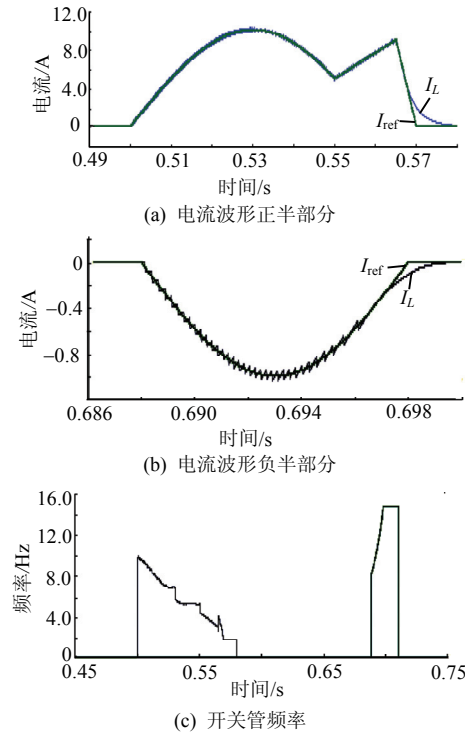


图 7 滞环 PWM 一阶电流衰减电流频率波形

Fig. 7 Current and frequency wave of first-order current damping circuit using hysteretic current-mode control PWM

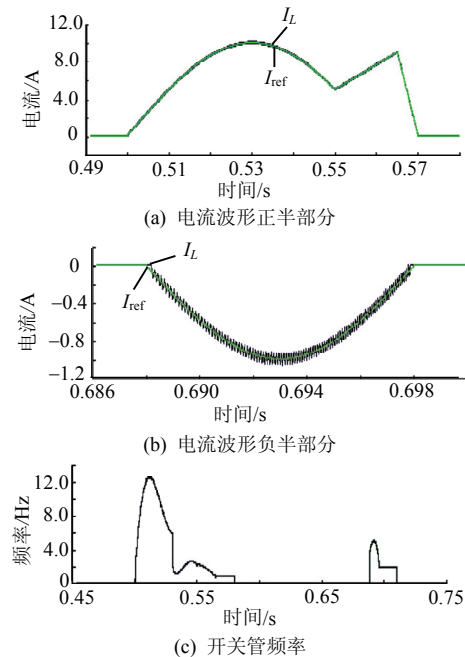


图 8 滞环 PWM 二阶电流衰减电流跟踪波形

Fig. 8 Current and frequency wave of second-order current damping circuit using hysteretic current-mode control PWM

4 结语

本文设计了一种基于线圈电流跟踪的新型永磁断路器驱动电路, 分析了方案的可行性, 并给出了电路参数选取约束条件, 在 PSCAD 中建立了的仿真模型, 并进行了相应的仿真, 证实断路器可以

实现准确地开关。

参考文献

- [1] 马少华, 徐建源, 王季梅. 永磁操动机构特性分析和配用于高压真空断路器的可能性[J]. 高压电器, 2000(4): 19-23.
Ma Shaohua, Xu Jianyuan, Wang Jimei. Characteristics analyzing of the bi-Stable magnetic actuator and the feasibility of utilizing to operate the high voltage vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2000(4): 19-23(in Chinese).
- [2] 段雄英, 廖敏夫, 丁富华, 等. 基于真空断路器的并联电容器组相控投切装置[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 78-84.
Duan Xiongying, Liao Minfu, Ding Fuhua, et al. Controlled vacuum circuit breaker for shunt capacitor banks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10): 78-84(in Chinese).
- [3] 丁然, 闫玉莲, 赵松. 永磁真空断路器控制电路的设计[J]. 鞍山科技大学学报, 2006, 29(1): 54-57.
Ding Ran, Yan Yulian, Zhao Song. Controlling circuit of permanent-magnetic vacuum circuit breakers[J]. Journal of Anshan University of Science and Technology, 2006, 29(1): 54-57(in Chinese).
- [4] 丁富华, 邹积岩, 段雄英, 等. 采用数字信号处理器的永磁机构同步控制系统[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 39-44.
Ding Fuhua, Zhou Jiyan, Duan Xiongying, et al. Synchronous control system of permanent magnetic actuator applying digital signal processor[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 39-44(in Chinese).
- [5] 段雄英, 田海松, 黄智慧, 等. 基于 IPM 的永磁机构同步控制器设计[J]. 低压电器, 2008(7): 16-19.
Duan Xiongying, Tian Haisong, Huang Zhihui, et al. Design of synchronous controller for permanent magnetic actuator based on IPM[J]. Low Voltage Apparatus, 2008(7): 16-19(in Chinese).
- [6] 张俊民, 徐国政, 钱家骊, 等. 一种永磁操动机构的智能控制与电子驱动装置的研究[J]. 高压电器, 2003, 29(1): 27-29.
Zhang Junmin, Xu Guozheng, Qian Jiali, et al. Development of intelligent controlling and electronic driving device for permanent magnetic operating mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 29(1): 27-29(in Chinese).
- [7] 林静, 申潭, 王汝文. 永磁机构操作线圈等效电路的建模[J]. 高压电器, 2004, 40(1): 56-60.
Lin Jing, Shen Tan, Wang Ruwen. Modeling on the equivalent circuit of operating coil in permanent magnetic actuator[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(1): 56-60(in Chinese).
- [8] Li Z, Varlow B R, Renforth L A, et al. Optimal design of autorecloser electromagnetic actuator[J]. IEE Proc Electr Power Appl, 2000, 147(5): 431-435.
- [9] 周明宝, 瞿文龙. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001: 118-136.
- [10] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 23-40.
- [11] 邱关源. 电路[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 158-166.
- [12] 江缉光. 电路原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 222-239.
- [13] 李永东. 交流电机数字控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 128-136.
- [14] 苏鹏升, 焦连伟. 自动控制原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 132-138.
- [15] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 169-182.



于庆广

收稿日期: 2010-03-26。

作者简介:

于庆广(1966—), 男, 副教授, 研究方向为电力电子技术及设备的研究, E-mail: qinggy@mail.tsinghua.edu.cn;

肖宜(1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为并网逆变器研究;

赵彪(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为并网逆变器研究。

(实习编辑 张磊)