

1-8-2019

Analysis of Fuzzy Control Constant Current Charging Characteristic for Breaking and Making Capacitor of Permanent Magnet Circuit Breaker

Peng jin

School of Electronic and Electrical Engineering, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China;

Xianbing Wang

School of Electronic and Electrical Engineering, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China;

Xiangao Wang

School of Electronic and Electrical Engineering, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China;

Xichen Ye

School of Electronic and Electrical Engineering, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Analysis of Fuzzy Control Constant Current Charging Characteristic for Breaking and Making Capacitor of Permanent Magnet Circuit Breaker

Abstract

Abstract: In order to realize the precise control of breaking and making capacitors constant current charging for the permanent magnet (PM) circuit breaker, a *fuzzy constant current charging technology of breaking and making capacitors is put forward. On the basis of analyzing the working characteristics for breaking and making capacitors constant current charging, the membership functions of current deviation e , deviation changing rate e_c and output variable u for breaking and making capacitors constant current and fuzzy control rules are set up. The establishment of a two-dimensional lookup table replacing the complex fuzzy control algorithm can effectively improve the fuzzy constant current control system in real time.* Matlab simulation model and intelligent control unit of constant current charging system for PM circuit breaker are built and developed. The simulation and experiment results show that the fuzzy control method can achieve the constant current charging control of breaking and making capacitors and can effectively improve the charging speed and lifetime of PM circuit breaker capacitors.

Keywords

PM circuit breaker, breaking and making capacitors, fuzzy constant current charging, fuzzy algorithm and two-dimensional table, intelligent control unit

Authors

Peng jin, Xianbing Wang, Xiangao Wang, Xichen Ye, and Wang huan

Recommended Citation

Peng jin, Wang Xianbing, Wang Xiangao, Ye Xichen, Wang huan. Analysis of Fuzzy Control Constant Current Charging Characteristic for Breaking and Making Capacitor of Permanent Magnet Circuit Breaker[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(7): 2648-2655.

永磁断路器分合闸电容模糊恒流充电特性分析

彭靳, 汪先兵, 王祥傲, 叶奎臣, 王欢

(滁州学院电子与电气工程学院, 安徽 滁州 239000)

摘要: 针对难以精确实现对永磁断路器分合闸电容器组恒流充电控制, 提出了一种模糊恒流充电技术。在分析分合闸电容器组恒流充电工作特性的基础上, 构建了恒流充电的电流偏差 e 、偏差变化率 e_c 和输出量 u 的隶属度函数与模糊控制规则, 建立了替代复杂的模糊控制算法的二维查询表格, 可有效提高模糊恒流控制系统的实时性。搭建了恒流充电系统的 Matlab 仿真模型与智能控制单元, 仿真和实验结果表明, 该方法实现了分合闸电容器组恒流充电控制, 有效地提高了电容器组的充电快速性和使用寿命。

关键词: 永磁断路器; 分合闸电容器; 模糊恒流充电; 模糊算法和二维表格; 智能控制单元

中图分类号: TM572 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 07-2648-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201807027

Analysis of Fuzzy Control Constant Current Charging Characteristic for Breaking and Making Capacitor of Permanent Magnet Circuit Breaker

Peng jin, Wang Xianbing, Wang Xiangao, Ye Xichen, Wang huan

(School of Electronic and Electrical Engineering, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China)

Abstract: In order to realize the precise control of breaking and making capacitors constant current charging for the permanent magnet (PM) circuit breaker, a fuzzy constant current charging technology of breaking and making capacitors is put forward. On the basis of analyzing the working characteristics for breaking and making capacitors constant current charging, the membership functions of current deviation e , deviation changing rate e_c and output variable u for breaking and making capacitors constant current and fuzzy control rules are set up. The establishment of a two-dimensional lookup table replacing the complex fuzzy control algorithm can effectively improve the fuzzy constant current control system in real time. Matlab simulation model and intelligent control unit of constant current charging system for PM circuit breaker are built and developed. The simulation and experiment results show that the fuzzy control method can achieve the constant current charging control of breaking and making capacitors and can effectively improve the charging speed and lifetime of PM circuit breaker capacitors.

Keywords: PM circuit breaker; breaking and making capacitors; fuzzy constant current charging; fuzzy algorithm and two-dimensional table; intelligent control unit

引言

永磁断路器作为电力系统中重要的开关电器



收稿日期: 2016-11-07 修回日期: 2017-05-09;
基金项目: 国家自然科学基金(51307011), 安徽教育厅自然科学研究重点项目(KJ2016A528), 安徽省高校优秀青年人才基金重点项目(2013SQRL093ZD);
作者简介: 彭靳(1981-), 男, 安徽滁州, 硕士, 副教授, 研究方向为信号处理智能化控制。

设备, 其操作性能的好坏直接关系到智能电网的安全、稳定与可靠运行。国内外学者针对永磁断路器操动机构的静动态特性仿真分析、静动态磁场计算等开展了大量研究^[1-7], 取得了相关研究成果。同时, 现有的永磁断路器在分合闸过程中, 由于碰撞速度过快使运动机构及有关部件机械损坏或变形, 机械碰撞带来的触头电弧烧蚀, 大大缩短了断路器

<http://www.china-simulation.com>

• 2648 •

的机械和电气寿命。针对如何优化调控永磁断路器的动态运动过程, 来提高其分合闸运动过程的动态特性, 国内外学者开展了相关研究^[8-10], 取得有益成果。此外, 永磁断路器的永磁操动机构工作时需利用分合闸电容器组对分合闸线圈激磁, 常规的分合闸电容器组采用交流电经滤波后不加控制与保护的直充方式, 充电瞬间会产生很高的脉冲尖峰, 且执行多次无控制的分合闸电容器组充放电过程, 对电容器组的工作寿命产生一定的影响。针对永磁断路器的分合闸电容器组的充电方法, 国内外学者在 PWM 控制、全桥串联谐振模型的电容器恒流充电等方面开展了研究取得了一定的研究成果^[11-15]。沈阳工业大学赵红强等学者^[13]利用 PWM 控制电感限流的恒流充电技术, 通过跟踪电容器的充电电流和电压, 实时调整 PWM 脉冲, 实现对电容器的恒流充电。中南民族大学危立辉等学者^[14]利用开环 PWM 控制技术, 单片机查询表格的占空比方式实现对储能电容的恒流充电。文献[13-14]提出了利用 PWM 控制技术实现对储能电容的恒流充电, 但在具体的 PWM 脉冲则需要人工试验和经验的方式来获得, 对实现全闭环精确控制恒流充电效果欠佳。文献[15]采用 BP 神经网络 PID 充电控制技术可动态调整充电电流以实现分合闸储能电容恒流充电效果, 有效地提高了储能电容的工作寿命与可靠性。文中采用的 BP 神经网络 PID 充电控制技术虽比模糊控制技术效果好, 但文中并未对模糊控制器参数进行细致的研究, 模糊控制规则没有展开, 只是对 9 条模糊控制规则作了实验分析。此外, BP 神经网络 PID 控制的程序移植和运行对硬件运行速度和容量要求较高, 增加了工程应用成本, 对永磁真空开关本体来说, 增加了永磁开关整体的造价成本。而模糊控制技术, 对硬件的要求较低, 低性能的微处理器就能够运行, 工程应用成本较低, 完全符合目前的市场应用。

基于此, 本文针对永磁断路器分合闸电容恒流充电的问题, 在分析永磁断路器分合闸电容恒流充电硬件结构基础上, 对模糊控制器参数进行了深入

细致研究, 扩展了模糊控制规则, 提高了模糊控制精度。最终确立了永磁断路器分合闸电容器组恒流充电的模糊控制算法, 利用二维查询表格优化了繁琐的模糊控制算法。并移植到了微处理器控制系统中, 来实现对永磁断路器的分合闸电容器组的恒流充电。

1 分合闸电容恒流充电模糊控制原理

1.1 模糊恒流充电控制规则

电容充电电流检测模块实时采集分合闸电容充电电流 i , 设定值为 i_{set} , 则偏差 $e = i_{\text{set}} - i$, 偏差的变化率为 $e_c = de/dt$ 。恒流充电控制系统中, 模糊控制器输入值为电流的偏差、偏差的变化率, 控制器的输出值为 PWM 脉冲, PWM 脉冲占空比的大小跟电流的大小成正相关。模糊控制策略表示为:

(1) 若 $e > 0$ 则表示检测电流 $i < i_{\text{set}}$, 则增大 PWM 占空比, 提高电容充电电压; 若 $e < 0$ 则检测电流 $i > i_{\text{set}}$, 则减小 PWM 占空比, 减小充电电压; 若 $e = 0$ 则表示检测电流 $i = i_{\text{set}}$, 则保持 PWM 占空比不变, 保持充电电压恒定。

(2) e_c 表示分合闸电容充电电流是在变大、变小还是保持不变。 e_c 的正负与 $i_{t-1} - i_t$ 的正负相同。若 $e_c > 0$, 则 $i_{t-1} > i_t$, 表示充电电流在减小; 若 $e_c < 0$, 则 $i_{t-1} < i_t$, 表示充电电流在增加; 若 $e_c = 0$, 则 $i_{t-1} = i_t$, 表示充电电流保持不变。

考虑 e 和 e_c 可以得出 9 条规则, P 代表大于 0 或增加; N 表示小于 0 或减小; ZO 代表等于 0 或不变。则可得出 $e-e_c-u$ 的 9 条控制规则:

- (1) 若检测电流 $i > i_{\text{set}}$ 且在增加, 则减小电压 u ;
- (2) 若检测电流 $i > i_{\text{set}}$ 且不变, 则减小电压 u ;
- (3) 若检测电流 $i > i_{\text{set}}$ 且在减小, 则电压 u 不变;
- (4) 若检测电流 $i = i_{\text{set}}$ 且在增加, 则减小电压 u ;
- (5) 若检测电流 $i = i_{\text{set}}$ 且不变, 则电压 u 不变;
- (6) 若检测电流 $i = i_{\text{set}}$ 且在减小, 则增加电压 u ;
- (7) 若检测电流 $i < i_{\text{set}}$ 且在增加, 则电压 u 不变;
- (8) 若检测电流 $i < i_{\text{set}}$ 且不变, 则增加电压 u ;
- (9) 若检测电流 $i < i_{\text{set}}$ 且在减小, 则增加电压 u 。

综上，可列出如表 1 所示的模糊控制规则表。

表 1 模糊控制规则表
Tab. 1 Fuzzy control rule table

输出电压 u	偏差变化率 e_c		
	N	ZO	P
N	N	N	ZO
偏差 e	ZO	N	P
	P	ZO	P

为增加智能模糊恒流充电系统控制精度，将 PL 代表比 0 大很多，PM 代表比 0 大，PS 代表比 0 大一点，ZO 代表等于 0，NL 代表比 0 小很多，NM 代表比 0 小，NS 代表比 0 小一点。则可以得到如表 2 所示的模糊控制扩展规则表。

表 2 模糊控制扩展规则表
Tab. 2 Extended fuzzy control rule table

输出电压 u	偏差变化率 e_c						
	NL	NM	NS	ZO	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZO
NM	NL	NL	NM	NM	NS	ZO	ZO
NS	NL	NM	NM	NS	ZO	ZO	PS
偏差 e	ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PM
	PS	NS	ZO	ZO	PS	PM	PL
	PM	ZO	ZO	PS	PM	PM	PL
	PL	ZO	PS	PM	PL	PL	PL

1.2 恒流充电模糊控制器的设计

电流偏差 e 、偏差变化率 e_c 和输出量 u 的隶属函数是精确转模糊的基础，电流偏差 e 隶属函数图如图 1 所示，此隶属函数采用的参数化函数为三角形分布，其中偏差变化率 e_c 和输出量 u 的隶属函数图与电流偏差 e 相同。

模糊算法通过图 1 所示模糊控制隶属函数图，将 -6 到 6 之间的论域 U 划分为 {NL, NM, NS, ZO, PS, PM, PL} 7 个模糊量，其中 U 中任意元素 $u \in U$ ，其隶属函数表达式表示为

$$\mu_{NL}(u) = \begin{cases} -0.5u - 2 & -6 \leq u \leq -4 \\ 0 & u \geq -4 \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_{NM}(u) = \begin{cases} 0.5u + 3 & -6 \leq u \leq -4 \\ -0.5u - 1 & -4 \leq u \leq -2 \\ 0 & u \geq -2 \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_{NS}(u) = \begin{cases} 0 & -6 \leq u \leq -4 \\ 0.5u + 2 & -4 \leq u \leq -2 \\ -0.5u & -2 \leq u \leq 0 \\ 0 & u \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_{ZO}(u) = \begin{cases} 0 & -6 \leq u \leq -2 \\ 0.5u + 1 & -2 \leq u \leq 0 \\ -0.5u + 1 & 0 \leq u \leq 2 \\ 0 & u \geq 2 \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_{PS}(u) = \begin{cases} 0 & -6 \leq u \leq 0 \\ 0.5u & 0 \leq u \leq 2 \\ -0.5u + 2 & 2 \leq u \leq 4 \\ 0 & u \geq 4 \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_{PM}(u) = \begin{cases} 0.5u - 1 & -6 \leq u \leq 2 \\ -0.5u + 3 & 2 \leq u \leq 4 \\ 0 & 4 \leq u \leq 6 \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_{PL}(u) = \begin{cases} 0 & -6 \leq u \leq 4 \\ 0.5u - 2 & 4 \leq u \leq 6 \end{cases} \quad (7)$$

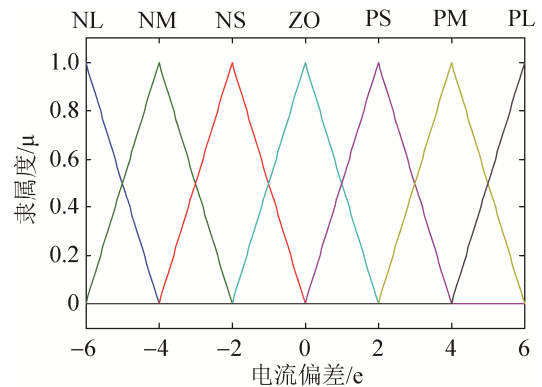


图 1 电流偏差 e 隶属函数图
Fig. 1 Membership function chart of current deviation e

通过图 1 与公式(1)~(7)将实时的电流偏差 e 、偏差变化率 e_c 的精确量转换为模糊量后，模糊算法通过表 2 的模糊控制规则表进行模糊推理，模糊推理依据公式(8)、(9)展开，推理中，模糊“与”操作采用取小操作，模糊“或”操作采用取大操作，模糊“蕴含”操作采用取小操作，模糊“综合”操作采用取大操作。

推理结果为

$$C' = (A' \text{ and } B') \circ [(A \text{ and } B) \rightarrow C] \quad (8)$$

式中： A 和 A' 、 B 和 B' 、 C 和 C' 分别是不同论域 X, Y, Z 上的模糊集合。

其隶属函数为

$$\begin{aligned} \mu_{C'}(z) &= \bigvee_x \{ \mu_{A'}(x) \wedge [\mu_A(x) \wedge \mu_C(z)] \} \cap \\ &\quad \bigvee_y \{ \mu_{B'}(y) \wedge [\mu_B(y) \wedge \mu_C(z)] \} = \\ &\quad \bigvee_x \{ [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_A(x)] \wedge \mu_C(z) \} \cap \\ &\quad \bigvee_y \{ [\mu_{B'}(y) \wedge \mu_B(y)] \wedge \mu_C(z) \} = \\ &\quad (\alpha_A \wedge \mu_C(z)) \cap (\alpha_B \wedge \mu_C(z)) = \\ &\quad (\alpha_A \wedge \alpha_B) \wedge \mu_C(z) \end{aligned} \quad (9)$$

式中: α_A 表示 A' 对 A 隶属度; α_B 表示 B' 对 B 的隶属度。

模糊推理将实时输出 u 模糊量转化为 PWM 占空比模糊量, 最后模糊算法通过图 1 输出量 u 的隶属函数将 PWM 占空比模糊量反模糊为 PWM 占空比精确量进行输出, 如输入 $e=0.5$, $e_c=0.1$ 时, 输出 $u=0.755$, 此时, 输出精确量的范围是 $[-6, 6]$, 因此需要线性映射到 PWM 占空比的合法范围 $[0, 1]$ 。设计的模糊推理系统采用 Mamdani 模糊模型, 解模糊方法采用重心法, 其表达式为

$$u = \frac{\int_Z \mu_{C'}(z) z dz}{\int_Z \mu_{C'}(z) dz} \quad (10)$$

式中: $\mu_{C'}(z)$ 为总隶属函数。

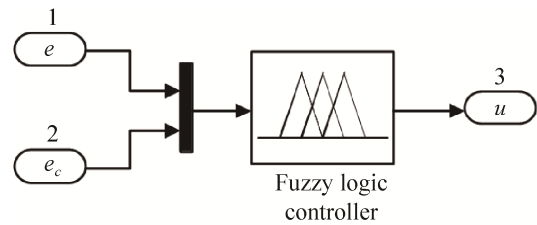
1.3 模糊控制器二维查询表的建立

双输入单输出模糊控制器模型和二维查询表格模型分别如图 2(a)、2(b)所示。对于图 2(a)的模糊控制器的 Matlab 模型, 由于模糊控制算法的繁琐性, 无法满足智能模糊恒流充电的快速性要求。为了提高模糊控制的实时性, 设计采用 Simulink 中的 systemtest 组件实现模糊控制器繁琐算法计算到 stresults.ResultsDataSet 的数据查询表格的快速转换。可得到第一列为电流偏差 e 的数据, 第二列为偏差变化率 e_c 的数据, 第三列为输出量 u 的数据, 由于 e 、 e_c 范围为 $[-6: 0.5: 6]$, 从而将 u 由 625×1 转换为 25×25 的数组, 在 Matlab 中输入以下命令:

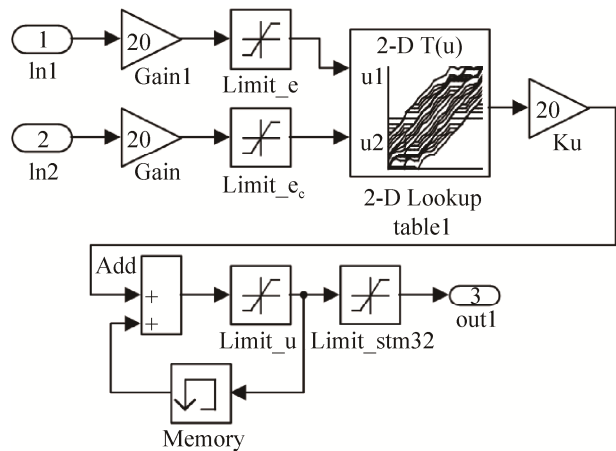
```
For i=1:625
    U(i)= stresults.ResultsDataSet.u{i};
End
```

$u = \text{reshape}(u, 25, 25);$

依据以上 25×25 的数组, 在 2-D Lookup Table 中建立替代模糊控制器的二维查询表格, 可大大提高系统控制的实时性和快速性。



(a) 模糊控制器的 Matlab 模型



(b) 2-D 查询表格 Matlab 模型

图 2 模糊控制器的 Matlab 模型
Fig. 2 Matlab model of fuzzy_controller

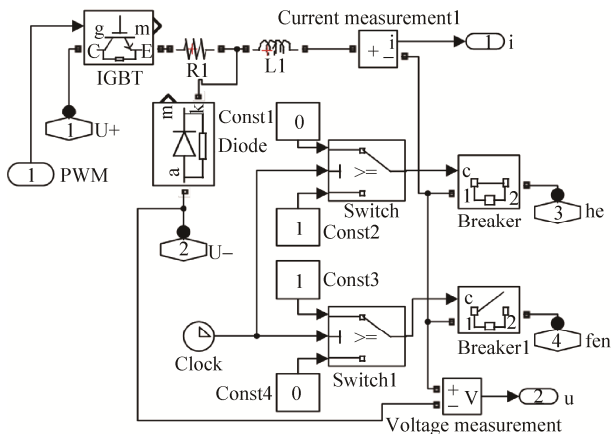
1.4 STM32 微处理器的 C 语言代码的输出

在仿真智能模糊恒流控制系统时, 调整参数达到控制要求后, 将上图 2(b)所示的智能模糊控制器模型在 Matlab/Simulink 中进行 Configuration Parameters 设置后, 导出 C 语言代码, 以方便快速移植到 STM32 微处理器的实时控制系统上, 可大大提高永磁断路器分合闸电容器组恒流充电的控制系统的时效性。

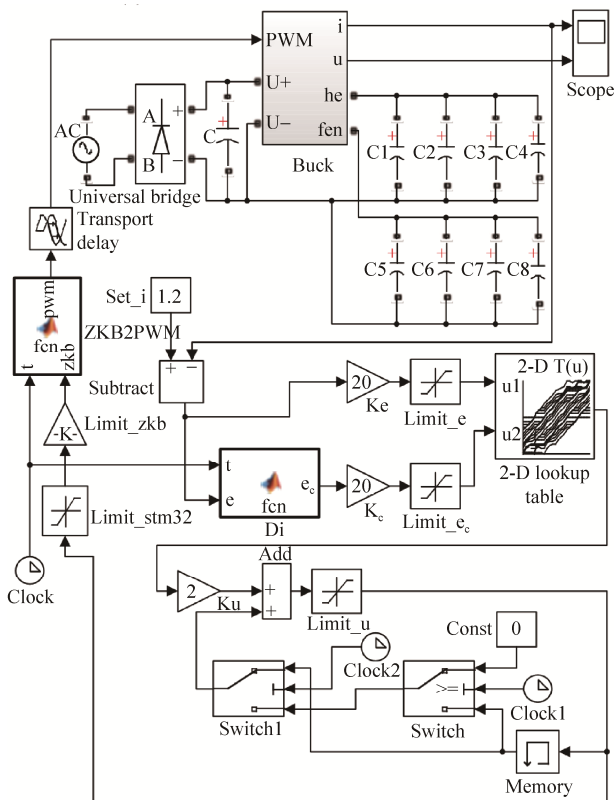
2 仿真模型的建立与分析

如图 3 所示为模糊恒流充电系统的 Matlab 仿真模型, 其中图 3(a)所示为分合闸电容模糊恒流充电系统的 Buck 主电路 Matlab 仿真模型, 主要由功

率开关 IGBT 组成的 Buck 降压电路、分合闸电容器组充电切换开关组成。通过切换开关 Breaker 和 Breaker1 来实现对分合闸电容器组的切换。



(a) 模糊恒流充电系统 Buck 主电路仿真模型



(b) 模糊恒流 Matlab 系统整体仿真模型

图 3 模糊恒流充电系统的 Matlab 仿真模型

Fig. 3 Matlab simulation system model of fuzzy constant current

图 3(b)所示为分合闸电容模糊恒流充电整体系统仿真图，系统仿真模型的上半部分是 Buck 主

电路， $C_1 \sim C_4$ 为合闸电容组， $C_5 \sim C_8$ 为分闸电容组。下半部分是模糊恒流充电的控制电路，通过电流检测电路实时检测分合闸储能电容充电的电流大小和计算出电流变化率的大小，通过二维查表获得和检测到的电流值相匹配的 0~1 之间的 10 kHz 占空比的值，输出给驱动电路，实时调节 Buck 电路的充电电容两端的电压，以实现分合闸电容的恒流充电。

仿真中电流设定值 $i_{set} = 1.2A$ ，此外，为了提高系统控制快速性，仿真图中利用二维查询表 2-D Lookup Table 替代了模糊控制器较复杂的模糊运算。如图 4 所示为 Matlab 仿真的结果。图 4(a)所示为 0.7 s 内的合闸电容模糊恒流充电仿真电流、电压波形，包括合闸充电电流 i 、合闸电容充电电压 U_c ，由图可见充电电流基本恒定在 1.2A，合闸充电电容线性上升。图 4(b)所示为合闸电容和分闸电容模糊恒流充电仿真电流电压波形，由图中可见，分合闸电容实现了恒流充电以及快速切换充电。

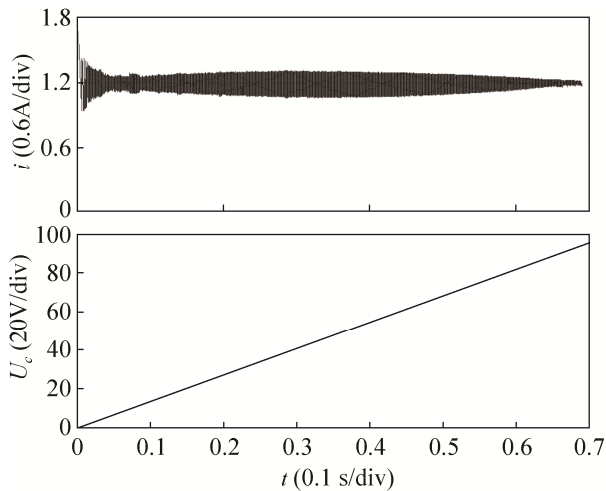
3 智能永磁断路器硬件总体结构设计

3.1 智能控制模块硬件结构

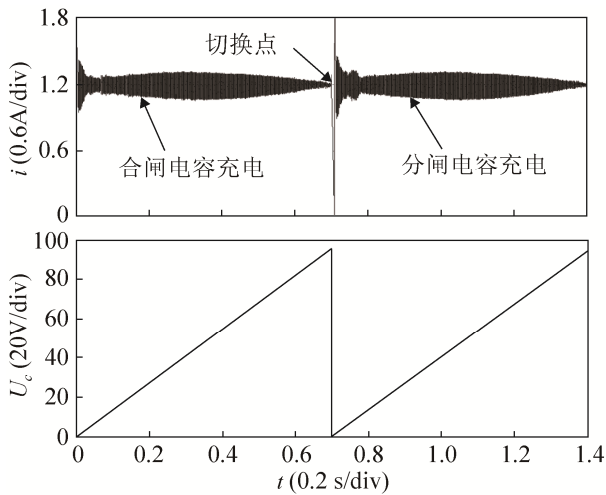
永磁断路器智能控制模块以 ARM 芯片 STM32F103RBT6 微处理器和 Buck 降压斩波电路为核心，其智能控制模块的主要单元包括：微处理器模块、Buck 降压斩波模块、IGBT 功率开关驱动模块、电流检测模块、电压检测模块和电源模块。其硬件结构框图如图 5 所示。微处理器实时检测分合闸电容充电过程的电流大小值与设定值进行比较，处理后的电流经过模糊控制后，实时调整 PWM 占空比驱动功率开关 IGBT，控制分合闸电容器组的智能模糊恒流充电；恒流充电过程中利用继电器切换电路实现分合闸电容器组的切换充电。

3.2 恒流充电 Buck 主电路设计

如图 6 所示为恒流充电的 Buck 降压斩波电路主电路模型。



(a) 合闸电容模糊恒流充电仿真波形



(b) 分合闸电容模糊恒流充电仿真波形

图4 模糊恒流充电仿真波形

Fig. 4 Fuzzy constant-current charging simulation waveforms

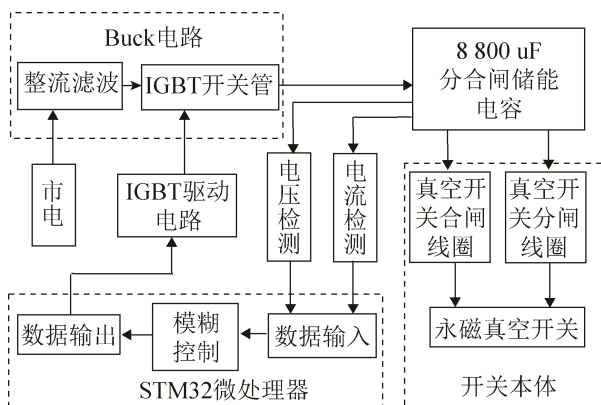


图5 恒流充电硬件结构框图

Fig. 5 Hardware structure block diagram of constant-current charging

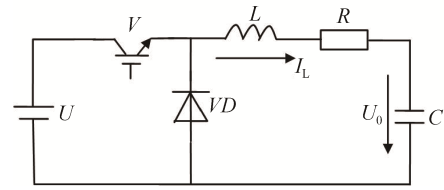


图6 恒流充电的 Buck 降压斩波主电路模型

Fig. 6 Main circuit model of buck step-down chopper for constant-current charging

当电感电流连续时,即输出滤波电感 L 的电流总是大于零。负载电压的平均值为

$$U_0 = \frac{t_{\text{on}}}{t_{\text{on}} + t_{\text{off}}} U = \frac{t_{\text{on}}}{T} U = \alpha U \quad (11)$$

式中: U 为整流滤波后的直流电压值; t_{on} 为 IGBT 功率开关管 V 处于导通的时间; t_{off} 为 V 关断的时间; T 为开关周期; α 为导通占空比。

分合闸线圈的激磁供电电容组电压可以表示为

$$U_c = \frac{1}{C} \int_0^t I_L(t) dt \quad (12)$$

式中: U_c 为电容两端电压; I_L 为续流储能电感流过的电流。

由公式(11)、(12)可知,降压斩波电路的输出电压 U_0 与占空比 α 有关;分合闸电容两端电压与电感电流对时间的积分有关。积分跟导数是可逆的,电流对时间的积分跟电容电压成比例,电容电压的导数与电容流过的电流成比例。基于此,调节占空比 α 来控制电容电压成比例增长就可以实现电容充电电流的恒定,本硬件结构设计的 IGBT 驱动电路开关频率为 10 kHz。

4 硬件电路搭建及实验分析

4.1 硬件电路搭建

图 7 所示为研制的永磁断路器硬件实物实验平台,包括智能控制单元和永磁断路器开关本体,智能控制单元由电源模块、控制模块、驱动模块、恒流充电主电路模块和分合闸电容器组组成。市电通过整流和滤波给 Buck 电路供电,仿真优化的模糊控制算法移植到智能化控制单元中,实现对分合闸电容恒流充电,完成恒流充电以后,由此实现断路器的分合闸 PWM 智能操作的激磁能量。



图7 永磁断路器硬件实物实验平台

Fig. 7 Hardware physical experiment platform of PM circuit breaker

4.2 模糊恒流充电实验测试及结果分析

依据图7所示的实验平台,测试了三种控制下的分合闸电容器组的充电电流波形,分别包括智能控制单元在IGBT处于全导通的控制下、动态调节PWM占空比的智能控制下和模糊控制下。实验测试的三种控制方案下的分合闸电容器组的充电电流波形分别如图8所示。

4.2.1 IGBT处于全导通的控制测试

智能控制模块没有对驱动模块施加任何控制,让IGBT全导通,得到的合闸电容的充电电流图形如图8(a)所示,示波器中横坐标代表时间,纵坐标每100 mV的电压代表1 A的电流,从图中可以看出电流值瞬间达到3 A左右,然后迅速下降,大约2.1 s后充电还未结束。该方法,充电瞬间会产生很高的尖峰脉冲,而且电流会越来越小,充电时间非常慢,同时多次的充放电对分合闸电容损害很大。

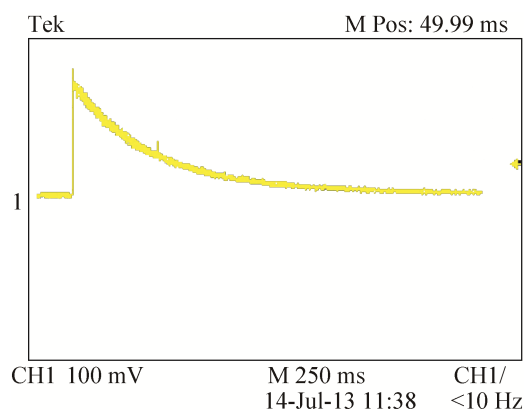
4.2.2 动态调节PWM占空比的智能控制测试

根据电流传感器实时检测到的合闸线圈电流值,实时动态调整PWM占空比,使合闸电容的充电电流得到有效控制,PWM占空比控制下合闸电容充电电流的波形如图8(b)所示。该方法,充电的瞬间也会有尖峰脉冲,但得到了有效控制,降低为2.4 A,并且充电过程有一段恒流充电,这样的充电方式也导致电容充电时间很长,且充电电流会慢慢的降到零,电路不稳定,对于不同容量的分合闸

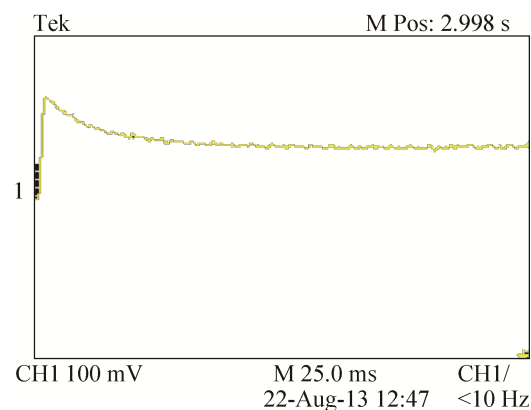
电容器组不能很好控制。

4.2.3 模糊控制测试

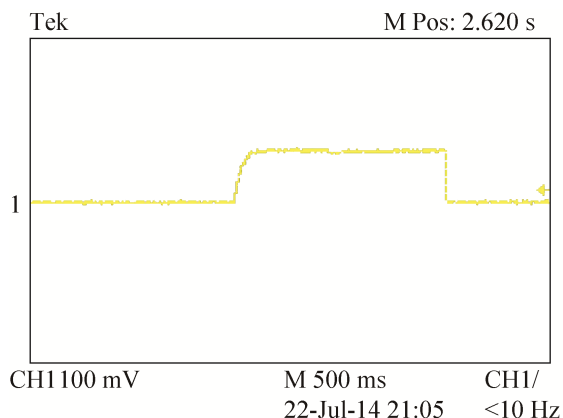
研制的智能控制单元可设定分合闸电容器组恒流充电的电流值和电压值,实验测试中设定充电电流为 $i_{set}=1.2A$,依据实时检测到电流 i ,计算电流偏差 e 、偏差变化率 e_c ,微处理器STM32依据模糊控制算法,实时调整PWM控制信号驱动IGBT,以达到合闸电容模糊恒流充电,当电压检测模块检测到充到设定的合闸电压值时,关断合闸电容充电的控制信号;此时,由分合闸电容切换电路切换到分闸电容模糊恒流充电。图8(c)为模糊控制的合闸电容恒流充电电流波形,图8(d)为模糊控制下分合闸电容恒流充电电流波形。采用模糊恒流充电方法,充电电流得到精确控制且恒定为1.2 A,充电过程不会产生电流波动变化和尖峰脉冲,大约2 s后充电结束,充电电流快速的下降到零,充电时间很快,分合闸电容器组切换速度快。



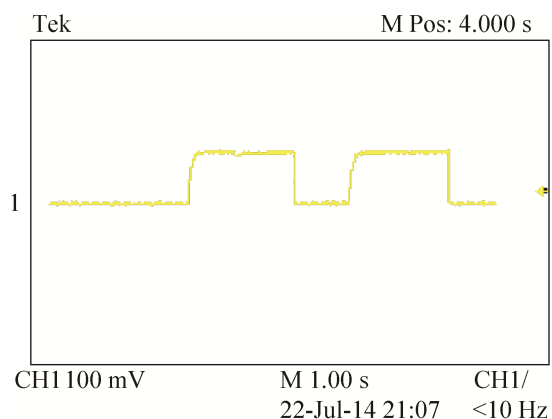
(a) 无控制的合闸电容充电电流波形



(b) PWM占空比控制下合闸电容充电电流波形



(c) 模糊控制的合闸电容充电电流波形



(d) 模糊控制合分闸电容充电电流波形

图 8 3 种控制下分合闸电容器组的充电电流波形

Fig. 8 Making and breaking capacitors charging current waveform under three control conditions

5 结论

本文在分析分合闸电容恒流充电硬件结构及其 Buck 主电路的基础上, 提出了一种针对永磁断路器分合闸电容器组的模糊控制恒流充电方法。建立了电流偏差 e 、偏差变化率 e_c 和输出量 u 的隶属度函数与模糊控制规则, 利用了二维查询表替代了复杂的模糊控制算法, 有效地实现了恒流充电模糊控制系统仿真的快速性和微控制器系统控制的实时性。最后, 针对永磁断路器构建了 Matlab 系统仿真模型并研制了一款模糊恒流充电的智能控制单元, 并搭建了实验平台, 测试了 IGBT 处于全导通的控制下、PWM 占空比控制下和模糊控制下的分合闸电容充电电流波形。仿真与实验结果显示, 设计的智能控制单元和提出的模糊控制方法可实

现对永磁断路器的模糊恒流充电, 可有效提高分合闸电容器组的使用寿命。

参考文献:

- [1] Fang Shuhua, Ni Haimiao, Lin Heyun, et al. A novel strategy for reducing inrush current of three-phase transformer considering residual flux[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S0278-0046), 2016, 63(7): 4442-4451.
- [2] Tsukima M, Takeuchi T, Koyama k, et al. Development of a high-speed electromagnetic repulsion mechanism for high-voltage vacuum circuit breakers[J]. Electrical Engineering in Japan(S0424-7760), 2008, 163(1): 34-40.
- [3] Lim Sunghoon, Min Seungjae. Design optimization of permanent magnet actuator using multi-phase level-set model[J]. IEEE Transactions on Magnetics(S0018-9464), 2012, 48(4): 1641-1644.
- [4] Ro Jong-Suk, Hong Seung-Ki, Jung Hyun-Kyo. Characteristic analysis and design of a novel permanent magnetic actuator for a vacuum circuit breaker[J]. IET Electric Power Applications(S1751-8660), 2013, 7(2): 87-96.
- [5] Wang Zhenxing, Sun Liqiong, He Sainan, et al. A permanent magnetic actuator for 126kV vacuum circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Magnetics (S0018-9464), 2014, 50(3): 129-135.
- [6] Lee Chang-Hyuk, Shin Bu Hyun, Bang Young-Bong. Designing a permanent-magnetic actuator for vacuum circuit breakers using the taguchi method and Dynamic Characteristic Analysis[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics(S0278-0046), 2016, 63(3): 1655-1664.
- [7] 林莘, 曹辰, 李斌, 等. 配永磁机构真空断路器动态仿真与实验[J]. 高压电器, 2013, 49(11): 1-5.
Lin Xin, Cao Chen, Li Bin, et al. Dynamic Simulation and Experiment of Vacuum Circuit Breaker with Permanent Magnetic Actuator[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(11): 1-5.
- [8] 汤庚, 徐建源, 林莘, 等. 基于双信号检测及跟踪的真空断路器永磁机构控制方法研究[J]. 高压电器, 2013, 49(12): 1-6.
Tang Geng, Xu Janyuan, Lin Xin, et al. Research on the Control Method of Vacuum Circuit Breakers with Permanent Magnet Actuator Based on the Detecting and Tracking of Signals[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12): 1-6.