

基于 CompactRIO 的脉冲发电机励磁调节器

王 驰, 李华俊, 卜明南
(核工业西南物理研究院, 四川 成都 610041)

摘 要: 以 CompactRIO 作为硬件平台, 采用基于图形的 LabVIEW 编程语言, 开发了适用于脉冲工作模式下的同步发电机励磁调节器。该调节器主要包括上位机和嵌入式实时系统, 实时控制和监测每一次脉冲期间的工作状态以及电压、电流波形, 控制周期精确至 1 ms。采用数字增量式 PID 算法, 达到对电压脉冲的精确控制, 满足了脉冲发电机励磁周期投入和退出的间歇式工作模式及励磁波形调节的要求。

关键词: 脉冲发电机; 励磁控制; 励磁调节器; CompactRIO

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)07-0034-05

Excitation Regulator of Impulse Generator Based on CompactRIO

WANG Chi, LI HuaJun, BU Mingnan
(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: The excitation regulator of synchronous impulse generator using CompactRIO and LabVIEW based on graph language had been developed. The excitation regulator including host computer and embedded real-time hardware was able to control and supervise the working conditions and parameters of voltage and current in very one millisecond during a pulse of discharging. The digital incremental PID control algorithm was utilizing in the regulator to be control of voltage pulse precisely. Requirements of impulse generator's excitation in adjustment of excitation waveform and operating model of periodical starting and ending were meet.

Key words: impulse generator; excitation control; excitation regulator; CompactRIO

0 引 言

HL-2A 托卡马克装置供电系统包括 3 台大型飞轮储能脉冲发电机组, 其中 125 MVA 脉冲发电机组通过可控变流器为装置所有极向磁场线圈和二级加热高压电源供电。在不同负载及不同放电参数下要求其输出电压变化率不超过 $\pm 5\%$, 每次脉冲放电时间约 9 s, 放电期间发电机负载剧烈变化, 发电机转速也相应快速下降, 这些都对发电机励磁调节系统提出了更高要求。

现有励磁调节器多数针对于长期运行的同步发电机, 不适用于脉冲发电机频繁投入和退出励磁的间歇式工作模式, 也不利于及时监测励磁系统每一次脉冲期间的工作状况和控制过程数据。

原脉冲发电机励磁调节器采用基于单任务字符式 DOS 操作系统的微机控制, 所有操作必须通过键入命令来完成, 操作过程繁琐, 人机交互界面单一。

基于微机的励磁调节器不易实现小型化和低功耗^[1], 实现实时控制时对采集卡的速率依赖程度高。NI CompactRIO 是一款紧凑无风扇设计的可重配置的控制和采集系统, 体积紧凑、可靠性高^[2], 具备高速数据采集与处理、程序并行执行、数据分析与显示等功能^[3-4], 模块化的设计不仅使用户可进行个性化配置, 容易满足各类控制需求, 而且开发周期短, 能够很好地实现脉冲发电机励磁调节器的控制功能。

为了适应当前 HL-2A 试验工况、满足脉冲发电机励磁系统工作要求, 本文研制了一台以

作者简介: 王 驰(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为发电机励磁控制。

李华俊(1970—), 男, 研究员级高级工程师, 研究方向为大功率脉冲供电技术。

卜明南(1962—), 男, 高级工程师, 研究方向为发电机励磁控制与电力电子技术。

CompactRIO 硬件平台与 LabVIEW 编程语言实现的励磁调节器。

1 励磁调节器总体结构

CompactRIO 主要由实时控制器、可重配置的 FPGA 和工业级 I/O 模块三个部分组成^[1-2,4-5]。本文采用 CompactRIO 可重配嵌入式系统和工业控制计算机, 组建一个小型工业级模块化平台。通过 NI LabVIEW Real-Time 模块、LabVIEW FPGA 模块、CompactRIO 各功能模块联合开发满足实时性要求的励磁调节器。总体结构如图 1 所示。CompactRIO 包含一个实时控制器和模拟量输入模块 AI、模拟量输出模块 AO、数字量输入输出模块 DI/O 三个模块, 共同构成励磁调节器反馈控制的核心部分, 实现独立于上位机的实时控制。上位机由装有 LabVIEW 软件工业控制计算机构成, 负责从网络中接受来自中央控制系统(中控)设置的控制参数文件, 与 CompactRIO 实时控制器通信和共享数据, 并实现参数监视、波形显示、人机交互等非实时任务。上位机、CompactRIO 和中控网络三者之间通过路由器进行数据交互传输。

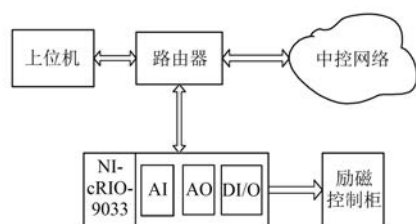


图1 励磁调节器总体结构图

2 励磁调节器反馈控制

根据 HL-2A 物理试验的要求, 在每次试验放电期间, 脉冲发电机需依照中控设置的参考波形在确定时刻输出一个持续 9 s 的平稳电压脉冲。励磁调节器反馈控制部分需要响应速度快、时序控制精确, 主要具备如下功能:

- (1) 在以太网中通过路由器与上位机的通信, 接受上位机解析的中控控制参数文件;
- (2) 数字 PID 闭环反馈控制周期精确到 1 ms;
- (3) 控制数字量信号的输入和输出;
- (4) 发电机机端电压和整流柜输出电流的

监控;

- (5) 控制电压 U_k 的 D/A 输出;
- (6) 通过以太网与上位机共享数据。

根据上述励磁反馈控制的功能要求, 确定了励磁反馈控制的硬件结构, 如图 2 所示。硬件平台选用的 NI cRIO-9033 四槽高性能控制器, 包含有 4 个 C 系列 I/O 模块的插槽、1.33 GHz 双核处理器、Kintex-7 FPGA 及无风扇紧凑型机箱, 提供的千兆以太网接口用于控制器、上位机、中控之间进行数据交互。C 系列 I/O 模块选择了 NI-9215 模块、NI-9263 模块、NI-9401 模块。其中, NI-9215 模块包括 4 路同步采样模拟输入通道 (AI) 和逐次逼近型 16 位模数转换器 (ADC), 实现对机端电压和励磁电流的采集。NI-9263 是一款 4 通道 100 kS/s 同步更新模拟输出 (AO) 模块, 以 1 kS/s 的更新速率输出控制电压 U_k 。NI-9401 是一款 8 通道双向数字输入输出 (DIO) 模块。根据硬件需要, 在 LabVIEW 中以半字节 (4 位) 为单位配置了 NI-9401 上 8 条数字线的输入和输出方向, 其中 DIO3:0 为输出方向, 以作为控制端 Ctrl 的输出, Ctrl=1 或 0 分别对应解封或封锁励磁功率单元; DIO7:4 为输入方向, 以检测起励和灭磁信号, 高电平作为有效输入。

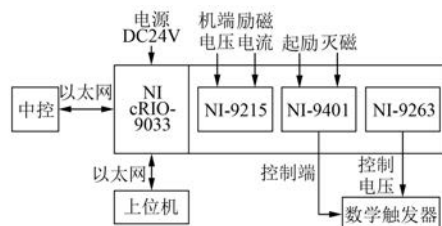


图2 励磁调节器反馈控制硬件结构图

励磁调节器反馈控制部分的程序按照图 3 所示时序进行控制。控制过程按照不同的时刻划分为延时阶段 (I)、通电阶段 (II)、反馈阶段 (III) 三个阶段, 实施分段控制。等离子体放电试验时, 中控时序控制系统以放电时刻 (④) 作为 0 时刻, 并在放电前 3 000 ms (即 -3 000 ms) 输出强励触发信号, 之后要求控制器以该时刻作为控制时序起始点, 以稳定机端电压作为控制目标, 按照 1 ms 的控制周期对脉冲发电机励磁进行实时控制。中控设置的控制参考波形如图 4 所示, ccV3 为脉冲发电机机端电压的参考波形, ccW3 为发电

机励磁电压的参考波形。根据设置的参考波形,从强励触发时刻开始至通电时刻之间的 800 ms 期间,作为延时阶段,要求励磁调节器不做任何控制。为了使发电机机端电压在-1 500 ms 反馈时刻尽可能接近 3 000 V^[6],在通电阶段励磁功率柜按照 ccW3 波形输出励磁电压,以迅速提高发电机电压满足反馈条件。在-1 500 ms 反馈阶段开始后至灭磁信号到来之前,这一阶段为反馈阶段,励磁调节器根据负载变化对发电机机端电压进行反馈控制,使电压按照中控设置的机端电压参考波形 ccV3 进行变化。由于进行反馈控制要满足机端电压处于 2 000~3 500 V 之间,如果出现测量回路断线引起失压或者在通电阶段机端电压未提高至 2 000 V,励磁调节器则不进行反馈控制,则反馈阶段按照 ccW3 波形进行,用以确保发电机安全运行。

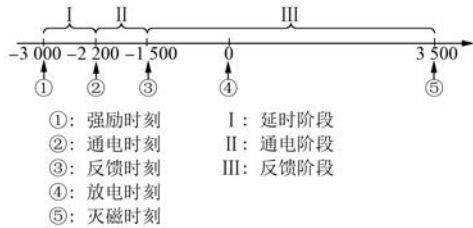


图3 励磁控制过程的时序

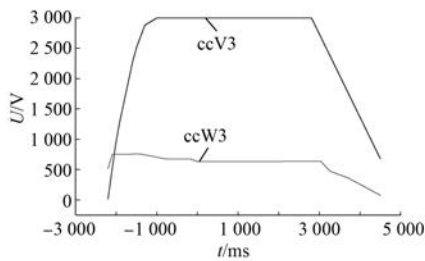


图4 中控设置的参考波形

励磁调节器反馈控制部分的程序按照如图5所示流程进行设计。脉冲发电机励磁控制过程中为满足依据不同时刻实施分段控制,在 LabVIEW 程序中设置一个时间变量 t ,在初始化过程中使 $t=-3\,000$,强励触发之后 t 严格按照 1 ms 的循环控制周期进行递增。根据时间变量 t 所处的范围,发电机励磁控制过程处理成符合要求的 I、II、III 三个不同阶段。根据中控的控制时序,在 3 500 ms 将产生灭磁触发信号,励磁反馈控制接

收到灭磁信号后进入灭磁环节。程序中为了确保可靠地实现灭磁,增设一个 $t>3\,500$ 的范围判断,在中控灭磁触发信号不可靠的情况下,程序中进行软灭磁处理,作为中控时序灭磁的冗余。程序控制过程从通电阶段过渡至反馈阶段时,设置发电机电压 $2\,000<U<3\,500$ 的范围判断,确立分支结构,以决定程序是否进行 PID 反馈控制。

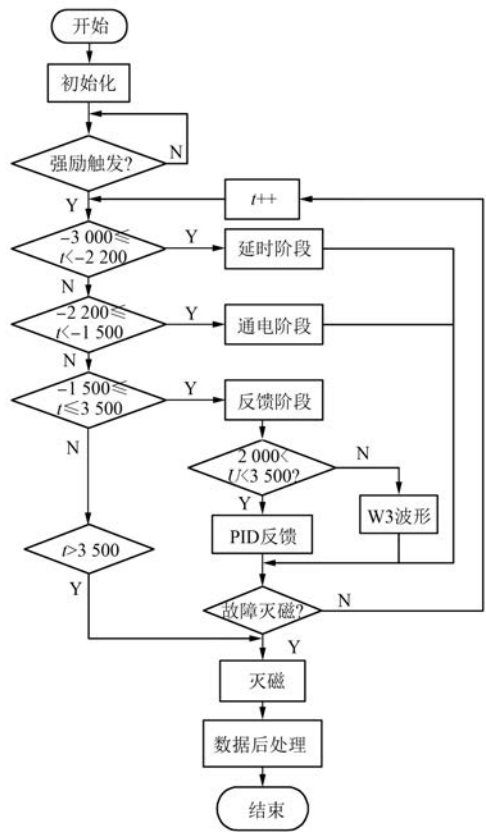


图5 励磁控制程序流程图

脉冲发电机电压调节采用对中控设置的电压参考波形 ccV3 和测量采集的发电机机端电压的差值进行 PID 反馈控制^[7-8],通过产生控制电压 U_k ,从而控制数字触发器来控制励磁电流的大小,以保持机端电压恒定并且按照参考波形变化。本文采用增量式 PID 控制算法。根据增量式 PID 算法原理有如下递推公式:

$$\Delta u(k) = Ae(k) - Be(k-1) + Ce(k-2) \tag{1}$$

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \tag{2}$$

其中:

$$e(k) = r(k) - u(k)$$

$$A = K_p \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right)$$

$$B = K_p \left(1 + 2 \frac{T_d}{T} \right)$$

$$C = K_p T_d / T$$

本励磁控制采用恒定的采样周期 T , 一旦确定了 K_p 、 T_i 、 T_d 参数, 只要根据测量电压和参考电压的前后 3 次偏差, 就可以得到控制增量, 进而确定出控制电压。

在灭磁时刻直接将控制电压 $U_k = 0$ 和控制端 $\text{Ctrl} = 0$, 由于励磁电压较高, 在励磁线圈产生较大的电流, 易对励磁功率单元造成冲击, 因此控制程序设置 1 000 ms 的灭磁程序, 在灭磁触发后, U_k 以当前值作为初始值, 在 1 000 ms 期间等变化逐渐降低至 0, 并在此期间 Ctrl 保持为 1, 实现程序灭磁, 减少对励磁功率单元柜的冲击。

3 励磁调节器上位机

励磁调节器上位机采用研华工业控制计算机, 通过路由器接入中央控制网络。上位机用于处理非实时控制数据和用户各类波形数据。用 LabVIEW 软件平台设计制作脉冲发电机励磁调节器的监控界面, 具体功能包括: 判断脉冲编号是否更新、解析和校验来自网络的脉冲控制参数文件和数据、利用共享变量方式将解析的数据通过网络传输至 CompactRIO 实时控制器、接收和显示 CompactRIO 的工作状况。上位机的监控主界面的显示内容包括: 脉冲编号更新指示、励磁投入与退出的时刻和状态、励磁实际通电工作时间、过压与过流故障、机端和励磁电压的参考波形、实际工作期间的机端和励磁电压波形。上位机与 CompactRIO 的程序运行结构如图 6 所示。CompactRIO 控制器的实时循环按照 1 ms 控制周期做数字式 PID 控制算法, 非实时循环在控制结束后, 将控制过程中产生的数据采用共享变量的通信方式传送至上位机进行后处理^[3,9-10]。上位机程序按照图 7 所示流程运行。

根据时序控制过程, 试验管理人员在两次放电的间隙更改与设置放电参数文件, 并传送至各分系统。上位机程序依据炮号的更改作为读取参数文件的触发条件, 通过利用 CALab 定时读取控制网络上 EPICS 服务器炮号 PV^[11], 利用移位寄

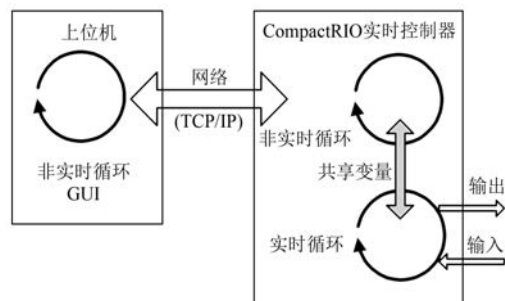


图 6 上位机与 CompactRIO 的程序结构

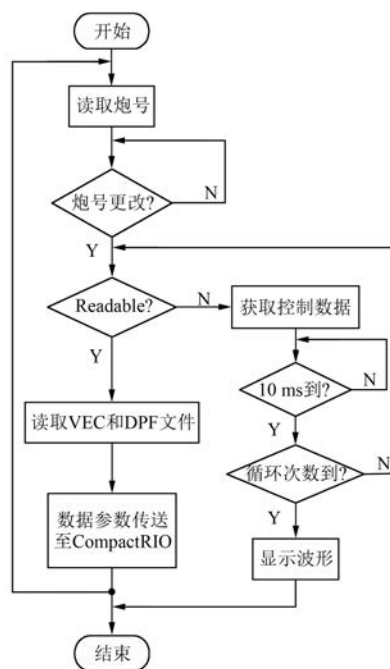


图 7 上位机程序流程图

存器保存前后两次的炮号数据。若前后两次数据不相等, 则认为炮号发生更改, 并以此作为触发条件进行放电参数的读取、解析、传输。

为了确保控制参数文件在强励触发时刻之前可靠传送到 CompactRIO, 并且在试验放电期间数据不进行刷新。上位机和 CompactRIO 实时控制器之间设置一个全局共享变量 Readable, 强励触发后使 $\text{Readable} = 0$, 封锁读放电参数操作, 灭磁放电结束后使 $\text{Readable} = 1$, 使能读放电参数操作。上位机和 CompactRIO 实现互锁, 只能在两次脉冲放电间隙读取来自中央控制网络的数据和文件, 进行数据校验, 将正确的波形数据在上位机的界面上显示, 同时在网络中经路由器传输给 CompactRIO 实时控制器且在放电期间保持数据

不刷新。另外,在 Readable = 0 期间,开启获取控制数据窗口,时间间隔设置 10 ms,循环次数为 900,用以获取从强励触发后 9 s 期间的控制数据的波形及其状态更新情况。

4 试验验证

在 HL-2A 一次脉冲放电期间脉冲发电机带载工作波形如图 8 和图 9 所示,ccV3 是发电机的机端电压参考波形, U_3 为发电机带负载运行的实际电压波形, U_k 为励磁调节器输出的控制电压波形。延时阶段励磁调节器不工作,发电机无电压输出。通电阶段励磁系统功率单元产生励磁电流,发电机空载电压在 700 ms 内迅速上升至 2 685 V,满足了反馈条件。进入反馈阶段后,励磁调节器按照设定的参考波形 ccV3,实时调整控制电压 U_k ,使发电机电压 U_3 保持在约 3 000 V。通过 HL-2A 数据采集系统在放电期间得到的测量数据,可以看出在负载剧烈变化期间(-1 000~3 000 ms)发电机机端电压为 2 880 ~ 3 075 V,电压波动率是 $\pm 4\%$,达到设计要求。

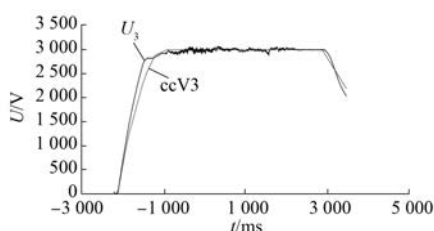


图 8 放电期间发电机电压波形

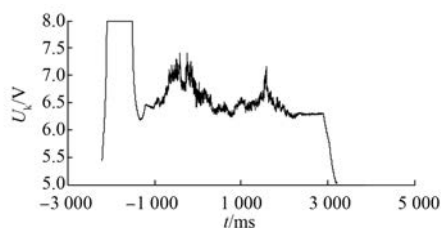


图 9 放电期间控制电压波形

5 结 语

根据 HL-2A 物理试验对脉冲发电机励磁控制系统的要求,设计了基于 CompactRIO 可重配嵌入式系统实现的励磁调节器反馈控制和上位机部分,并且介绍了各部分的硬件结构,分析了励磁调节器的时序控制过程和程序运行结构,采用

LabVIEW 图形编程语言实现了控制过程。结合试验测试验证了该励磁调节器在各个控制阶段的运行情况,在反馈工作阶段可快速响应因负载投切变化引起的发电机机端电压波动,满足了在 HL-2A 试验期间脉冲发电机励磁频繁投入和退出的间歇式工作模式。

【参考文献】

- [1] BILIK P, KOVAL L, JIRI H. CompactRIO embedded system in power quality analysis [C] // Computer Science and Information Technology, 2008, IMCSIT 2008, International Multiconference on, 2008: 577-580.
- [2] 王丁丁,武杰,张杰,等.基于 CompactRIO 的数据采集模块设计[J].核技术,2012,35(7): 539-542.
- [3] LIN T, XIE Y X, TANG J. Design of compactRIO-based acquisition system [C] // Environmental Science and Information Application Technology (ESIAT), 2010 International Conference on, 2010: 678-681.
- [4] YUSIVAR F, SEMBIRING R J. Implementation of space vector pulse width modulation using compactrio [C] // Rural Information and Communication Technology and Electric-Vehicle Technology (RICT and ICEV-T), 2013 Joint International Conference on, 2013: 1-6.
- [5] MOHD S, ZULKIFLI S A, RANGKUTI R G A, et al. Electric vehicle energy management system using national instruments and CompactRIO and LabVIEW [C] // Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA), 2013 IEEE International Conference on, 2013: 1-6.
- [6] 李维斌,卜明南,刘学梅,等.HL-2A 装置脉冲发电机励磁控制系统[J].核聚变与等离子体物理,2014(1): 40-46.
- [7] 翁情安,张炳达,郝爽.基于 TMS320F2812 的同步发电机励磁控制器[J].电力系统保护与控制,2009,37(19): 92-96.
- [8] 李扬,谢晖,陈侃.基于 LabVIEW 的 PID 控制系统设计与实现[J].中国测试技术,2008,34(3): 74-76.
- [9] CHEN W, SU J. Comparison of several communication methods between host computer and compactRIO [C] // Intelligent Control and Automation (WCICA), 2012 10th World Congress on, 2012: 3962-3965.

(下转第 65 页)