

基于FPGA的空载变压器相控合闸系统设计

阐述了延迟合闸策略的原理,选择一种电力变压器作为代表,针对不同的剩磁情况对最佳合闸时间做了ATP仿真,据仿真结果确定最佳合闸时间的误差范围。同时,提出并设计一种基于FPGA的相控合闸系统,通过控制、记录前次分闸的时间和电压相位推算剩磁量,配合高准确度的永磁操动机构能够将误差控制在规定的范围内,并搭建实验回路进行了涌流测试,实验表明系统能够有效削减励磁涌流。

李靖祎 廖敏夫 段雄英 吕 洋/大连理工大学电气工程学院

0 引言

变压器是电网中重要的能量转换设备,需要经常投入或切除,其中以空载变压器的动作较为频繁。空载变压器投入时存在励磁涌流问题,解决涌流问题方法很多,选相合闸策略是最经济适用的一种^[1]。常用的三种合闸策略中,延迟合闸策略由于只需知晓一相剩磁,因而在三种合闸策略中应用最广。

延迟合闸策略中首动相的投入时间需要根据其剩磁的大小进行计算得到,在首动相动作完成后,延时两个周期对另外两相进行操作即可。这里首动相的动作要求同样适用于单相空载变压器。而现阶段高准确度永磁机构的使用,为相控技术提供了可靠支持^[2]。基于以上原理,本文在仿真中对于首动相不同剩磁情况的投入进行了分析,并对每种情况的最佳合闸时间进行了误差范围总结。借助仿真结果提出了一种采用FPGA芯片的空载变压器选相控制系统,能够很好地解决空载变压器的投入涌流问题。

1 剩磁与首动相动作时间仿真分析

变压器相控合闸技术核心就是使每相电压的预感应磁通等于每一相的铁心剩余磁通值,这样在投入变压器时,其内部铁心的磁通不会发生突变^[3-4],平稳进入稳态,没有暂态过程也就不产生励磁涌流。对单相变压器来说就是根据剩磁量在合适的相位点投入,而三相的延迟合闸策略步骤是依此原则先关合首动相(以下文中均定义为A相),利用磁平衡关系延时一段时间后关合另外两相^[5],通常选择2~3个周期后的A相电压零点处。

设正常运行下的铁心最大磁通为 Φ_M ,剩磁值为 Φ_x ,为了区别磁场方向,区分正负。A相电压某一负向峰值对应时刻为 T ,工频电网电压周期为20 ms。则根据正弦波形下的磁通电压相位关系可以得到首动相A的最佳合闸时间为

$$t = T - \frac{10 \arcsin(\Phi_x / \Phi_M)}{\pi} \quad (1)$$

式(1)求出的是以 T 为中心的半个周期内的最佳合闸时间, t 与 T 时间差代表由剩磁量 Φ_x 决定的首动相合闸相差。

本文通过ATP仿真软件,建立一款三相电力变压器模型,时间上取A相某一负向电压峰值时刻115 ms作为参考点,延迟时间定为两个周期,B、C相在160 ms合闸。以A相正向50%剩磁量为例^[6],根据式(1),计算出此条件下最佳合闸时间应为A相电压负向峰值提前1.667 ms,仿真的励磁涌流如图1a所示,局部放大的曲线为A相,从结果来看达到了抑制涌



李靖祎/硕士研究生

关键词/Keywords

空载变压器 ·
最佳合闸时间 ·
励磁涌流 ·
FPGA控制器 ·

国家自然科学基金(51337001, 51277020)。

流的目的。如果将最佳合闸时间滞后，电流的波形会发生畸变^[7]，同时幅值也会成指数倍的上升。当合闸时间提前0.9 ms后的波形如图1b所示，可以看出A相励磁涌流的幅值已经开始明显增加，由于A相合闸时间选择不当，另外两相合闸后的电流畸变情况也更加严重。

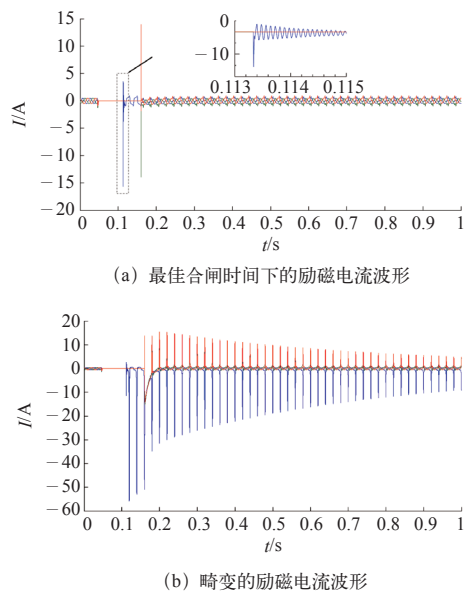


图1 仿真的励磁电流波形

根据各种情况下励磁涌流的波形与幅值归纳最佳合闸时间的误差范围，采用的标准是合闸后3个周期内电流不超过正常励磁电流的20倍。根据仿真的结果，将仿真对应的结果归纳如下表所示。

表 A相不同剩磁下最佳合闸时间误差范围

剩磁量(%)	最佳合闸时间/ms	误差范围/ms
-80	117.95	-0.87~0.92
-60	117.05	-0.74~0.77
-40	116.31	-0.69~0.72
-20	115.64	-0.64~0.65
0	115	-0.60~0.61
10	114.68	-0.64~0.63
30	114.03	-0.71~0.69
50	113.33	-0.76~0.73
70	112.53	-0.85~0.80

通过对上表数据以及相关仿真结果的分析，可以得出结论：由于感应磁通是正弦波，剩磁较小时，在零点附近的磁通变化率最大，所以要求最为精密，误差范围最小。剩磁较大时由于磁通

变化率小，可以适当放宽合闸时间范围。总体来说在首动相最佳关合时间附近允许存在一定误差，只要误差在合理的范围内对于励磁涌流的削减没有太大影响，允许误差的范围对于操动机构本身存在的分散性有很大意义。

2 基于FPGA的相控合闸系统实现方法

2.1 设计思路

选用现场可编程门阵列（Field-Programmable Gate Array，FPGA）作为控制器的主要依据是FPGA本身执行并行算法，与传统的DSP、单片机控制芯片相比，并行操作可以更快速处理数据，且时钟周期性好，可以保证合闸计算的准确度。同时在输入输出接口的定义上也有很大优势，芯片预留的I/O口仅需少量语句定义便可直接使用。编程采用的Verilog语言针对底层硬件建模，其可读性、移植性和扩展性等相对于纯软件代码有很大优势。

系统中控制器的设计采用模块化思想，整体由若干功能分区组成。主要包括检测模块、去抖滤波模块、合闸时间计算模块、电容电压检测模块、解锁模块和输出模块等。控制器外接晶闸管驱动电路、电容放电回路和电容充电模块等，永磁机构连接灭弧室作为受控开关，构成整个相控合闸系统。

控制器设计平台采用Quartus 2开发平台，软件部分算法主要包括有限长单位冲激响应（Finite Impulse Response，FIR）滤波器、去抖处理、波形零点定位和合闸时间计算等部分，其中核心的延时时间计算公式为

Td = 1/f - Tz + Tc mod 1/2f - T1 + TM (2)

式中，f为电网频率；Tz为合闸指令距离参考零点的时间；Tc为永磁机构的固有合闸时间；T1为程序执行所需时间；TM为剩磁决定的投入时间差。最终得到的延时时间Td即为接到合闸命令到给出合闸控制信号的最小相控延迟时间。

硬件部分根据需要单独设计了底层功能板，

集成了需要的采样、隔离、电容电压输入、命令输入及输出驱动等模块,实现FPGA与控制信号的对接,同时能够将控制器与强电信号隔离,提升系统稳定性。

强电开关部分采用永磁机构的控制技术,利用大容量晶闸管连接电容器对永磁机构线圈放电的回路,驱动永磁机构动作,带动触头完成合分闸操作。

系统的合闸操作流程示意图如图2所示。

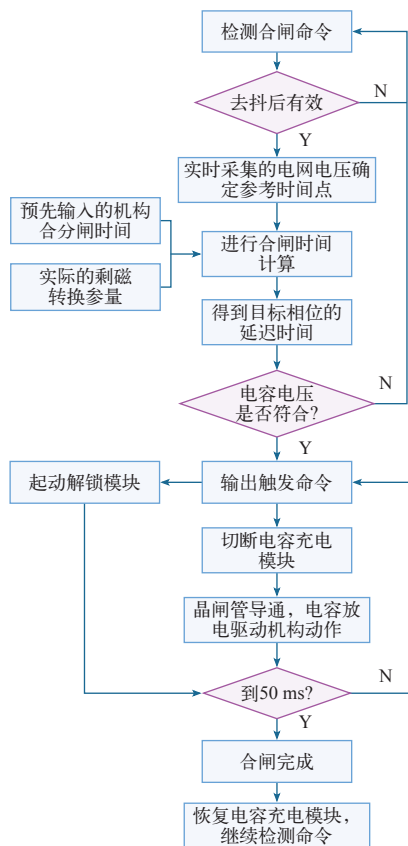


图2 合闸操作程序流程

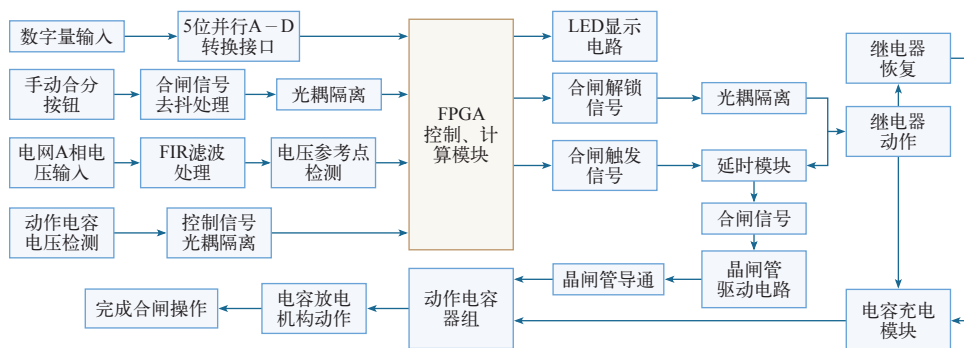


图3 FPGA相控合闸系统结构

2.2 剩磁问题解决

与投切电容器组的固定策略不同,变压器是感性负载,涉及到磁场的计算,在退运行时还会存在剩磁,而剩磁问题一直是变压器选相投切的重要障碍。本文提及的控制器由于具备分闸操作控制能力,所以采用这种方式进行剩磁的估算。记录前一次分闸操作的电压相位,根据公式推算出剩磁的大小,通过输入端输入一定的数字量控制自动相的动作时间,从而达到选相合闸的目的。

根据理论设计,控制器预留5位A-D转换输入口,并定义五位数字量 j :剩磁转换参量。根据前次分闸的时间,间接计算剩磁的百分比。将转换后的剩磁值百分比通过公式转换为数字量 j 后输入FPGA控制器,参量 j 将半个周波32等分,半个周波可以对磁通从最大到最小的所有情况。同时依靠FPGA的并行操作快速将延时时间算出,每个时间间隔为

$$\Delta t = 10 / 32 \text{ ms} = 0.3125 \text{ ms} \quad (3)$$

式(3)可以看出选相控制器的算法分散性维持在0.16 ms左右。考虑到永磁机构自身的动作分散性及电容电压等其他因素的制约,在这种设计下选相准确度能够达到0.6 ms以内。从仿真结果来看,偏差在0.6 ms的情况下对于首动相的开断没有造成较大的影响。

根据以上设计思想,以cyclone-ii芯片为核心构筑的相控合闸系统结构如图3所示。

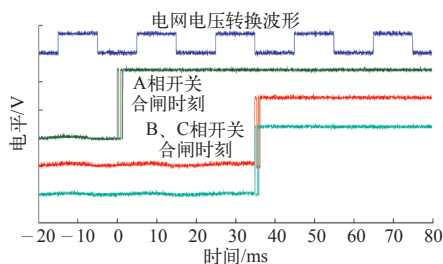
3 系统平台实验

限于条件,大型三相电力变压器不能随意

拆卸实验, 首先将控制器与未带变压器的三相永磁机构搭建成交载控制回路, 进行控制准确度测试, 实验现场与部分实验结果如图4所示。



(a) 实验现场图



(b) 无剩磁条件下的关合时序

图4 控制器空载准确度实验

图4b中, 最上方为电网电压转换后的方波波形, 用来表征A相电压的相位。三相触头的合闸时刻均在要求的相位 (A相为峰值, B、C相为零点), 触头存在一定弹跳会影响合闸效果, 但在时序上可以认为已经符合设计要求, 在不计燃弧时间情况下的系统控制时间误差在0.6 ms以内。

预击穿是断路器合闸必须考虑的问题, 然而在本文涉及的中低压断路器领域中, 预击穿引起燃弧的影响在理论上可以忽略不计。对于高压断路器, 预击穿的影响则不可忽视, 对所使用的10 kV真空断路器进行了针对性的合闸测试, 在系统电压最高点未发现明显的预击穿现象, 通过断路器机械特性测试仪可以测得合闸平均速度约为1.1 m/s, 这种速度下发生预击穿燃弧的概率几乎为零。

完成空载实验后利用小型单相变压器模拟三相变压器的首动相, 并拟定各种剩磁的情况, 测试控制系统的涌流抑制情况。首动相的操作结果直接影响到后两相的涌流大小, 同时完全可以作为验证单相变压器控制效果的依据。在连接小型单相变压器后, 搭建如图5所示实验回路。

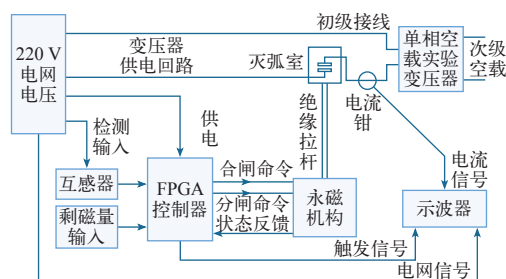
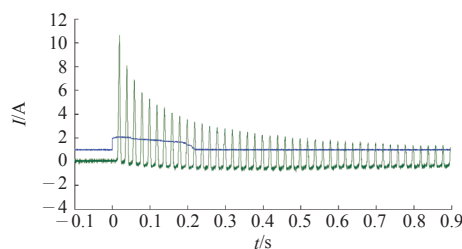


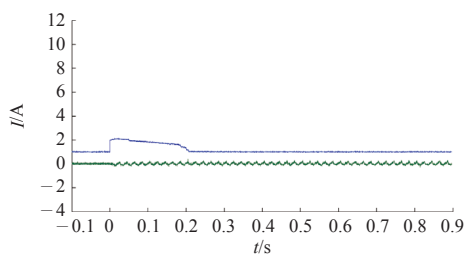
图5 实验回路图

实验断路器 (带有斥力机构) 参数: 合闸时间7.6 ms, 合闸分散性0.4 ms; 分闸时间2.3 ms, 分闸分散性0.3 ms。实验变压器参数: 一次侧额定电压220 V, 额定负载电流4.55 A。示波器采集时间1 s, 触发信号为晶闸管门极控制信号, 利用10 mV/A的电流钳测定了不同剩磁情况下的励磁涌流。

通过控制断路器的分闸时间, 将剩磁的量固定在50%左右。从图6可以看出随机合闸的涌流值较大, 第一个周期内的励磁涌流值已达正常运行负载电流的2.4倍, 是正常情况下励磁涌流的50多倍, 在最严重的情况下涌流值还将更大。而利用了选相合闸策略后, 在最佳合闸时间投入, 明显削弱了涌流值的大小, 可以认为直接进入稳态, 证明了最佳合闸时间控制的有效性。对单相变压器可直接应用, 对三相变压器可作为延迟合闸策略的首动相进行应用。



(a) 随机合闸涌流



(b) 相控合闸涌流

图6 随机合闸与相控合闸涌流对比

(下转第40页)

辨识。

4) 不拆头下的绝缘电阻试验、套管介损和电容量试验、绕组变形阻抗法试验以及电压比试验得到的结果与拆头下基本一致。

参考文献

- [1] 李顺尧, 谢建容. 220 kV变压器绕组变形不拆引线测试方法探讨 [J]. 高压电器, 2010, 46 (9): 88-91.
- [2] 张振兴, 陈权. 不拆引线测量500 kV自耦变压器套管电容量及介质损耗的方法 [J]. 中国电力, 2014, 47 (8): 21-26.
- [3] 李海峰, 王吉, 付刚, 等. 杂散阻抗对500 kV自耦变压器不拆高压引线试验的影响 [J]. 河南电力, 2013 (1): 9-13.
- [4] 姚冬燕. 330 kV变压器不拆引线的试验方法 [J]. 宁夏电力, 2007 (1): 28-29.
- [5] 王勇, 赵庆喜. 500 kV变压器不拆高压引线进行预防性试验的方法探讨 [J]. 河南电力, 2008, 28 (4): 31-39.
- [6] 李志斌, 杨旭东. 500 kV变压器不拆高压引线进行预防性试验的方法探讨 [J]. 黑龙江电力, 2005, 7 (1): 60-62.
- [7] 刘燕. GIS出线的110 kV及35 kV变压器不拆头试验方法的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [8] 邢继宏, 徐鹏, 周喜军. 琅琊山电厂封闭式电缆连接的220 kV变压器不拆头预防性试验研究与实施 [J]. 华东电力, 2010, 38 (10): 1596-1598.
- [9] 申积良, 黄福勇, 周卫华, 等. 油/气绝缘套管出线现场试验方法 [J]. 湖南电力, 2009, 29 (2): 5-7.
- [10] 许军, 李坤. 电接触的接触电阻研究 [J]. 电工材料, 2011 (1): 10-13.

(收稿日期: 2015-06-29) **EA**

(上接第33页)

4 结束语

本文分析了空载变压器在不同剩磁条件下的最佳合闸相角, 并借助ATP软件进行了仿真验证, 仿真结果适用于三相变压器的首动相和单相变压器。依据仿真结果设计了基于FPGA的空载变压器选相合闸控制系统, 并测试了控制准确度。对小型单相变压器的实验结果表明, 在机构性能良好的情况下, 合闸分散性能能够保持在0.6 ms左右, 符合变压器选相合闸的要求, 使用控制策略, 与随机合闸对比抑制涌流的效果明显。实际应用中三相变压器的投入效果还要进行进一步的测试, 完善系统功能。

参考文献

- [1] 丁富华, 邹积岩, 方春恩, 等. 相控真空断路器投切空载变压器的应用研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (3): 89-93.
- [2] 林明星, 廖敏夫. 选相分合闸削弱变压器励磁涌流的应用研究 [J]. 四川电力技术, 2008, 31 (B08): 5-9.
- [3] Nordin R, Holm A, Norberg P. Ten years of experience with controlled circuit breaker switching in the swedish regional network [C]. CIGRE, Paris, 2002.
- [4] 郝治国, 张保会, 褚云龙, 等. 变压器空载合闸励磁涌流抑制技术研究 [J]. 高压电器, 2005, 41 (2): 29-41.
- [5] 沃建栋, 郑涛, 万磊, 等. 基于合闸控制策略的变压器励磁涌流抑制措施研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010 (22): 32-36.
- [6] 唐博, 彭安金, 王高丰, 等. 采用选相位关合技术消除变压器空载合闸的励磁涌流 [J]. 电气开关, 2007, 45 (3): 22-25.
- [7] 黄金, 方春恩, 李天辉, 等. 计及剩磁的变压器励磁涌流的仿真研究 [J]. 变压器, 2009, 46 (11): 40-43.

(收稿日期: 2015-07-09) **EA**