

有源滤波器电流预测滞环控制

孙蓉¹, 袁晓东¹, 周宇浩², 葛乐², 杨志超²

(1.江苏省电力公司电力科学研究院,江苏南京 211103;2.南京工程学院电力工程学院,江苏南京 211167)

摘要:为改善有源滤波器(APF)因采样率较低导致的控制误差,提出一种基于电流预测的滞环控制方法。分析传统滞环控制产生误差的原因,基于APF的动力学方程构建输出电流预测模型,利用线性插值预测指令电流,分析电流预测滞环控制工作特性。基于NI公司的CompactRIO平台设计APF控制器,实验对比分析了该方法与传统滞环控制的效果,验证了该方法改善APF控制误差的有效性。

关键词:有源滤波器;电流预测;滞环控制;控制误差

中图分类号:TM761,TN713.8

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2015)05-0054-05

随着我国日新月异的工业化进程,电网接入了大量非线性和冲击性负载,负载产生的谐波、无功对电网的电能质量带来了巨大挑战。传统的无源滤波器、投切电容器组等补偿设备已无法满足要求,而有源滤波器(APF)以其不受电网参数影响,可进行动态、快速精细化补偿等优点,正在被广泛推广。APF的补偿效果,一方面取决于电流检测算法的准确性,另一方面取决于电流控制算法的性能^[1,2]。

常用的控制算法有滞环控制、电压矢量控制^[3]、无差拍控制^[4]、预测控制^[5,6]等,这些算法控制效果各有所长。电流滞环控制以其快速的动态响应、鲁棒性好、有内在限流能力等优点,是工程应用最广泛的控制算法。目前对滞环控制的研究主要在以下几个方面:文献[7]通过引入频率反馈,对开关频率进行闭环控制,稳定了开关频率;文献[8]根据开关频率与环宽的函数关系,采用可变环宽来实现定频;文献[9]利用控制器的过采样算法稳定了开关频率,同时提高了控制精度;文献[10-12]在滞环控制中引入空间矢量控制,优化了滞环控制的开关状态。以上研究主要是对滞环控制的开关频率及开关状态进行了优化,而对滞环控制的精度研究较少。通过APF的工程实践发现,实际控制误差无法完全控制在理论误差范围以内,存在优化改进的空间。为改善滞环控制的控制精度,文中将基于模型的电流预测方法和传统滞环控制有机结合,提出一种基于电流预测的APF滞环控制方法。

1 电流滞环控制误差分析

影响电流滞环控制精度的因素主要有以下两方面。一方面,滞环控制本身就是一种误差控制,其控制状态是根据电流是否超出环宽来改变的,所以其环宽的1/2就是其误差。这部分误差理论上是无法避免的,要想减小这部分误差只有改变其环宽,但其最小环宽的设置取决于电力电子器件的开关频率、输出侧电

感、直流侧电压等,因此若要改变环宽只有重新设计主电路。另一方面的误差是由工程因素引起的,在实际的APF控制系统中,控制器只能处理离散数据,控制算法根据采样点进行逐点控制,但是系统的采样率是有限的,这就导致了控制的延时,具体分析如图1所示。图中: i^* 为指令电流; i 为逆变器输出电流; T_c 为采样周期; h 为环宽。当 $i(1) < i^* + h/2$ 时控制状态不会发生改变,电流将继续上升直到下一个采样点 $i(2) > i^* + h/2$ 时,控制器判断出电流超出环宽,改变控制状态,理论上控制状态的改变将在 i 超过 $i^* + h/2$ 的一瞬间完成,但是由于采样率有限导致了延迟,产生了误差 Δi 。很明显系统采样率越高误差 Δi 越小,另外电流的变化速率越小误差也会越小,由于电流的变化速率是实时变化的,因此这种误差的大小是随机的,有时可能是环宽的好几倍。

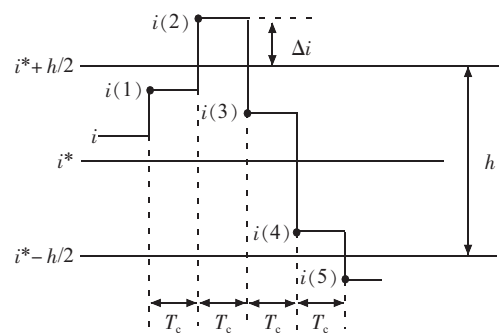


图1 误差分析

可见滞环控制的实际误差是由理论误差和工程误差共同作用产生的,为 $h/2 + \Delta i$,理论误差由主电路决定,无法通过优化控制算法来减小,但工程误差可以通过优化控制算法减小。

2 基于电流预测的APF滞环控制

根据电流滞环控制的误差分析可知,提高系统的采样率可以明显改善控制误差,但是由于技术和成本的限制,系统的采样通常不会超过50 K/s。考虑能否对

APF 的输出电流进行预测,在 2 个实际采样点之间预测几个虚拟点,用这些虚拟点参与滞环控制,在电流超出环宽时就改变控制状态,就可以等价于增加系统采样率。控制原理如图 2 所示。

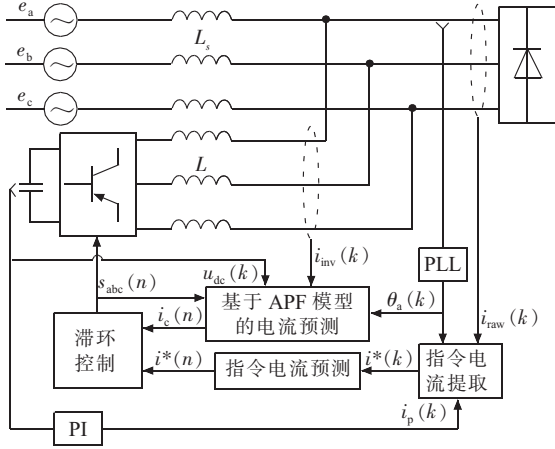


图 2 基于电流预测的 APF 滞环控制

2.1 输出电流预测

APF 主电路模型如图 3 所示。

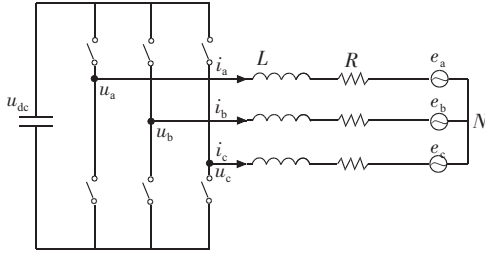


图 3 APF 主电路模型

由电路原理可知:

$$\begin{cases} u_a = e_a + L \frac{di_a}{dt} + Ri_a \\ u_b = e_b + L \frac{di_b}{dt} + Ri_b \\ u_c = e_c + L \frac{di_c}{dt} + Ri_c \end{cases} \quad (1)$$

定义每个桥臂的开关状态为:

$$s_j = \begin{cases} 1 & \text{上桥臂导通, 下桥臂关断} \\ 0 & \text{下桥臂导通, 上桥臂关断} \end{cases} \quad j = a, b, c$$

$$e_j = s_j u_{dc} - u_N \quad (2)$$

由式(1)和(2)可得:

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = s_a u_{dc} - u_N - e_a \\ L \frac{di_b}{dt} + Ri_b = s_b u_{dc} - u_N - e_b \\ L \frac{di_c}{dt} + Ri_c = s_c u_{dc} - u_N - e_c \end{cases} \quad (3)$$

设三相电路是对称的,则:

$$\begin{cases} e_a + e_b + e_c = 0 \\ i_a + i_b + i_c = 0 \end{cases} \quad (4)$$

由式(3)和(4)联立方程组解出:

$$u_N = \frac{s_a + s_b + s_c}{3} u_{dc} \quad (5)$$

因此式(3)可化为:

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = \frac{2s_a - s_b - s_c}{3} u_{dc} - e_a \\ L \frac{di_b}{dt} + Ri_b = \frac{2s_b - s_a - s_c}{3} u_{dc} - e_b \\ L \frac{di_c}{dt} + Ri_c = \frac{2s_c - s_b - s_a}{3} u_{dc} - e_c \end{cases} \quad (6)$$

由于控制器只能处理离散的数据,因此将有源滤波器的模型离散化可得:

$$\begin{cases} \frac{L[i_a(k+1) - i_a(k)]}{T_c} = \frac{2s_a(k) - s_b(k) - s_c(k)}{3} u_{dc}(k) - e_a(k) - Ri_a(k) \\ \frac{L[i_b(k+1) - i_b(k)]}{T_c} = \frac{2s_b(k) - s_a(k) - s_c(k)}{3} u_{dc}(k) - e_b(k) - Ri_b(k) \\ \frac{L[i_c(k+1) - i_c(k)]}{T_c} = \frac{2s_c(k) - s_b(k) - s_a(k)}{3} u_{dc}(k) - e_c(k) - Ri_c(k) \end{cases} \quad (7)$$

式中: k 为某采样时刻。根据 APF 的离散模型可知,通过上一个采样时刻的数据可推算出下一个采样时刻的电流,以 A 相为例, $k+1$ 时刻的电流为:

$$i_a(k+1) = \left(1 - \frac{RT_c}{L}\right) i_a(k) + \frac{T_c}{L} \left[\frac{2s_a(k) - s_b(k) - s_c(k)}{3} u_{dc}(k) - e_a(k) \right] \quad (8)$$

由于 RT/L 的值非常小,因此可以忽略,式(8)化简为:

$$i_a(k+1) = i_a(k) + \frac{T_c}{L} \left[\frac{2s_a(k) - s_b(k) - s_c(k)}{3} u_{dc}(k) - e_a(k) \right] \quad (9)$$

若人为虚拟设置一个周期 T 替换采样周期 T_c , 式(9)仍将成立,改写为:

$$i_a(n+1) = i_a(n) + \frac{T}{L} \left[\frac{2s_a(n) - s_b(n) - s_c(n)}{3} u_{dc}(n) - e_a(n) \right] \quad (10)$$

此时 $i_a(n+1)$ 为 $i_a(n)$ 经过 T 时间之后的值,利用式(10)预测 2 个采样点之间的值。令 $T_c = NT$, N 为大于 1 的整数, $n=0, \dots, L, N-1$, $i_a(k)$ 为实际采样点, $i_a(n)$ 为预测值,则预测值与实际采样点的关系如式(11):

$$\begin{cases} i_a(0) = i_a(k) \\ i_a(n+1) = i_a(n) + \frac{T}{L} \left[\frac{2s_a(n) - s_b(n) - s_c(n)}{3} u_{dc}(n) - e_a(n) \right] \\ i_a(N) = i_a(k+1) \end{cases} \quad (11)$$

由于直流侧电压在一个采样周期内基本保持稳定,则:

$$\begin{cases} u_{dc}(0) = L = u_{dc}(N-1) = u_{dc}(k) \\ u_{dc}(N) = u_{dc}(k+1) \end{cases} \quad (12)$$

电网电压 $e_a(n)$ 是正弦变换的,通过采样点的相位就可以推算出若干时刻后的电压, T_s 为工频周期, T 为预测周期, $\theta(k)$ 为 k 采样时刻的相位,每经过一个预测周期相位增加 $\frac{2\pi T}{T_s}$,则 2 个采样点之间的电网电压函数如式(13):

$$\begin{cases} e_a(0) = e_a(k) \\ e_a(n) = A \sin[\theta(k) + \frac{2\pi n T}{T_s}] \\ e_a(N) = e_a(k+1) \end{cases} \quad (13)$$

2.2 指令电流预测

滞环控制的本质是电流跟随,预测出 APF 的输出电流后,必须也要预测出相应时刻的指令电流,才能进行比较控制。令 $i^*(k)$ 为 k 采样时刻检测到的谐波电流,由于在 2 个采样点之间谐波的变化很小,因此可假设 2 个采样周期内指令电流近似为直线,即 $i_a^*(k-1)$ 、 $i_a^*(k)$ 和 $i_a^*(k+1)$ 在同一直线上。将以 $i_a^*(k-1)$ 、 $i_a^*(k)$ 为端点直线延长,该延长线上的点即为 $i_a^*(k)$ 、 $i_a^*(k+1)$ 之间的预测值,在每一个预测周期内变化量是一个常量且为 $[i_a^*(k) - i_a^*(k-1)]/N$,则指令电流 $i_a^*(n)$ 的预测函数如式(14):

$$\begin{cases} i_a^*(0) = i_a^*(k) \\ i_a^*(n) = i_a^*(k) + \frac{n[i_a^*(k) + i_a^*(k+1)]}{N} \\ i_a^*(N) = i_a^*(k+1) \end{cases} \quad (14)$$

2.3 电流预测滞环控制特性分析

令采样周期为 T_c ,传统的滞环控制电流只在采样时刻参与比较,因此如果采样率不高,就会导致较大的控制延时,输出电流超出环宽后较长时间内无法改变开关状态,导致控制误差增大,如图 4 电流走向为 $A-B-D-E$,控制误差为 $h/2 + \Delta i_2$ 。该控制方法与传统的滞环控制的最大不同是,在滞环比较器前加入了电流预测环节,用预测电流代替实际采样电流参与滞环控制。在一个采样周期中对输出电流与指令电流分别进行预测,令预测周期为 T , $T_c = 5T$,利用 APF 模型预测出一个采样周期中的 4 个输出电流值,同时预测出一个采样周期中的 4 个指令电流,将这些值进行滞环比较。由于预测周期是采样周期的 $1/5$,因此可以在输出电流超出环宽后的较短时间内改变逆变器的开关状态。如图 4 所示在 $i(2)$ 时刻系统预测出电流超出环宽,发出指令关断开关,电流开始下降,控制误差为 $h/2 + \Delta i_1$,电

流走向变为 $A-B-C$,很明显 $\Delta i_1 < \Delta i_2$ 系统控制误差减小了。每一次逆变器改变开关状态,都会将开关状态反馈给预测算法,使得每一次的预测都是根据 APF 的实际状态得出的。该预测算法只在一个采样周期内进行预测,一旦系统接收到新的采样点,就舍弃前一次的预测数据利用最新的采样数据重新开始预测,因此能自动修正预测误差,避免预测误差的累计。

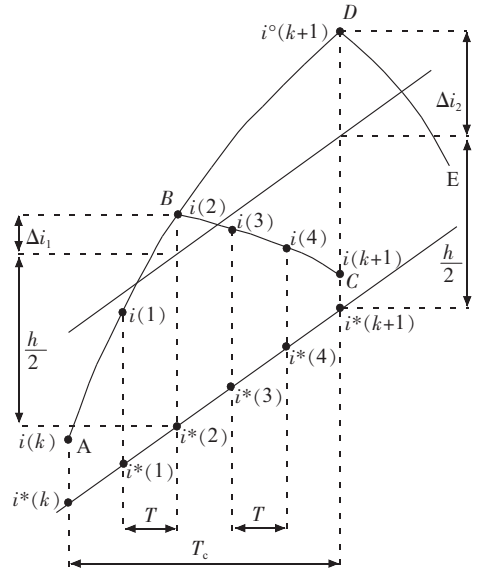


图 4 输出电流控制特性

3 系统实现及仿真试验

系统主电路参数如下:直流侧电容为 $700 \mu F$,电压为 $800 V$,输出侧电感为 $6 mH$,IGBT 选用三菱公司的 IPM 模块,开关频率 $20 kHz$ 。

由于预测算法的计算周期只有几微秒,对于单线程控制器会耗费很多资源,导致其他的功能无法实现。因此采用 NI 公司的 CompactRIO-9068 控制器,其内置 FPGA 芯片,具有天然并行的结构,循环之间不存在资源竞争,可以更好满足控制要求。控制器软硬件结构如图 5 所示。

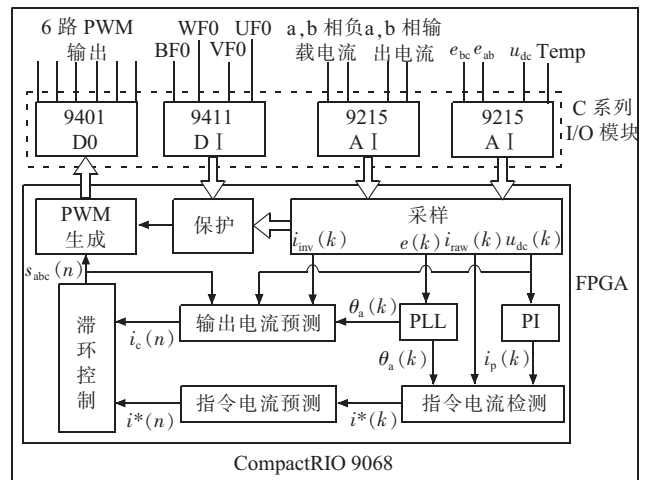


图 5 控制器软硬件结构

该控制器可自主配置输入输出接口,通过 LabVIEW 语言编程。针对 APF 的控制要求,配置 2 块 9215 模拟量输入卡,采集 1 路温度信号、1 路直流侧电压、2 路网侧线电压、2 路负载电流、2 路输出电流;1 块 9401 数字量输出卡,作为 6 路 PWM 波输出;1 块 9411 数字量输入卡,采集 IPM 模块的故障信号。

如图 6(a)是采用传统滞环控制补偿前后的电流;图 6(b)是输出电流与指令电流的微观变化走向,可见输出电流只会是在采样时刻改变,超出环宽的范围很大,因此实际误差比环宽大很多;图 6(c)未进行谐波补偿前的网侧电流谐波畸变率,为 28.37%。图 6(d)是采用传统滞环算法补偿后的谐波畸变率,为 7.25%。

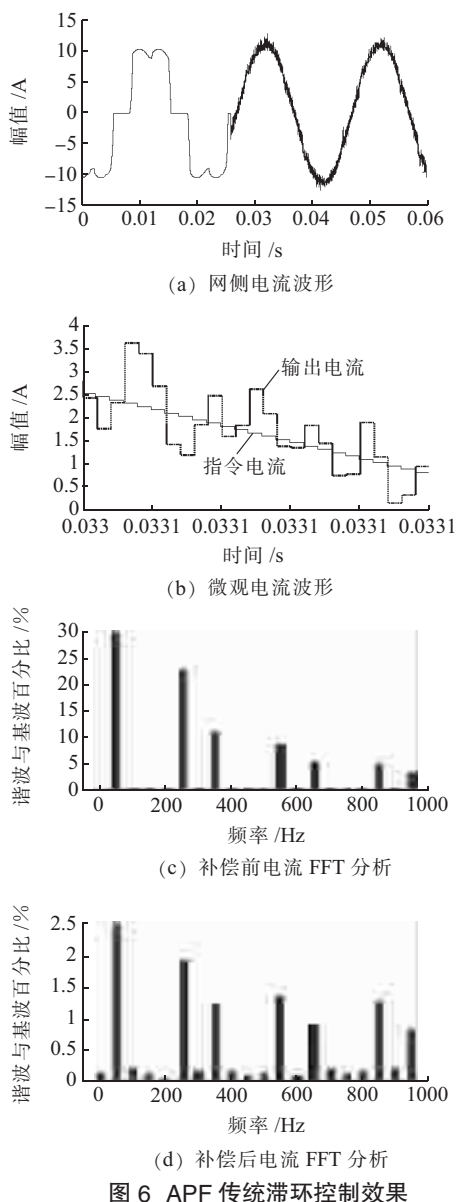


图 6 APF 传统滞环控制效果

如图 7(a)是采用基于电流预测的滞环控制补偿前后的电流;由图 7(b)微观电流变化可见实际输出电流基本在环宽以内,在一个采样周期内预测输出电流对实际输出电流进行预测,一旦预测出电流超出环宽就改变电流状态,无需等到下一个采样时刻,从而保

证了输出电流被限制在环宽以内;由图 7(c)可知补偿后的谐波畸变率为 4.77%。

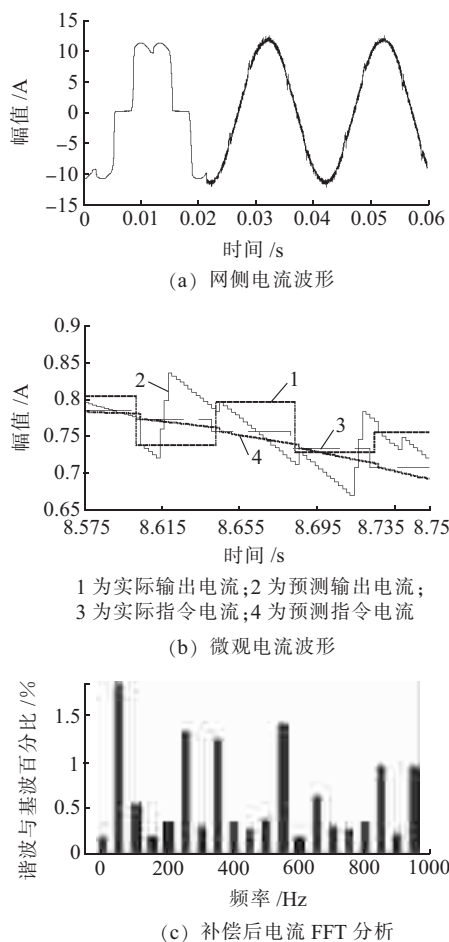


图 7 基于电流预测的滞环控制效果

4 结束语

提出一种基于电流预测的 APF 滞环控制方法,目的是改善采样率引起的控制误差。在传统滞环控制中加入了电流预测环节,基于 APF 的动力学模型预测输出电流,利用线性插值预测指令电流,运用这 2 个预测电流参与滞环比较,改变了传统滞环控制只能在采样时刻判断输出电流是否超出环宽的不足,一旦预测出电流超出环宽就及时改变电流方向,大大减小了输出电流超出环宽的幅值,提高了控制精度。为了克服预测算法的误差,采用只在一个采样周期内部进行预测,一旦有新的采样值则重新开始预测,自动修正误差,避免误差的累积。仿真试验验证了该控制方法可明显改善由采样率导致的控制误差,在采样率较低的情况下也能有较好的控制精度。

参考文献:

[1] 范小波,张代润,孙茜,等.三相三线有源电力滤波器滞环电流控制策略[J].电力系统自动化,2007,31(18):57-60.
 [2] 吴峰,郑建勇,梅军,等.并联有源滤波器 PWM 控制策略比较与实验分析[J].电力系统及其自动化学报,2012,24(3):53-58.

- [3] 许晓彦, 杨才建, Janusz Mindykowski. 有源滤波器空间矢量脉宽调制电流跟踪算法的优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 80-84.
- [4] 杨 勇, 阮 毅, 叶斌英, 等. 三相并网逆变器无差拍电流预测控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(33): 40-46.
- [5] 杨 勇, 赵方平, 阮 毅, 等. 三相并网逆变器模型电流预测控制技术[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 153-159.
- [6] 吴 勇, 徐金榜, 王庆义, 等. 并联有源电力滤波器电流预测控制[J]. 华中科技大学学报, 2008, 36(4): 99-102.
- [7] 杨 旭, 王兆安. 一种新的准固定频率滞环 PWM 电流控制方法[J]. 电工技术学报, 2003, 18(3): 24-28.
- [8] 洪 峰, 单任仲, 王慧贞, 等. 一种变环宽准恒频电流滞环控制方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(1): 115-119.
- [9] 曹 武, 刘康礼, 江 楠, 等. 有源滤波波过采样数字滞环电流跟踪控制方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 85-90.
- [10] 曹 武, 赵剑锋, 江 楠. 有源滤波器同步坐标系下的空间矢量滞环电流控制新方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 173-180.
- [11] 申张亮, 郑建勇, 梅 军, 等. 基于改进电压空间矢量调制的有源滤波器双滞环电流跟踪控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(15): 8-14.
- [12] 王 文, 罗 安, 徐先勇, 等. 有源滤波器双滞环空间矢量离散控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 10-17.

作者简介:

- 孙 蓉(1979), 女, 江苏江都人, 高级工程师, 从事电网稳定分析, 电力电子与新能源并网技术工作;
- 袁晓东(1979), 男, 江苏无锡人, 高级工程师, 从事新能源并网及主动配电网技术工作;
- 周宇浩(1990), 男, 江苏苏州人, 硕士在读, 专业为光伏发电及电能质量治理;
- 葛 乐(1982), 男, 江苏泰州人, 副教授, 从事新能源与主动配电网研究工作;
- 杨志超(1960), 男, 江苏常州人, 教授, 从事电网主设备安全运行、新能源与主动配电网研究工作。

Based on Current Predict of Active Power Filter Hysteresis Control

SUN Rong¹, YUAN Xiaodong¹, ZHOU Yuhao², GE Le², YANG Zhichao²

(1. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China

2. School of Electrical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: In order to reduce the APF control error caused by sampling rate, a method of predictive hysteresis control based on current prediction is proposed. The cause of hysteresis control error is analyzed. On the basis of the active filter dynamics model, output current prediction model is established, the target current is predicted by linear interpolation, and the working principle of this control method is introduced. A controller system is designed based on the CompactRIO. The experimental result comparisons between the proposed method and traditional hysteresis control show that the proposed method is effective in reducing control error.

Key words: active power filter; current predict; hysteresis control; control error

(上接第 53 页)

保护与控制, 2006, 34(8): 19-20.

- [3] 冯迎春, 陆圣芝, 袁 松. 基于变电站测控数字量的自适应自投联切装置[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(6): 23-24.
- [4] 许 琦, 曹建权. 防止因备自投动作引起变压器过载跳闸的分析及对策[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(4): 30-33.
- [5] 朱文东, 刘广一, 于尔铿. 电力网络局部拓扑的快速算法[J]. 电网技术, 2006, 20(3): 30-33.
- [6] 王艳蓉, 陆 鑫, 林庆农, 等. 新一代电力自动化软件支撑平台的设计和实现[J]. Electric Power IT, 2010, 8(9): 42-44.

作者简介:

- 张军华(1980), 男, 河南周口人, 工程师, 从事电力系统自动化研发工作;
- 金岩磊(1978), 男, 河南洛阳人, 工程师, 从事电力系统自动化研发工作;
- 金 震(1977), 男, 江苏武进人, 工程师, 从事电力系统继电保护研发工作。

A Digital Spare Power Automatic Switching Simulation Technique

Based on Dynamic Topology

ZHANG Junhua, JIN Yanlei, JIN Zhen

(Nanjing Nari-relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: This paper proposes a new simulation technique for digital spare power automatic switching. The technique analyzes the logic of digital spare power automatic switching based on power system dynamic topology. The simulation software based on Sophic platform is developed using the proposed technique. The developed software is deployed in a distributed fashion and is used in the simulation environment which do not affect the normal functions of SCADA. The simulation technique has been applied in Hong Kong Chui Ling Road station, which achieves the expectation.

Key words: spare power automatic switching; simulation; topology analysis; sophic platform