

一种基于分布式数据处理的风电变流器监测系统架构

在风电变流器研发测试、故障检修中，考虑到控制算法以及控制器不正常运行的可能性，需要对监测数据进行实时监测以及实时算法分析，对所使用的监测系统要求比较高。文章通过分析风电变流器的算法结构，提出了一种基于数据分析算法拆分的监测系统架构。这种架构通过公共的处理器，以太网和分布式处理器进行实时数据分析，不仅能够有效降低系统对处理器的要求，简化系统的实现，同时也具有较好的灵活性。文章给出了该系统架构的一个具体实例，通过PXI技术的数据采集系统实现PLL算法，并且将结果和监测数据发送给接入以太网的普通PC机进行实时分析。结果表明这种架构在没有相同级别处理器要求的情况下，有效地提高了监测系统整体的工作效率，这对于新能源设备的研发、电网接入和运行维护来说具有十分积极的意义。

陈昭宇 奚曹明 郦鹤松/国网上海浦东供电公司



陈昭宇/工程师

关键词/Keywords

风电变流器·
监测系统架构·
实时数据分析·
灵活性·
分布式处理器·

0 引言

随着新能源的开发和利用日益受到社会的关注，风电作为一种清洁和可再生的能源而备受青睐，世界范围内的风电装机容量与日俱增，风力发电技术得到了十分广泛的应用和发展。风电变流器是风力发电系统中保证风机可靠接入电网的关键技术，变流器技术的成为了风力发电技术热点问题，近年来出现了许多适用于风力发电的变流器拓扑^[1-2]，以及相应的各式各样的控制算法^[3-5]。

然而，由于变流器是一个功率开关器件组成的系统，控制算法又十分复

杂，在变流器的研发测试、故障检修时，由于电磁兼容、机械结构以及其他多元化的因素，通过单纯的电气量进行理论分析往往无法排除变流器的主回路、控制算法错误（主要是控制参数的整定）或者是其他原因造成的。因此，在这个阶段仍然需要一个变流器的专用型检测系统，该系统不仅能够对主回路的电气特性进行测量，同时也要求其对于数据进行实时的分析，从而验证控制算法的正确性。

本文提出了一种满足上述要求的变流器研发监测系统的架构。在这种架构中，数据分析的功能由专门的上位机来进行，不需要单独的芯片来进行数据分析的算法，即使用普通的PC机就可以实现，并且这种进行数据分析的设备可以是分布式的，可以在条件允许的情况下多台接入。这种方法的关键在于通过拆分数据分析的算法，将部分运算转移到数据采集设备的控制器中，而由数据分析端通过通信的方式接收计算的结果并进行下半部分的运算。只要数据通信的周期足够小，就可以有效地减少数据分析的计算量而不影响实时性，从而降低数据分析端处理器的要求。

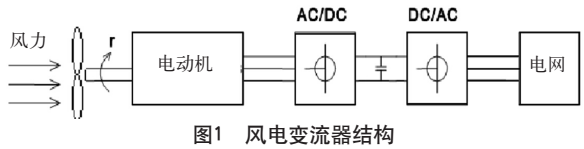
1 变流器监测

风电变流器监测目的主要有两方面，一是测试的一般需求——主回路的电气特性，二是测试控制算法在各种条件下的正确性。

1.1 一般需求

变流器主回路的电气特性的监测同

时也是控制算法验证的先决条件，监测的形式主要决定于变流器的拓扑结构。一般来说，风电主回路拓扑结构都会包含三个部分：机侧整流器、直流环节以及网侧逆变器，如图1所示。因此，主回路的监测至少包括电网电压、网侧输出电流、直流电压、直流电容、机侧输出电压以及电动机定子（转子）电压。



但是，如引文中所说，风电变流器的拓扑结构种类比较多，其控制算法以及测试目的也与主回路结构有关，需要变流器的监测系统可以根据需求增加监测的通道，这也要求监测系统能够同时支持数量较大的数据采集功能。

同时，变流器的测试要求监测系统具有较好的灵活性，能够简单化、一体化，并能尽量避免复杂的结构和体积、数量都较大的设备。

1.2 控制算法检测

控制算法的检测主要基于主回路电气特性的监测结果。变流器的控制，无论网侧还是机侧，其控制目的都在于变流器输出的电流，因此控制算法正确与否就取决于电流是否与理论相一致。而且算法中，往往需要将电流变换到两相旋转坐标系下进行控制，故而验证算法就需要得到变流器在两相旋转坐标系下的输出电流。旋转坐标系下的变换如式（1）所示

$$\begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta - 120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta + 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

可以看出，进行坐标变换的条件首先是要得到变换的参照相位 θ 。以网侧逆变器为例，根据变流器的控制算法^[7]，旋转坐标系以电网电压的旋转矢量为参照，因此，首先对监测得到的电网电压进行PLL锁相，得到相位 θ 。随后将监测所得的变流器网侧三相输出电流按照式（1）进行变换即可得到旋转坐标系下的电流，如图2所示。

对于控制算法的进一步验证还包括对变流器输出电流中的正负序分量的分析。电流的正负序

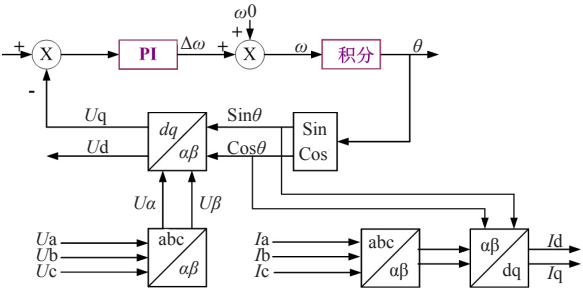


图2 旋转坐标系下电流检测计算方法

分量主要用来判断三相的不平衡度的情况，在变流器应对电网不平衡状况的算法中应用较多^[8-9]；或者在某种情况下，由于主回路的特性问题或算法执行问题导致变流器的输出出现三相不平衡的状况，这就可以根据输出电流的正负序分量，判断具体的问题特征和可能的原因。正负序分解的算法主要通过坐标变换实现，具体算法如图3所示。

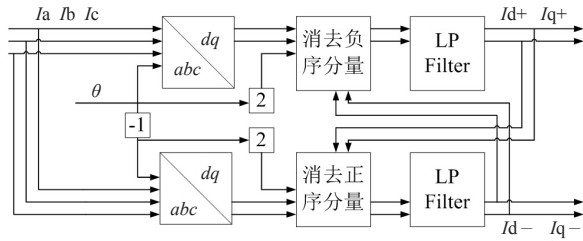


图3 正负序分解算法

可以看到，在数据分析的算法中，除了加减以外，还包括多次的三角函数运算。另外，上述的例子仅仅以变流器的网侧输出电流为例，在实际的过程中监测对象还包括机侧电流、直流环节以及其他算法的需求。出于灵活性的要求，变流器的监测系统会将数据采集、显示和分析等集中在一个一体化的平台上运行，但是，对于数据量很大的情况而言，按照一般数据采集系统的设计，其处理器往往不能承担数据分析的运算。这种问题可以通过将运算转移到分布式的处理器上运行而得到解决。

然而对于运算能力不强的处理器，有可能会出现运算速度过慢使得算法的实时性得不到保证的情况；而如果实时数据分析对于处理运算能力要求较高，会使系统的实现变得复杂，其成本也会提高很多，同样不符合监测系统灵活性的要求。

一般而言，数据采集系统的处理器在控制数

据采样的同时，仍然有一定的裕量可以执行其他任务。因此，如果有一种方法可以利用数采处理器的裕量从而降低分布式数据分析处理器的性能要求，就有可能解决上述问题。

1.3 算法拆分原理

实际上，通过上述例子中算法结构可以发现，锁相环计算是许多算法的共有基础，如果可以将锁相环的运算运行在一个公共的处理器上，而将之后的各种运算由不同的处理器并行进行，那么单个处理器的运算量就会减小，系统对于数据分析处理器的要求也会降低。如图4所示。

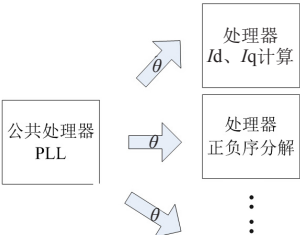


图4 算法拆分原理

在这种方法中，公共的处理器使用第一次监测的数据进行锁相环的运算，再将结果和监测数据发送给其他处理器并进行第二次监测数据。这些数据分析的处理器直接接受数据并运算。两者一直处于并行的状态，从而在不破坏运算的实时性的情况下，将部分运算转移给了公共处理器，降低了其他数据分析处理器的运算量。不仅如此，如果有多个进行分析的处理器同时运作，分析数据所用的锁相环数据通过公共的处理器提供，省去了每个处理器进行PLL运算的时间，总体节约了更多的运算量。

2 监测系统的架构

监测系统的由传感器、调理电路、数据采集系统、以太网以及数据处理端组成。其中数据采集系统主要进行数据采集的工作，数据分析端主要负责数据分析，他们之间通过以太网连接，前者的控制器通过以太网将数据发送后者。可以看出，在这种系统构架中，数据采集系统属于本地设备，进行数据分析的处理器则是分布式的，只要接入以数据采集控制器为中心的以太网中，并且能够运行数据分析程序的处理器，便可以进行试验数据分析工作。系统的构架如图5所示

数据采集系统主要由数据采集设备，控制器

以及之间的总线构成。这种系统结构非常常见。由图4可知，数据采集系统是一个本地系统，该系统的控制器作为服务器端除了进行数据采集以外，还利用所采集的数据执行如锁相环等算法，并且将数据以及锁相环运算的结果发送给处于以太网的其他分布式客户端——即进行数据分析的处理器，程序框图如图5所示。

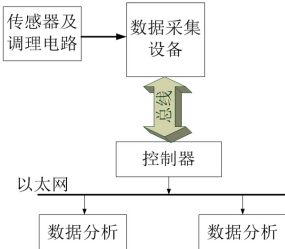


图5 监测系统架构

一般来说，数据采集的驱动对于控制器不会花费很多的资源。由图6也可以看到，对于控制器的处理器而言，其数据采集的驱动过程有一个等待数据采集完成的时间，利用该时间段即可执行PLL算法并且将结果通过以太网发送至各分布式处理器。如果控制器是双核的架构，那么算法和TCP程序也可以在另一个核中执行。

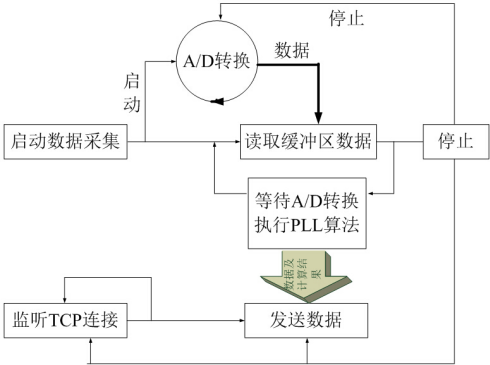


图6 数据采集系统程序框图

数据分析端作为以太网客户端，向数据采集系统申请数据以及PLL算法的结果，进行数据分析运算，最后将结果输出。另外，对于不需要数据分析的情况，程序可以直接显示接收到的数据。其程序框图如图7所示。因此，数据分析端除了进行运算的处理器以外，还要相应地提供可视化的界面；另外由于本地系统分担了部分算法，所以对数据分析端的运算能力要求不是很高。在下文的监测系统实例中已经表明，对于实例中的全功率变流器监测需求而言，普通的PC机、便携式电脑等，只要具有以太网接口并能够运行对应的应用程序，既

可以进行数据分析工作。对于需要多种算法同时运行的情况，只要同时接入多个PC机进行运算即可，因为普通的笔记本电脑即可承担这种工作，所以实现起来是非常容易。

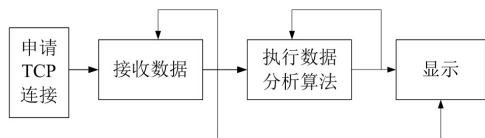


图7 数据分析端程序框图

3 实例

本文所述的系统在并联型全功率变流器原型样机测试实验中，作为实验平台的一部分被实现。

并联型全功率风电变流器的监测系统一共检测78路信号，除了本文中所述的必要通道以外，还包括LCL滤波器的电压和电流信号，并且覆盖了每个并联支路。在控制算法验证的需求中，要求检测出网侧逆变器和机侧整流器输出电流的正负序分量。在监测系统开发的初期，监测数据的显示和数据分析被设计在数据采集控制器上，但是经过实践发现程序在运行不久后就会出现数据采集缓冲区积压的情况，说明控制器不能在保证实时性的前提下同时进行数据采集、显示和分析。因此，实验改用了本文所提出的监测架构进行数据分析运算。

实验中本地数据采集系统的实现采用了NI公司的PXI数据采集设备，包括PXI总线机箱（PXI-1045）、十个数据采集卡（PXI-6123）、以及一个PXI机箱专用的双核控制器。这种配置可以提供80路信号，最大500 kHz的数据采集通道。PXI机箱可以提供最多18块即插型的数据采集卡的接入，使得系统可以被调配适应本实例以外的其他变流器系统。PXI专用的控制器除CPU外，同时具备以太网在内的其他通用接口。

本地数据采集系统的程序使用Labview编写。进行数据采集的通道数量及列表根据实验需求设定好，根据变流器的开关频率和响应周期，数据采集系统的采样率设置为10 kHz。数据传输的周期设定为100 ms，每个周期数据从采样缓冲区读出并送入一个虚拟的FIFO中。进行锁相环所需的通道在本地系统中配置好，程序从FIFO中取出具

体数据进行运算，通过本地系统程序中同时运行的TCP服务器发送给连接上的客户端。

数据分析端采用一般的笔记本电脑接入以太网，同样运行Labview开发的应用程序进行数据的接收和正负序分解的运算。应用程序提供的正负序分析界面如图8所示。

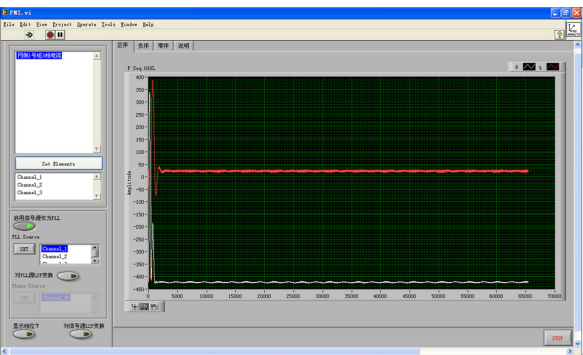


图8 正负序分析界面

界面供用户对算法进行基本配置，包括线-相变换、显示PLL结果以及使用程序内置的PLL算法对其他信号进行锁相。对于仅仅需要显示原始数据的情况，程序提供了原始数据的显示界面，供用户直接观察波形使用。如图9所示。

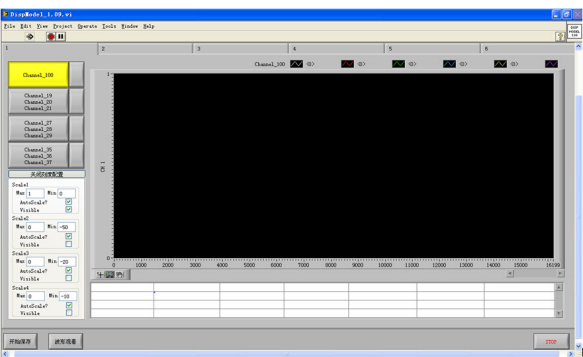


图9 数据监测界面

为了验证系统构架以及算法拆分的方法，能够提高数据分析端的运行效率，图10中对特定的数据分析端在自行使用内置PLL运算和拆分后算法两种情况下的CPU占用率进行了比较。执行数据分析的系统处理器为Core 2 Duo 2.4 GHz CPU，Windows XP平台。例子中，程序仅进行网侧输出电流的正负序分解运算，通过Windows的任务管理器查看CPU使用率，在运行数据分析的同时开启数据显示的功能以及其他系统程序。

从图形中右侧的波形可以看出，使用算法拆分的情况下，CPU的平均使用率比前者要低。

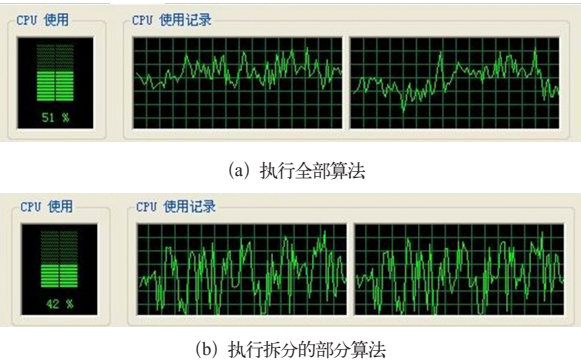


图10 使用算法拆分前后CPU使用率的比较

CPU使用率波形中出现的间隙正是因为少执行的这部分算法造成的CPU处于空闲状态。在这种情况下，系统还可以运行其他操作或者是完成简单的算法。当然，对于不同的平台，具体的情况可能不一样。如果平台的CPU性能足够高，同样可以运行更多算法。对于多台数据分析端接入且正在运行其他信号的正负序分解析，或者其他使用PLL的算法，那么所有的处理器都可以省略PLL算法运算，节约了较多的系统性能。

4 结束语

基于风电变流器研发测试、故障检修中对于变流器系统的监测需求，本文提出了一种变流器监测系统的构架，即通过算法的拆分和分布式的数据分析的结构，降低了数据分析对系统运算能力的要求；同时，允许多个数据分析端同时接入使得监测活动更为灵活，更加方便检修、开发人员进行分析和判断。文中给出了一个这种监测系统架构的具体实例，通过实际应用及初步比较，验证了架构的有效性和使用价值。

实际上，除风力发电系统，本文提到监测架构同样可以用在太阳能、无功补偿装置等基于复杂控制算法的电力电子设备的监测分析上，因为一般来说这类设备的控制算法在某种程度上是相通的，可以如本文中的情况进行拆分，从而实现分布式监控测量，这里不再赘述。

参考文献

[1] V. Dinavahi, J. A. Baroudi. A review of power converter topologies for wind generators.[C] Electric

2005 IEEE International Conference on Machines and Drives.
[2] L.H. Hansen, P.H. Madsen, F. Blaabjerg. Generators and power electronics technology for wind turbines. [C] Industrial Electronics Society, 2001. IECON '01. The 27th Annual Conference of the IEEE.
[3] YiFan Tang. A flexible active and reactive power control strategy for a variable speed constant frequency generating system.[J] IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10(4): 472 - 478.
[4] KATHRYN E. JOHNSON, LUCY Y. PAO. Control of variable-speed wind turbines standard and adaptive techniques for maximizing energy capture.[J] Control Systems, IEEE, 2006, 26(3), 70-81
[5] W.E. Leithead, S. de la Salle, D. Reardon. Role and objectives of control for wind turbines.[J] Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C, 1991, 138(2): 135-148.
[6] Philip T. Krein, Rajiv K. Baphna A. A microprocessor-based switching power converter test bed.[C] Power Electronics Specialists Conference, 1991. PESC '91 Record., 22nd Annual IEEE.
[7] 蒋桂强. 背靠背电压源型变流器的控制器设计及性能分析[D]. 吉林. 东北电力大学电气工程学院, 2009.
[8] Yongsug Suh , Thomas A. Lipo. A control scheme of improved transient response for PWM AC/DC converter under generalized unbalanced operating conditions[C]. Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual.
[9] Hong-seok Song, Kwanghee Nam. Dual current control scheme for PWM converter under unbalanced input voltage conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46(5): 953 - 95.

作者简介

陈昭宇（1987-），男，研究生，工程师，从事电力调度控制工作。

（收稿日期：2015-12-10）

（编辑：张万英）