

风力发电测量保护模块的设计与应用

陆伟青¹, 王鹏², 李英新¹

(1. 上海安科瑞电气股份有限公司 上海嘉定 201801;
2. 东北电力设计院 长 春 市 130021)

摘要: 介绍了一款基于 MCF51EM256 的测量保护模块的设计与应用, 根据微处理器系统的特点从硬件和软件两个方面, 给出设计方法。该模块用于风力发电主控控制系统中, 除具有传统电参量的电压、电流、功率测量功能外还集成了风力涡轮发电机的保护功能, 获得了良好的性能。

关键词: 风力发电、低电压穿越 LVRT、Profibus_DP 协议、Can open 协议

0 引言

近年来, 随着传统能源的价格不断走高及由此导致发电成本不断上升和全球气候变暖等环境问题的影响, 可再生能源的开发利用上升到一个前所未有的高度。风力发电是当今世界新能源开发技术最成熟、最具规模开发和商业化发展前景的发电方式之一。风具有随机变化的特性, 而风力发电机组的输出功率与风速的立方成正比, 因此风力发电机组的输出功率通常随着风速大幅快速变化, 若将大量风电接入电网将会对电网的电能质量和电网稳定性产生影响³。所以在控制风电容量在系统中所占比例的前提下, 分析风力发电对电网电压的影响因素并对其进行控制至关重要。

因此, 我们需要一款装置, 能够针对风力发电系统的特性, 在电网失效、电网频率、电压偏差过大、发电机输出功率过大、有功和无功潮流发生反向等故障, 发出告警信号, 提醒控制器及时采取措施。本文介绍了一款针对风力发电系统设计的 AGP 测量保护模块, 该模块可测量电压、电流、频率、电能等传统电参量, 并针对系统电压、频率、负载等故障进行报警, 同时集成了 2 个根据时间的欠压保护, 提高了控制系统对电压闪变的抗干扰能力。

1 电路设计原理

AGP 的硬件电路包括主控芯片、电源、电压、电流信号采集电路、开关量输入模块、继电器输出模块、人机交互单元、RS485 通讯接口、Profibus_DP 通讯协议接口、Can open 通讯接口 (图1)。

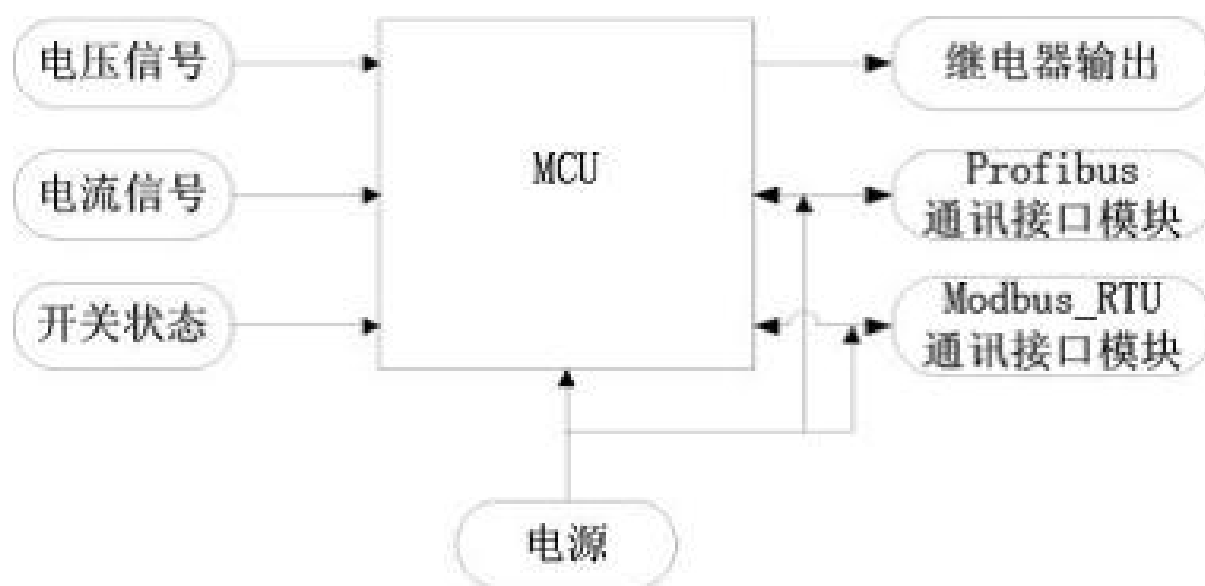


图 1 硬件电路框图

1.1 主控芯片

MCU 芯片采用 freescale 公司的 Coldfire-V0 架构内核的 32 位处理器 MCF51EM256，时钟频率最高可达 50.33MHz，内置 256K 的 Flash、16K 的 RAM、4 个独立 16 位 AD 通道、3 路定时器、3 路 SCI 通讯接口、内置 RTC 时钟、I²C、SPI、KBI 接口等多种资源，具有极高的性价比。

1.2 电源

AGP 采用直流 24V 工作电源，使用广州金升阳公司的宽电压输入 DCDC 模块 WRF2405P，工作温度范围 -40~85℃、隔离电压 3000VDC、实测输出纹波 <1%，同时在电源输入部分设计加入放电管、PTC 压敏电阻、TVS 管、防反接二极管等器件（图2），具有过压、过流等保护。

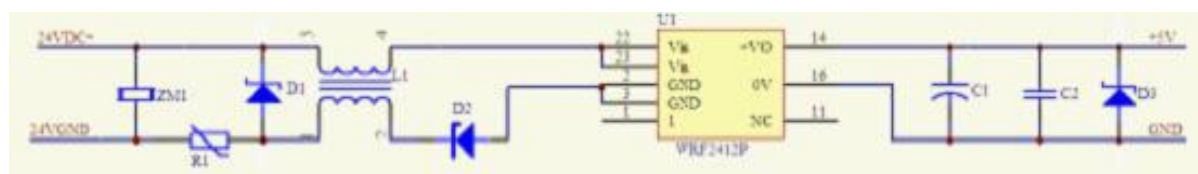


图2 电源电路

1.3 信号采集电路（图3）

信号采集包括电压信号、电流信号和频率信号：电压信号采用分压电阻输入，电流信号采用互感器隔离输入，将交流信号抬高后，通过放大电路将信号进行放大，最后将信号送入 CPU 进行软件差分运算。

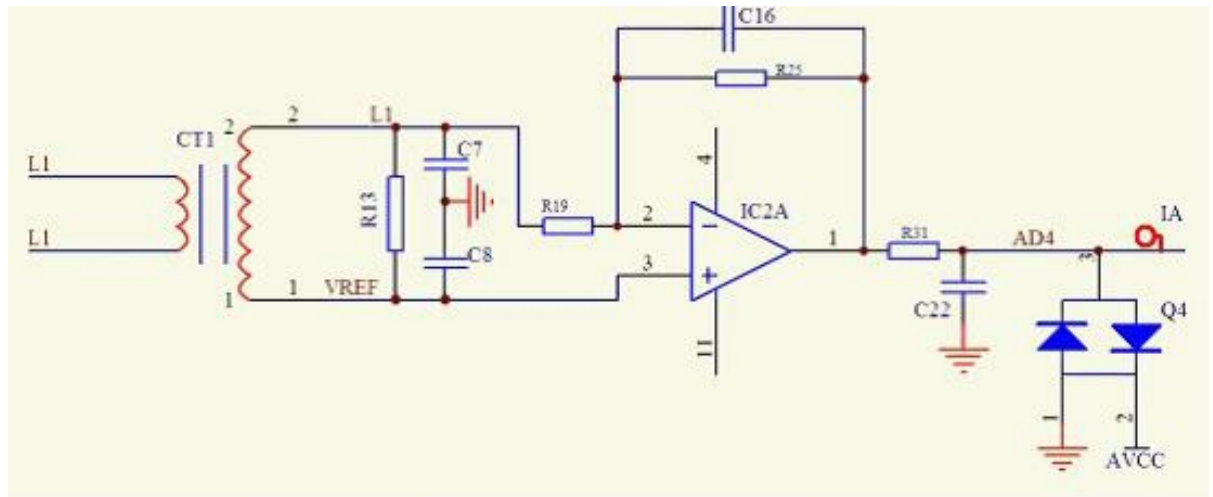


图3 电流信号电路

1.4 接口设计

AGP 的接口包括人机交互单元、RS485通讯接口、开关量输入输出接口。在设计各类接口的同时，需加入提高电磁兼容性能、耐压、触点保护等元件以提高装置的可靠性。

2 电参量计算及软件设计

2.1 基波、谐波、相角差等的计算

DFT 的定义

$$X(k)=DFT[x(n)]=\begin{cases} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{kn}, & 0 \leq k \leq N-1 \\ 0 & , \text{其它} \end{cases}$$

$$X(k)=DFT[x(n)]=\begin{cases} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{kn}, & 0 \leq k \leq N-1 \\ 0 & , \text{其它} \end{cases}$$

其中

$$W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}} = \cos(2\pi / N) - j \sin(2\pi / N)$$

将 DFT 定义式展开成方程组

$$\begin{cases} X(0)=x(0)W_N^{0,0} + x(1)W_N^{0,1} + \dots + x(N-1)W_N^{0,(N-1)} \\ X(1)=x(0)W_N^{1,0} + x(1)W_N^{1,1} + \dots + x(N-1)W_N^{1,(N-1)} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ X(N-1)=x(0)W_N^{N,0} + x(1)W_N^{(N-1),1} + \dots + x(N-1)W_N^{(N-1),(N-1)} \end{cases}$$

将方程组写成矩阵形式

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(1) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ X(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_N^{0,0} & W_N^{0,1} & W_N^{0,(N-1)} \\ W_N^{1,0} & W_N^{1,1} & W_N^{1,(N-1)} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ W_N^{(N-1),0} & W_N^{(N-1),1} & W_N^{(N-1),(N-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x(N-1) \end{bmatrix}$$

用向量表示

$$X=Wx$$

用复数表示:

$$Wx = \left\{ \operatorname{Re}[W] \cdot \operatorname{Re}[x] - \operatorname{Im}[W] \cdot \operatorname{Im}[x] \right\} + j \left\{ \operatorname{Re}[W] \cdot \operatorname{Im}[x] + \operatorname{Re}[x] \cdot \operatorname{Im}[W] \right\}$$

从矩阵形式表示可以看出，由于计算一个 $X(k)$ 值需要 N 次复乘法和 $(N-1)$ 次复数加法，因而计算 N 个 $X(k)$ 值，共需 N^2 次复乘法和 $N(N-1)$ 次复加法。每次复乘法包括 4 次实数乘法和 2 次实数加法，每次复加法包括 2 次实数加法，因此计算 N 点的 DFT 共需要 $4N^2$ 次实数乘法和 $(2N^2+2N \cdot (N-1))$ 次实数加法。当 N 很大时，这是一个非常大的计算量。

从在实际应用中，为了满足风电系统快速响应的要求， j 可取 64 点， N 只取 2，仅计算基波电压、电流和相角差等参数，在同等条件下未优化 DFT 运算时间（图 4）和优化 DFT 运算时间（图 5）经测试对比，计算单路信号一次 DFT 运算仅需 40us，大大提高了运算速

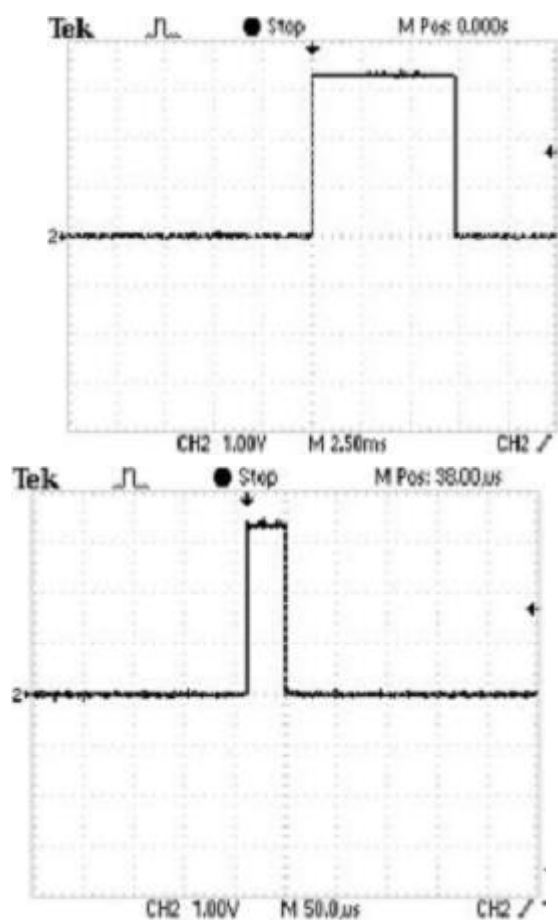


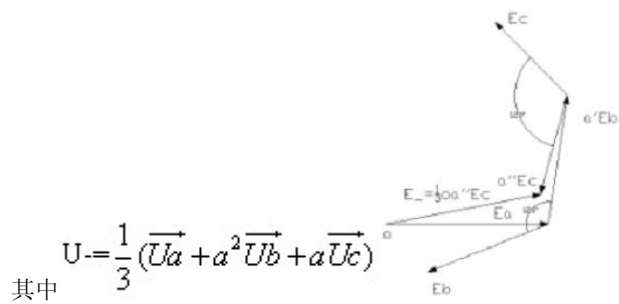
图4 未优化 DFT 运算时间

图5 优化后 DFT 运算时间

2.2 基于对称分量法的不对称故障计算

在一个三相对称的元件中（例如线路、变压器和发电机），如果流过三相正序电流，则在元件上的三相电压降也是正序的；负序零序同理。

假定三相不平衡电压值以 A 相为最大值且以 A 为基准，即 $U_a = U_a$ ，则根据对称分量法可得负序电压表达式为：



$$a^2 = e^{j240} = -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}j$$

$$a = e^{j120} = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j$$

图6 负序电压求解图

图6 为负序电压求解图，同理可以得到电压正序分量 U_+ 。

电压不平衡度计算：

$$\epsilon_{u2} = \frac{U_-}{U_+} \times 100\%$$

U_+ -----三相电压的正序分量；

U_- -----三相电压的负序分量；

如下表，经验证，实际测量值误差小于0.1%。

表1 各种情况下的不平衡率

施加源信号			理论不平衡率(%)	实测不平衡率(%)
A 相	B 相	C 相		
220	0	0	100	99.9
220	220	0	50	49.9
220	220	110	20	20.0

2.3 电压畸变率的计算

电压真有效值计算：

$$U_{rms}=\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty}u_n^2}$$

基波电流计算：

$$U_1=KU_{DFT1}$$

U_1 -----基波电流

K-----基波电流校准系数

U_{DFT1} -----此次 DFT 1次分量的模

总谐波失真系数计算：

$$\lambda=\frac{U1}{U_{rms}}$$

电压畸变率的计算：

$$THD=\sqrt{\frac{1}{\lambda^2}-1}$$

2.4 软件流程

AGP 的软件流程主要包括 A/D 信号采集程序、TPM 测频程序、电参量计算程序、保护处理程序、各种通讯协议处理程序等，由于内容较多，现给出部分程序流程。



图 7 主程序流程图

MCF51EM256每一路 AD 模块均具有 A 和 B 2个通道输入，任一通道采集完成后通过内置 PDB 模块调整自动切换时间，实现电压、电流相角差调整来达到功率补偿功能，该方法简单可行，中断同时需对 AD 异常做

出处理，现给出 AD 中断处理程序流程。

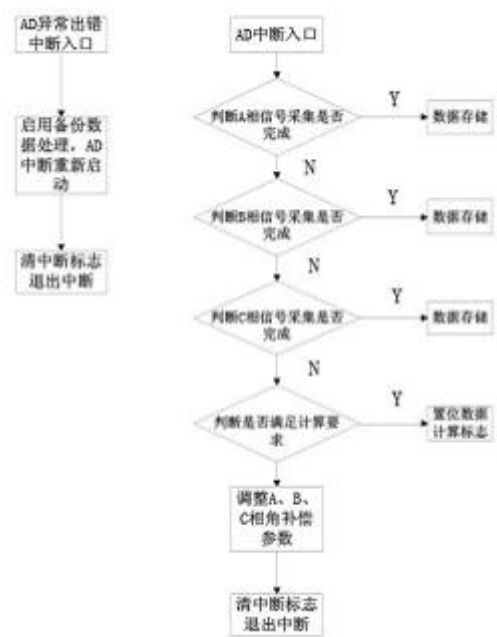


图 8 中断程序流程图

3 风力发电系统相关技术规定和应用

随着风力发电装机容量的不断扩大，国家电网公司对风力发电机提出了一系列的要求，《GB/T 19069-2003 风力发电机组控制器技术条件》和《风电场接入电网技术规定实施细则-2009》中明确了控制器需要具有的功能。主要包括：电网频率控制、无功功率和电网电压控制、低电压穿越（LVRT）控制以及电能质量控制等。

3.1 风电场运行频率

表2 各种频率下的风电场运行

电网频率范围	要求
低于48Hz	根据风电场内风电机组允许运行的最低频率而定。
48Hz—49.5Hz	每次频率低于49.5Hz 时要求至少能运行10min。
49.5Hz—50.5Hz	连续运行。
50.5Hz—51Hz	每次频率高于50.5Hz 时，要求至少能运行2min；并且当频率高于50.5Hz 时，不允许停止状态的风电机组并网。
高于51Hz	根据电网调度部门的指令限功率运行。

3.2风电场电压范围

当风电场并网点电压偏差在-10%~+10%、并网点的闪变值满足国家标准电能质量关于电压波动和闪变、公用电网谐波、三相电压不平衡的规定时，要求风电场内的风电机组应能正常运行。

3.3 风电场低电压穿越

风电场并网点电压在图中电压轮廓线及以上的区域时，场内风电机组必须保证不间断并网运行；并

网点电压在图中电压轮廓线以下时，场内风电机组允许从电网切出²。

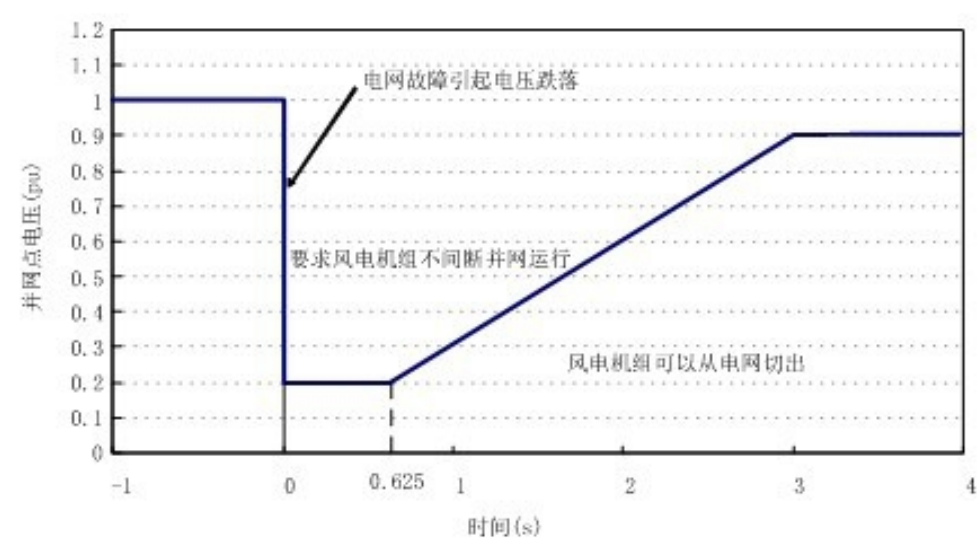


图9 风电场低电压穿越要求的规定

对于不同的欧美国家电网公司，其规定的低电压的跌至幅度和穿越时间也存在差异，英国为15%和140ms，德国为15%和625ms，丹麦为25%和100ms，西班牙为0%和500ms 等。

3.4 目前双馈式风力发电机组并网系统

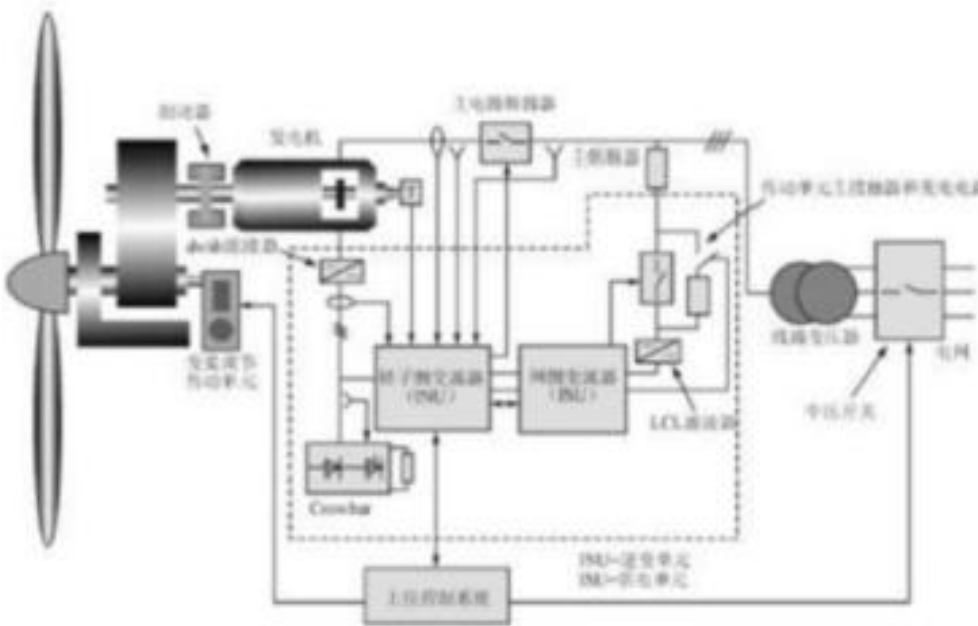


图10 交流励磁变速恒频风力发电变频器电路图

变速恒频发电将先进的电力电子技术引入发电机控制之中，机组采用变速运行，使风力发电机组叶轮转速跟随风速的变化而变化，保持基本恒定的最佳叶尖速比，从而获得最大的风能利用效率。
在变速恒频双馈发电机组运行过程中，定子绕组直接接到电网上，而转子绕组外接转差频率电源实现交流励磁。当发电机转子频率变化时，控制励磁电流频率来保证定子输出频率恒定⁴。

3.5 应用案例

AGP 能应用于多种类型的发电机绕组的情况。下图10为典型的三相四线发电机绕组结构应用案例。电压信号直接接入，电流信号经互感器转换后接入模块。设置继电器1为过载、过压、过频，继电器2为欠压、

控制原理图

4 结语

文章来源干:《自动化博览》2012年9期。

参考文献:

- [1] GB/T 19069-2003 风力发电机组控制器技术条件》
- [2] 《风电场接入电网技术规定实施细则-2009》
- [3] 风力发电测试技术 姚兴佳等著 电子工业出版社
- [4] 双馈式风力发电机组柔性并网运行与控制 任永峰 安中全等著 机械出版社
- [5] 风力发电系统的设计、运行与维护. 叶杭冷等著 电子工业出版社
- [6] 任志程, 周中, 电力电测数字仪表原理与应用指南, 中国电力出版社, 2007

