

基于 DSP 和 PWM 逆变器的新型自动调谐消弧系统设计

程 路,陈乔夫,张 宇

(华中科技大学 电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要: 介绍了基于变压器可控负载的新型消弧线圈的结构和原理,在此基础上分析了整套装置的控制系统设计。该消弧线圈实现电感调节的原理是:将电压型 PWM 逆变器作为变压器二次侧的受控负载,通过控制逆变器的输出实现变压器一次侧等效电抗的调节。控制器基于 DSP 和 CPLD 数字芯片,DSP 实现逆变器驱动脉冲的计算和生成,CPLD 实现对逆变器的多重保护功能。详细分析了控制系统实现自动调谐、逆变器输出电流控制及整机协调与联机通信的方法。最后,试验结果证明了该消弧系统能够准确、有效地补偿电网对地电容电流,验证了整个控制方案的正确性。

关键词: 消弧线圈; 变压器; PWM 逆变器; DSP; 数字控制系统

中图分类号: TM 475

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2007)12-0061-04

中压配电网中 80 % 以上故障为单相接地故障^[1]。对单相接地故障危害治理的方法之一是采用中性点经消弧线圈的谐振接地系统^[2-8]。文献[9]提出了一种新型的自动调谐消弧线圈,结合变压器理论及电力电子技术,通过控制变压器二次侧可控负载(逆变器),实现变压器一次侧等效阻抗的调节。该消弧线圈具备电抗连续可调、谐波污染小的特点。

1 结构和原理^[9]

基于变压器可控负载原理的消弧线圈主电路结构如图 1 所示。变压器的一次侧并联在电网中性点和地(AX)之间,二次侧为多绕组结构,每个绕组的匝数和形状相同,其端部并接一个电压型逆变器,逆变器的输出负载即为各个二次侧绕组。

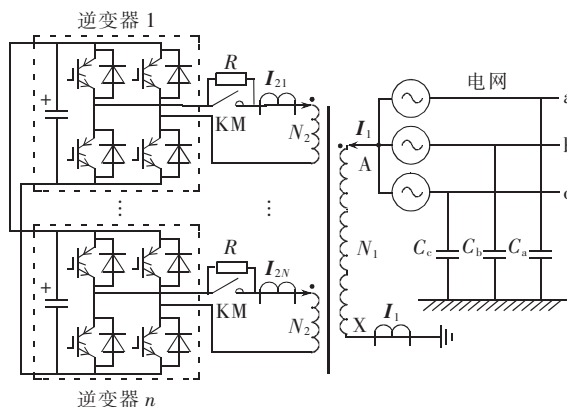


图 1 系统主电路结构图

Fig.1 Main circuit of ASC system

设变压器二次侧的绕组数为 N ,一次侧与每个二次侧绕组的匝比为 $k = N_1/N_2$,若控制使得各个逆

变器输出的电流满足:

$$I_{21} = I_{22} = \dots = I_{2N} = -\frac{k\alpha}{N}I_1 \quad (1)$$

其中, α 定义为电流系数,其值域为 $[0,1]$ 。

此时从 AX 端看进去的变压器等效阻抗为

$$Z_{AX} = r_1 + j[\omega L_{1\sigma} + (1-\alpha)\omega L_m] \quad (2)$$

则一次侧的等效电抗为

$$X_L = X_{1\sigma} + (1-\alpha)X_m \quad (3)$$

式中 $X_{1\sigma} = \omega L_{1\sigma}$ 为变压器一次侧漏电抗; $X_m = \omega L_m$ 为变压器励磁电抗。

当 α 从 0 变化到 1 时,变压器一次侧呈现的电抗值从 $X_{1\sigma} + X_m$ 变化到 $X_{1\sigma}$,一般 $X_m \gg X_{1\sigma}$,故电抗值可以在较大范围内连续变化。在 α 增大的过程中,并联变压器中的主磁通呈下降趋势,故设计变压器在额定电压下 $\alpha=0$ 时(即二次侧开路时)磁路不饱和,则 α 在 $[0,1]$ 范围内变化时磁路均不饱和,可以近似认为励磁电抗 X_m 为常量,此时变压器一次侧呈现的电抗与 α 呈线性关系(参见式(1))。因此,只需控制改变 α 的大小,即可线性连续的调节电感值,实现消弧线圈的功能。

2 消弧线圈的自动调谐

2.1 原理分析

新式消弧线圈^[10]为了能够适应配电网的变化,如线路切除、扩容或改建等,均应具备自动调谐的能力,即能够实时、准确地检测电网对地电容,并能将电感量调节到与电容值相匹配,这样可以达到更好的补偿效果。利用图 1 所示的拓扑结构,可以方便地采用注入信号法的原理^[11]检测电网对地电容。在电网正常运行时,电抗器副方的一个逆变器注入一变频电流信号,此时系统等效电路如图 2 所示。

图 2 中, I_{inj} 为等效的变频电流源, $L'_{2\sigma}$ 、 $L_{1\sigma}$ 和

L_m 分别为折算到一次侧的二次侧漏感、一次侧漏感和励磁电感, C 为电网对地总电容 ($C=C_a+C_b+C_c$)。设注入信号的频率为 f_{res} 时发生并联谐振, 根据并联谐振条件 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, 可得电容 C 的表达式为

$$C = \frac{1}{(2\pi f_{\text{res}})^2 (L_m + L_{1\sigma})} \quad (4)$$

根据检测到的电容值, 则需要投入补偿的消弧线圈电抗值可由下式确定:

$$X_L = \frac{2\pi f_{\text{res}}^2 (L_{1\sigma} + L_m)}{f_{50}(1-\gamma)} \quad (5)$$

其中 $f_{50}=50\text{ Hz}$ 为电网频率, $\gamma = 1 - \frac{I_L}{I_C} = 1 - \frac{X_C}{X_L}$

为设定的消弧线圈脱谐度 (I_L 为补偿电流, 即电感电流, I_C 为电容电流)。通常 $-5\% < \gamma < 0$, 即运行在稍微过补偿的状态^[3]。结合式(3)(5), 则式(1)中定义的电流系数 α 可由下式确定:

$$\alpha = \frac{(L_m + L_{1\sigma})[f_{50}^2(1-\gamma) - f_{\text{res}}^2]}{f_{50}^2(1-\gamma)L_m} \quad (6)$$

由上述分析可知, 电网对地电容发生变化时, 谐振频率 f_{res} 对应改变, 控制系统根据式(6)确定相应的 α 值调节电感, 即可实现自动调谐。

2.2 软硬件实现

根据以上分析, 实现电网对地电容检测的关键有 2 点: 变频电流源的产生; 谐振频率的检测。变频电流源的产生可以利用变压器副边的逆变器回路, 因逆变器采用 IGBT 作为开关器件, 故可以采用 SPWM 调制的方法发出任意给定频率的正弦波, 只需要改变调制波的频率即可。利用 TI 公司 TMS320LF2407A 系列 DSP 的事件管理器单元 (EV) 的定时器功能, 可以方便地设置调制波的频率。

数字形式的调制波可以通过 2 种方式给出, 一种是实时计算的形式, 通过正弦波表达式 $A \sin(2\pi t/T)$ 计算 t 时刻对应的正弦数值, 其中 T 为正弦调制波周期。再与三角波比较生成对应宽度的 SPWM 脉冲; 另一种是通过查表的方式, 即预先在 RAM 中存储一个离散化的正弦波表, 此时只需计算 $2\pi t/T$ 或者仅计算 t/T 的数值, 即可获得正弦值, 计算量大为减小。正弦表的点数越多则精度越高, 但相应需要的存储器容量也越大, 兼顾精度和容量, 并充分利用正弦波的对称性, 可采用 $1/4$ 周期 256 点的正弦波表, 这样可以获得全周期 1024 点的正弦波表。

谐振频率的检测可利用 LC 并联谐振的特性: 谐振时阻抗最大, 且并联支路呈阻性, 即中性点电压 U_{AX} 与注入电流 I_{inj} 同相位。实际设计中, 可取两者相位差最小时的频率值为谐振频率 f_{res} 。 U_{AX} 、 I_{inj} 的

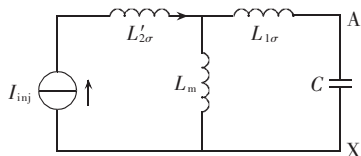


图 2 检测电容时系统等效电路
Fig.2 Equivalent circuit during capacitance test

相位判断可通过过零比较电路将正弦波转换成对称方波, 再通过 DSP 的捕获单元 (CAP) 获得对称方波的跳变沿作为正弦波的过零点时刻, 则 $t=t_1-t_2$ 即可作为两者相位差值 (t_1 、 t_2 分别为 U_{AX} 、 I_{inj} 的过零时刻)。

下面以一个实例分析这种检测方法的实时性。假设需补偿的电容范围为 $24.0 \sim 72.0 \mu\text{F}$, 电抗器参数为 $L_{1\sigma}=14.64\text{ mH}$, $L_m=576.14\text{ mH}$, 根据式(4)计算的谐振频率 $f_{\text{res}} \in [24.4\text{ Hz}, 42.3\text{ Hz}]$, 取变频信号在 $23 \sim 43\text{ Hz}$ 范围内, 以步长 0.1 Hz 循环变化, 每种频率的信号持续 10 个周期 (目的在于可取 10 个周期的相位差平均值判断谐振点), 则扫频一轮所需的时间为

$$t_{\text{scan}} = 10 \sum_{23}^{43} \left[\frac{1}{23} + \frac{1}{23.1} + \cdots + \frac{1}{43} \right] \approx 63.1(\text{s})$$

换言之, 约 1 min 即可完成一轮检测, 更新电网的对地电容值, 实时性能满足要求。

3 逆变器的控制

根据第 1 部分的结构和原理介绍, 可见系统设计的关键是对逆变器的控制, 即逆变器的输出电流应当精确地满足式(1)的条件, 此时电抗器才呈现式(3)推导的电抗值表达式。

电流跟踪控制在有源滤波器 (APF) 中应用广泛, 其主要控制方案有 3 种^[12], 考虑到此处跟踪的电流波形为一次侧正弦波, 对电流突变的动态响应性要求不高, 故选择三角波比较控制方案, 其原理框图如图 3 所示。该方案的优点是: 线性控制系统, 结构简单, 且开关器件频率固定, 并可运用多种改进方式如单极倍频 SPWM 来获得更好的输出波形。

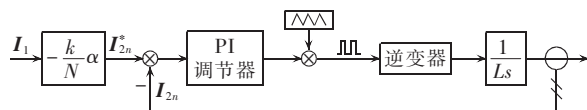


图 3 电流控制方案框图

Fig.3 Block diagram of current controller

逆变器控制系统的硬件结构如图 4 所示。主控制器基于 DSP 和 CPLD 芯片, 其中 DSP 实现信号采样, 数字 PI 调节及生成 PWM 驱动脉冲等功能, 利用 TMS320LF2407A 系列 DSP 的 ADC 模块, 事件管理器模块 (EV), 可以方便地实现上述功能。CPLD 芯片用于实现对逆变器的各种保护逻辑, 如直流母线电压 (U_d) 过压保护、逆变器短路保护、IGBT 稳态过流保护等。当系统工作异常时, 从逆变器主回路及 IGBT 驱动电路反馈的信号经过信号调理电路后输入 CPLD, 并进行与或、锁存等一系列逻辑操作后, 再输出信号给 DSP 完成脉冲封锁、继电器控制、系统复位等保护功能。

采用 CPLD 这种可编程逻辑器件进行保护逻辑设置的优势在于: 硬件电路大为简化, 易修改, 抗干扰能力强。主处理器采用 DSP+CPLD (或 FPGA) 的

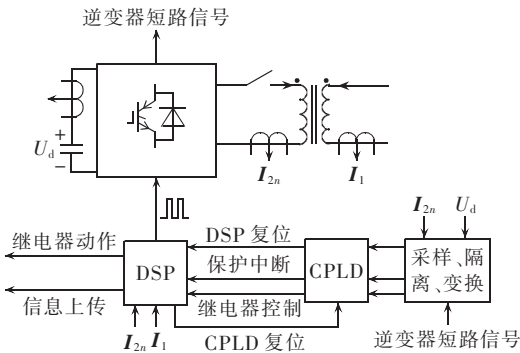


图 4 逆变器控制系统硬件结构图

Fig.4 Hardware configuration of inverter control system

控制器设计方式,在当前的电力电子装置设计中应用非常普遍^[13-15],是主流发展方向之一。

4 总控及通信系统

由于电抗器副方为多绕组结构,连接有多个逆变器,故还需要 1 块主控电路实现各个支路之间的协调和通信。该主控电路也采用 TMS320LF2407A 芯片作为处理器,主要实现以下功能:监测电网中性点电压,正常时(相关规程规定中性点电压不得超过额定相电压的 15%,即 $U_0 < 15\%U_{N\phi}$),通过 CAN 总线发送“扫频”指令给复用为电容检测支路的 DSP,控制该支路注入一变频正弦信号用于检测电网对地电容,并将检测到的谐振频率 f_{res} 上传给主控 DSP 板,用于计算并更新电容值及电流系数 α ;一旦主控板检测到中性点电压超过预设值(例如 $15\%U_{N\phi}$),则判定电网有单相接地故障发生,就立即通过 CAN 发送“补偿”信号和最近一次更新的 α 值给所有的逆变器支路,控制各逆变器输出电流跟踪 $-k\alpha I_1/N$,此时一次侧呈现电抗值 $X_{l\sigma} + (1-\alpha)X_m$,消弧线圈以预设的脱谐度 γ 补偿对地电容电流。补偿时,各支路的控制系统 DSP 也通过 CAN 总线将相关补偿信息如 I_1 、 I_{2n} 等上传给主控板。

此外,该主控板还通过 RS-232/485 协议与工控机通信,实时上传系统状态信息,并通过 Visual C++ 开发的监控软件在工控机上显示和记录,可适应自动化变电站的要求。

5 试验

消弧线圈样机按 $800\text{ kV}\cdot\text{A}$ 容量设计,电抗器二次侧绕组数 $N=12$,一次侧绕组匝数 $N_1=606$,二次侧绕组匝数 $N_2=45$,匝比 $k=606:45$ 。实验测得一次侧漏电感 $L_{l\sigma}=14.64\text{ mH}$,励磁电感 $L_m=576.14\text{ mH}$ 。功率器件采用 Semikron 公司 SKM124D/300A 系列 IGBT,开关频率定为 10 kHz 。系统动模试验接线图如图 5 所示。

图中 T_r 为升压变压器 ($400\text{ V}/10.5\text{ kV}$, $1.6\text{ MV}\cdot\text{A}$); T_{rjd} 为接地变压器 ($800\text{ kV}\cdot\text{A}$); TV_0 为中性点电压 TV (单相 $10\text{ 000}/100\text{ V}$); TA_L 为补偿电流 TA (单相 150

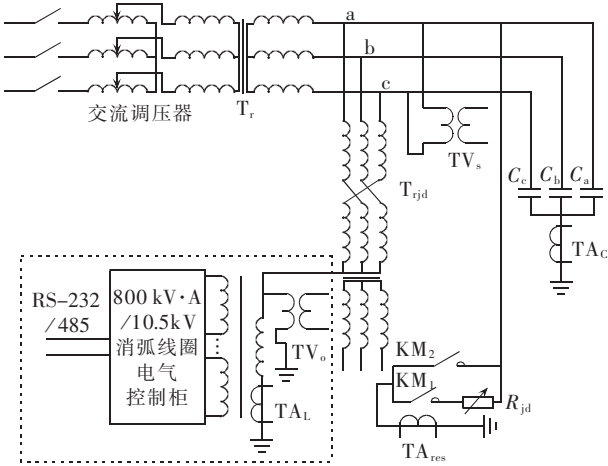


图 5 试验接线示意图

Fig.5 Experimental circuit

$/5\text{ A}$); TV_s 为系统线电压 TV (单相 $10\text{ 000}/100\text{ V}$); TA_c 为电容电流 TA (单相 $100/5\text{ A}$); TA_{res} 为接地残流 TA (单相 $100/5\text{ A}$); C_a 、 C_b 、 C_c 为并联电容器 ($100\text{ kvar}/10.5\text{ kV}$); R_{jd} 为接地电阻 (阻值可调的水电阻); KM_1 、 KM_2 为接地开关 (高压真空接触器)。

表 1 为 10.5 kV 系统下模拟高阻接地和金属性接地试验时的数据记录。试验过程如下:调节系统线电压至额定值,在不同的并联电容工况下,合上接地开关 KM_1 (高阻接地)或 KM_2 (金属接地),使得 A 相母线对地短路。此时控制系统迅速响应,从扫频状态切换到补偿状态,电抗器输出补偿电流。接地故障消除后 (KM_1 或 KM_2 断开),各逆变器停止输出电流,二次侧接触器 KM 断开 (参见图 1),消弧线圈退出补偿。经过短暂延时后,消弧系统再次进入扫频状态运行。

表 1 10.5 kV 系统单相接地故障时的补偿数据

Tab.1 Compensation data for single-phase grounding faults of 10.5 kV system

$C_{ia}/\mu\text{F}$	$C_{di}/\mu\text{F}$	U_s/V	接地类型	I_c/A	I_L/A	I_{res}/A
24.2	24.1	10 498	高阻	44.5	44.8	1.3
32.1	31.9	10 579	高阻	58.6	59.2	1.7
36.0	35.7	10 487	金属	67.7	69.1	2.6
48.6	48.5	10 391	金属	90.3	92.1	4.1
56.5	56.2	10 500	高阻	96.4	97.5	4.0

注: C_{ia} 、 C_{di} 分别为电容的实际值与检测值; U_s 为系统线电压; I_c 、 I_L 、 I_{res} 分别为电容电流、补偿电流、接地残流。

从表 1 中的数据可知,采用注入信号法检测电容的精度很高,相对误差小于 1% ;消弧线圈补偿效果良好,在各种工况下接地残流均小于 5 A 。控制系统运行良好,对各种类型的接地故障均能正确响应,电抗值控制精确。

6 结语

从装置的运行效果而言,基于变压器可控负载原理实现的新型消弧线圈具备自动调谐、补偿范围广、谐波污染小的优良性能。从装置设计角度出

发,基于 DSP 的数字控制系统比传统的模拟控制具备计算能力强、算法灵活、可靠性高、调试和通信方便的优点,是目前控制器设计的主流方向,值得推广。

参考文献:

- [1] HANNINEN S, LEHTONEN M. Characteristics of earth faults in electrical distribution networks with high impedance earthing[J]. Electric Power System Research, 1998, 44(3): 155-161.
- [2] 林志超. 中压电网系统中性点接地方式的选择与应用[J]. 高压技术, 2004, 30(4): 60-61, 64.
LIN Zhi-chao. The selection and application of neutral grounding method of MV network [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(4): 60-61, 64.
- [3] 符信勇, 万军彪. 消弧线圈在配电网的应用及其效果[J]. 江西电力, 2004, 28(2): 4-7, 18.
FU Xin-yong, WAN Jun-biao. Application of arc-suppression coil and its effect in distribution network[J]. Jiangxi Electric Power, 2004, 28(2): 4-7, 18.
- [4] 郑红英. 消弧线圈在我局配电网中的应用[J]. 浙江电力, 2003(6): 52-53, 70.
ZHENG Hong-ying. Application of arc-suppression coil in Ning-bo distribution network[J]. Zhejiang Electric Power, 2003(6): 52-53, 70.
- [5] 郑希如. 自动跟踪补偿消弧线圈在电网中的应用[J]. 山西电力, 2003(6): 9-11.
ZHENG Xi-ru. Application of automatic following-up compensation arc-decreasing wires in power network[J]. Shanxi Electric Power, 2003(6): 9-11.
- [6] 蔡旭, 刘勇, 胡春强, 等. 新型偏磁式谐振接地与保护[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 44-49.
CAI Xu, LIU Yong, HU Chun-qiang, et al. New resonance earth system with magnetic bias and its protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 44-49.
- [7] 刘艳村, 鲁铁成, 文习山, 等. 基于 TSC 控制技术的快速响应自动消弧装置[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(20): 88-93.
LIU Yan-cun, LU Tie-cheng, WEN Xi-shan, et al. Automatic arc-suppression equipment with fast response based on TSC control technique[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(20): 88-93.
- [8] 陆国庆, 姜新宇, 欧阳旭东, 等. 高短路阻抗变压器式自动快速消弧系统[J]. 电网技术, 2000, 24(7): 25-28.
LU Guo-qing, JIANG Xin-yu, OUYANG Xu-dong, et al. An automatic rapid arc suppression system based on transformer with high short circuit impedance[J]. Power System Technology, 2000, 24(7): 25-28.
- [9] 程路, 陈乔夫, 张宇, 等. 基于变压器可控负载原理的新型消弧线圈[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(21): 77-81.
CHENG Lu, CHEN Qiao-fu, ZHANG Yu, et al. Novel arc-suppression coil based on the theory of transformer with controllable load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(21): 77-81.
- [10] 张常全, 赵裕民. 老式消弧线圈存在的问题及改造的必要性[J]. 电网技术, 2001, 25(5): 59-62.
ZHANG Chang-quan, ZHAO Yu-min. Existing problems in outdated arc suppression coil and necessary of its revolution[J]. Power System Technology, 2001, 25(5): 59-62.
- [11] 曾祥君, 于永源, 尹项根, 等. 基于注入信号法的消弧线圈自动调谐新技术[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(9): 38-41.
ZENG Xiang-jun, YU Yong-yuan, YIN Xiang-gen, et al. Novel technique for Petersen-coil tuning based on injecting current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(9): 38-41.
- [12] BUSO S, MALESANI L, MATAVELLI P. Comparison of current control techniques for active filter applications[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1998, 45(5): 722-729.
- [13] 邵国君, 蔡旭. 基于 DSP 和 FPGA 的消弧线圈数字励磁调节器[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(8): 75-77.
SHAO Guo-jun, CAI Xu. Digital excitation regulator based on DSP and FPGA for arc-suppression coil[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(8): 75-77.
- [14] 刘幼林, 姬劳. 基于 DSP+CPLD 的断路器智能控制单元设计[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(11): 65-68.
LIU You-lin, JI Lao. Design of intelligent breaker controller based on DSP+CPLD[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(11): 65-68.
- [15] 申景双, 刘为, 姚刚, 等. 基于 CPLD 的 STATCOM 触发器设计[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(2): 46-49.
SHEN Jing-shuang, LIU Wei, YAO Gang, et al. Design of CPLD based pulse generator for STATCOM [J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(2): 46-49.

(责任编辑: 康鲁豫)

作者简介:

程路(1981-), 男, 湖北随州人, 博士研究生, 研究方向为消弧线圈、电力电子在电力系统的应用(E-mail: chemlu_1@163.com);

陈乔夫(1946-), 男, 湖北公安人, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力谐波抑制、FACTS 技术、变压器理论;

张宇(1980-), 男, 湖南衡阳人, 博士研究生, 研究方向为可调电抗、FACTS 装置。

Automatic tuning arc-suppression system based on DSP and PWM inverter

CHENG Lu, CHEN Qiao-fu, ZHANG Yu

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The structure and principle of a novel arc-suppression coil based on the controllable load theory of transformer is analyzed and the design of its control system is presented. The fundamental principle of the arc-suppression coil is that: the voltage source PWM inverter is taken as the controllable load of transformer's secondary winding and the equivalent reactance of transformer's primary winding is thus regulated by controlling the output of inverter. The digital controller applies DSP for the calculation and generation of driving pulses and CPLD for the multi-protections of inverter. The implementation of automatic reactance tuning and inverter output current control is analyzed in detail, as well as the self adapting and on-line communication. The experimental results have verified the validity of control scheme and show the proposed arc-suppression system compensates the capacitive grounding current correctly and effectively.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China(50477047).

Key words: arc-suppression coil; transformer; PWM inverter; DSP; digital control system