

智能型高压变频串联谐振试验电源设计

黄新波,程文飞,张周熊,石 杰,赵 阳

(西安工程大学 电子信息学院,陕西 西安 710048)

摘要: 设计了一种智能型高压变频串联谐振试验电源发生装置,利用 LC 串联谐振原理,DSP 核心板输出 PWM 波和 SPWM 波分别控制 Buck 电路和逆变电路;通过智能校正算法和 PI 算法实现智能调频调功;通过对励磁变压器二次侧电压采样以及 FFT 运算实现自动搜寻谐振点;通过调节装置外部电抗器和电容器的参数改变谐振点频率,从而改变电源电压的输出幅值。该智能型高压变频串联谐振试验电源发生装置可在 30~300 Hz 范围内连续调频,输出电压等级达到高压、超高压级别。

关键词: 电源;设计;谐振;SPWM;PWM;调频;逆变器

中图分类号: TN 77

文献标识码: B

DOI:10.3969/j.issn.1006-6047.2013.08.027

0 引言

为了预防电力装置运行中的绝缘故障,电力装置在投运前及运行中都需要进行严格的绝缘耐压试验。以往工频交流试验装置主要是高压试验变压器和电力变压器,体积和电源容量大,试验装置笨重,不能自动调频、调压,难以适应当今大电网、高电压、高自动化的发展趋势^[1]。智能型高压变频串联谐振试验电源装置嵌入新型智能调频、调压算法,利用大功率开关器件绝缘栅双极晶体管(IGBT)代替以往的模拟器件逆变产生特高压试验所需的交流电压,同时利用 LC 串联谐振原理使输出电压等级可达高压、超高压级别。该装置使工频交流试验现场调试更加方便稳定,并且有效地保护了实验装置以及测试品。

1 耐压试验装置结构和原理

智能型高压变频串联谐振试验装置是一种用小容量低电压的电源获得高电压大容量的输出成套试验装置,该装置主要由变频电源主控器、励磁变压器、电抗器和电容分压器组成^[2]。

试验装置整体结构如图 1 所示,变频电源主控器输出幅值为 0~400 V、频率为 30~300 Hz 的连续可调交流电压信号^[3]。该信号经过励磁变压器升压后传输给由电抗器和测试品电容串联组成的 LC 谐振回路。因为高压试验需要的电压等级较高,为了安全及操作方便,采用先调频后调压的策略,即先用智能校正器(实现装置频率 f 的闭环控制和频率步长大小调节)智能寻找进入谐振状态的频率 f_n ,使回路达

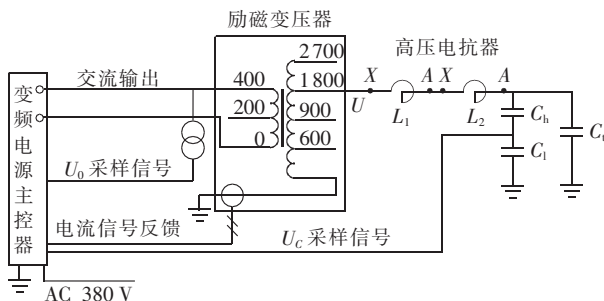


图 1 装置整体框架图

Fig.1 Overall frame of device

到谐振状态,然后再调节谐振回路电容电压的有效值使之达到期望电压值,从而获得高电压大容量。图 1 中 L_1 和 L_2 是高压电抗器^[4],两者等效为谐振电抗 L_e 。 C_b 、 C_1 和 C_t 分别是电容分压器高压臂电容、低压臂电容和测试品等效电容,三者等效为谐振电容 C_e 。

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_e C_e}} \quad (1)$$

谐振时,高压电抗器感抗等于谐振电容容抗,即 $X_C = X_L$,测试品两端电压值达到 U_{Ct} 。

$$U_{Ct} = QU \quad (2)$$

其中, U 为励磁变压器二次侧输出电压; Q 为谐振电路的品质因数。

2 智能型高压变频串联谐振试验电源主控器硬件设计

智能型高压变频串联谐振试验电源主控器的结构图如图 2 所示,其主要包括 DSP 运算控制电路(智能调频、调幅控制模块)、三相全桥不可控整流电路、Buck 变换电路、逆变电路、数据显示及人机交互电路、保护电路以及通信电路^[2]。

本装置运用了 TI 公司的 TMS320F28335 处理芯片作为核心控制 CPU,利用 DSP 高速运算的特性,集成 DSP 常用的外围电路,满足了智能型高压变频串联谐振试验装置高稳定性、高精确度的要求。DSP

收稿日期:2012-06-29;修回日期:2013-06-06

基金项目:陕西省教育厅产业化培育项目(2010JC08);陕西省科学技术研究发展计划项目(2011KJXX09);西安市科技计划项目产学研合作促进工程(CXY1104)

Project supported by the Educational Commission of Shaanxi Province(2010JC08),the Science & Technology Research and Development Program of Shaanxi Province(2011KJXX09) and Xi'an Science and Technology Development Funds(CXY1104)

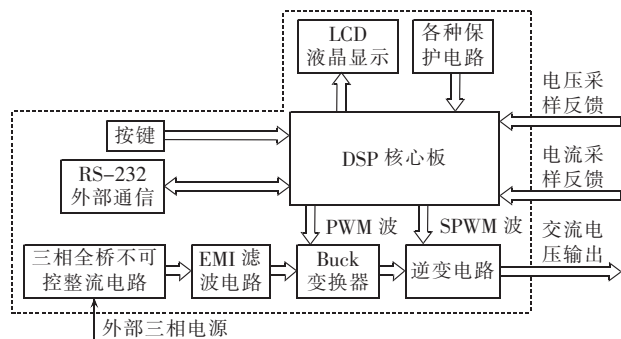


图 2 装置箱体结构图
Fig.2 Structure of device cabinet

产生频率可调的 SPWM 波和占空比可调的 PWM 波后,经 I/O 口分别输送给逆变电路和功率调节电路^[5]。外部存储器模块由 DSP 控制,主要用于存储试验的重要设置以及试验数据,使装置重新启动之后无需重新设置;输入模块直接与 DSP 相连,用户可以通过直接对 DSP 输入命令来调节正弦波的频率;显示模块主要显示试验电压、频率等数据,并通过人机界面进行实验数据的相关设置^[6]。

2.1 功率调节电路

功率调节(Buck 变换器)模块的基本思路就是通过控制开关器件的开断,来调节流过开关器件的直流电压,从而达到功率调节的目的。智能型高压变频串联谐振试验电源装置的电源主回路主要有整流电路、直流传输电路、逆变电路以及负载电路。

智能型高压变频串联谐振试验电源采用三相不可控的整流电路;逆变电路模块输出频率可调的正弦波;直流传输电路采用直流斩波(Buck 电路)方式进行功率调节,通过改变 PWM 波占空比的大小来调节直流输出电压。功率调节模块示意图如图 3 所示。

三相不可控整流模块得到的直流电压输入功率调节模块,由 DSP 生成的占空比可调的 PWM 波经 IGBT

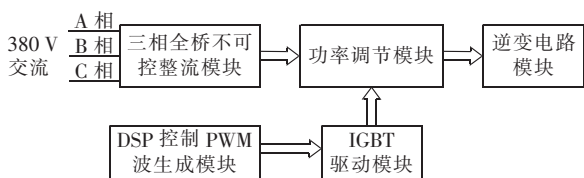


图 3 功率调节模块示意图
Fig.3 Schematic diagram of power modulation module

驱动模块来控制斩波电路中 IGBT 的关断,这样就可以调节输送给逆变电路的电压幅值。

2.2 逆变电路

逆变电路是整个装置的核心部分,其稳定情况关系着整个装置的安全运行和试验数据的精度。从购买方便、技术成熟、设计简化、性能稳定等因素考虑,本文采用大功率 IGBT 作为开关器件。IGBT 的驱动方法主要有以下 3 种^[7]。

a. 脉冲变压器驱动电路:一个小脉冲经过变压器后,经过一个过保护电阻开通 IGBT 的栅极。

b. 光耦隔离驱动电路:将 PWM 波经过小延时的高速光耦后放大,从而驱动 IGBT 的栅极。

c. 集成驱动模块:由成品的驱动模块驱动 IGBT,可以提高装置的可靠性,该类芯片主要有富士的 EXB 840、三菱的 M57962L 等。

智能型高压变频串联谐振试验电源运用集成驱动模块进行驱动,集成模块采用美国国际整流器公司的 IR2110 高压集成电路元件,外围电路简单,性能良好。逆变电路^[8-9]如图 4 所示,图中 U 为 Buck 电路输出的电压, V_{D1} 和 C_2 分别是自举二极管和自举电容,它们的选择都有严格的限制。交替开通和关断 V_{T1} 、 V_{T2} 、 V_{T3} 、 V_{T4} 就可以在逆变器的输出端获得交变的电压。IGBT 的开断由 DSP 产生的 SPWM 波来控制,电压幅值取决于逆变器的输入端电压值,频率取决于 SPWM 波的频率^[10]。

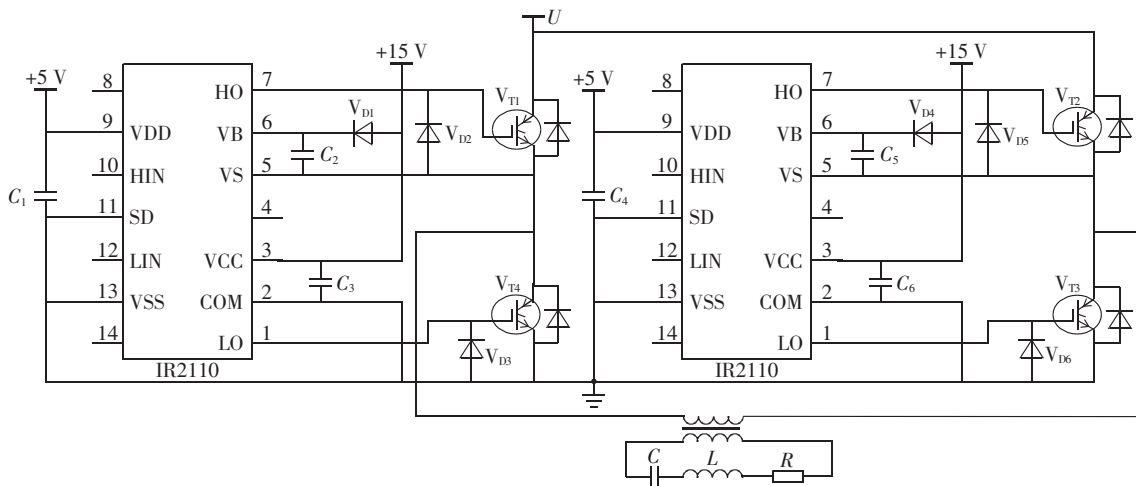


图 4 串联谐振逆变电路
Fig.4 Circuit of series resonance inverter

2.3 保护电路

在串联谐振电路中,比较难处理的故障是上下桥臂直通,其由负载短路或者开关器件因触发脉冲而误动作等诸多因素引起。上下桥臂直通短路后,回路的电流在短时间内会上升到很大的幅值,很快烧毁开关器件,因此必须附加各种保护电路。保护电路分为过压保护电路、过流保护电路、欠压保护电路和欠流保护电路等。

智能型高压变频串联谐振试验电源的过压保护措施有 2 种^[6]:一种是外加吸收电路,另一种是针对逆变器输入端电压设计保护电路。当逆变器的输入端电压超过设定值时启动保护电路。本电源装置采用第 2 种过压保护方法,具体原理如图 5 所示。在逆变器输入端的滤波电容 C 两端,用电阻分压获得电压信号 U_2 ,与 LM319 负向输入端的基准电压信号 U_{b2} 相比较。当 U_2 大于 U_{b2} (即过电压)时,LM319

出高电平,使光耦的一次侧导通,二次侧输出低电平,经 CD40106B 反相后变成高电平的过电压信号 U_0 。

3 智能型高压变频串联谐振试验电源主控制器软件设计

3.1 软件流程

智能型高压变频串联谐振试验电源的核心算法是 SPWM 波形生成算法和智能调频调压算法,装置的软件流程和保护中断流程如图 6、7 所示。结合图 1 可知,装置对逆变输出侧电压 U_0 以及电容分压器电压 U_c 采样,通过 FFT 运算得到 U_0 和 U_c 相位。当相位相差 90° 时,SPWM 的频率等于谐振频率,此时外部电抗器与电容器产生谐振,电容分压 U_{ch} 达到最大值,由于 C_1 较小, $U_{ch} \approx U_{c1}$ 为励磁变压器输出电压的 Q 倍。

3.2 SPWM 波形生成算法

本装置采用的是对称规则采样法生成 SPWM 波^[11],即通过设置 DSP 的 T1PR(以定时器 1 为例)生成三角波与正弦调制波 $U_r \sin \omega t$ 相交,由交点处决定 SPWM 波的脉宽^[12]。对称规则采样法原理见图 8。

假设三角载波的幅值 U_c 为单位量 1,则正弦调制波的幅值 U_r 就是调制度 m 。图 8 中的三角波和正弦波均是经过向上平移单位量 1 得到的,与过横坐标轴得到的结果一致。利用底点采样,根据相似三角形原理,可得关系式如式(3)所示。

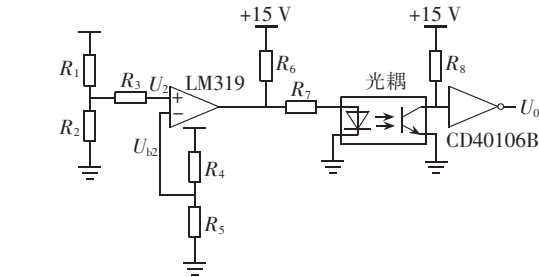


图 5 过电压保护电路
Fig.5 Circuit of overvoltage protection

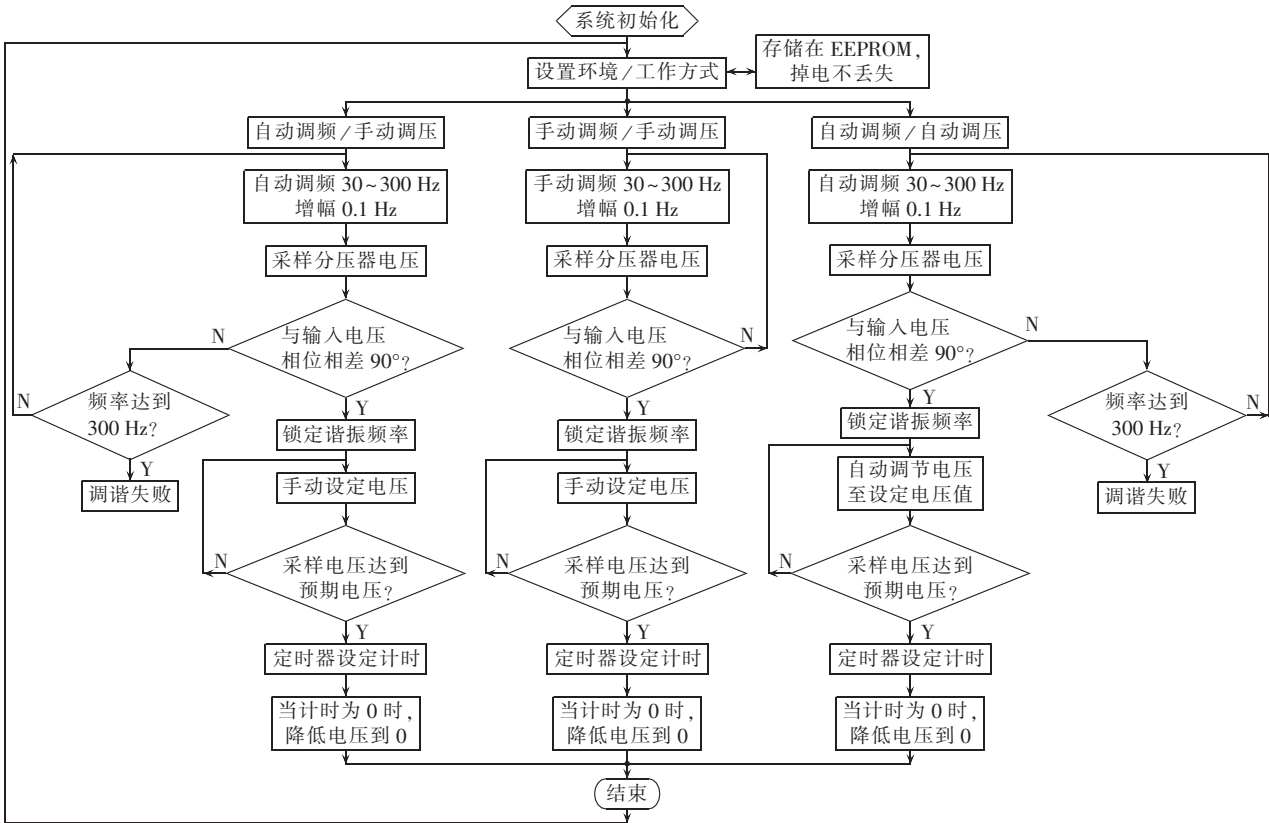


图 6 软件流程
Fig.6 Flowchart of software

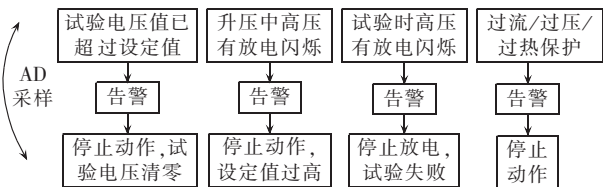


图 7 保护中断流程

Fig.7 Flowchart of protection interrupt

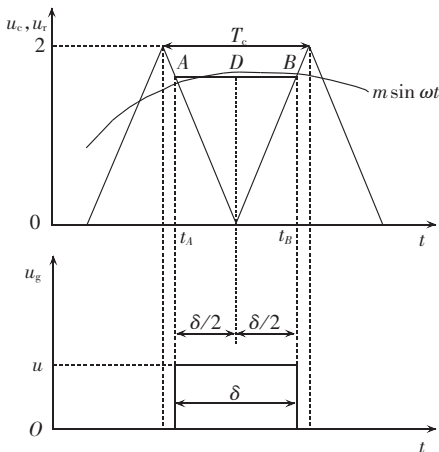


图 8 生成 SPWM 波形的规则采样法

Fig.8 Regular sampling method of SPWM wave generation

$$\frac{1+m\sin\omega t}{\delta/2}=\frac{2}{T_c/2}\tag{3}$$

其中, m 为调制度, $0\leq m\leq 1$; ω 为正弦信号波角频率; δ 为开通时刻脉冲宽度; T_c 为三角波载波周期。因此可得开通时刻的脉冲宽度:

$$\delta=T_c(1+m\sin\omega t)/2\tag{4}$$

$$\omega t=2\pi(k+3/4)/N\quad k=0,1,2,\cdots,N-1\tag{5}$$

其中, N 为载波比, $2\pi/N$ 为三角波周期 T_c 所对应的弧度, k 为一个周期内采样计数值。

由以上分析得 DSP 的比较单元 1 的比较寄存器 CMPR1 的值为:

$$\text{CMPR1}=\text{T1PR}-\delta/(2T_1)\tag{6}$$

其中, T_1 为 EVA 通用定时器 1 的时钟周期。

3.3 智能调频算法

相对于通过 FFT 计算相位差来实现调频的方法,智能调频主要通过智能矫正器的控制开关来实现^[6]。智能矫正器的原理如图 9 所示。结合图 1,通过实时监测 U_{ch} ,并通过锁相环节计算出实时频率,把实时频率与频率设定值 f_0 相比较得出其差值 e_{f0} 。设

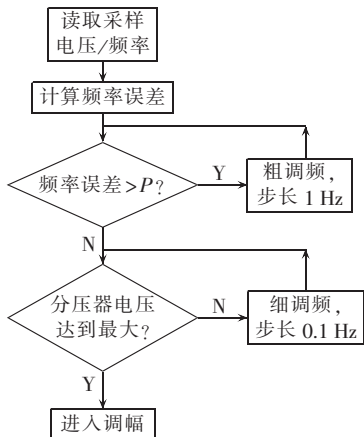


图 9 智能矫正器原理图

Fig.9 Schematic diagram of intelligent corrector

定阈值 P ,当差值 $|e_{f0}|>P$ 时,进入频率粗调环节,调节步长为 1 Hz;当 $|e_{f0}|\leq P$ 时,进入下一个微调环节。若分压 U_{ch} 达到最大值,说明电路已经进入谐振,若没有达到最大值,则进入步长为 0.1 Hz 的微调环节。

3.4 智能调压算法

传统 PI 控制器简单易于实现,在控制领域得到了广泛的应用,但已不适用于智能型高压变频串联谐振试验电源装置,例如快速性和稳定性之间的矛盾尤为突出。因此本文提出模糊控制算法和最优非线性 PI 控制相结合的方法来增强装置的控制性能^[6]。模糊最优非线性 PI 控制环节,实现模糊控制和最优控制等算法,提出的模糊最优调幅控制策略,在大偏差范围内采用模糊控制,以获得更好的瞬态性能;在小偏差范围内采用最优非线性 PI 控制。这样使本装置的调压算法兼顾快速性和稳定性。

4 实验数据分析

高压容性设备现场耐压试验应该优先选用工频试验^[13],而智能型高压变频串联谐振试验电源装置的频率调节范围是 30~300 Hz。所以为了将试验频率尽可能限制在 50 Hz 左右且满足容值不同的容性设备,电抗器采用多台并联和串联的灵活连接方式。装置运行稳定,易于调节。具体组合方式见表 1。

表中以额定电压 10 kV、横截面积 300 mm² 的 XLPE 电缆试验为例。由于电缆长度与容值成正比关系,所以根据不同的电缆长度选择不同组合方式的电

表 1 XLPE 电缆试验参数配置

Tab.1 Parameter configuration for testing XLPE cable

电抗器组合	电抗器参数			可试验电缆长度/km	试验频率/Hz	试验电流/A
	感抗/H	额定电流/A	额定电压/kV			
3 台并联	43.00	3	27	1	38	2.1
4 台并联	32.50	4	27	2	31	3.5
6 台并联	22.70	6	27	3	31	5.2
8 台并联	16.25	8	27	4	31	6.9
10 台并联	13.00	8	27	5	31	8.6

抗器,这样保证了在试验频率尽可能接近工频的情况下,试验电流可以有明显的变化。

110 kV 开关实验设备试验参数配置为:8 台电抗器串联,从而使开关实验设备在工频附近谐振;感抗、额定电流和额定电压分别为 1 040 H、1 A、216 kV,测试品电容为 0.01 μ F,试验频率为 49 Hz,试验电流为 0.6 A。220 kV 电力变压器中性点耐压试验参数配置为:7 台电抗器串联,感抗、额定电流、额定电压分别为 910 H、1 A、189 kV,变压器电容量为 0.03 μ F,试验频率为 30 Hz,试验电流为 0.9 A。

5 结语

本高压变频串联谐振试验电源装置以 DSP 芯片作为核心控制电路。通过 DSP 芯片产生占空比可调的 PWM 波和频率可调的 SPWM 波分别控制功率调节模块和逆变模块,从而产生幅值和频率可调的交流电。该交流电经励磁变压器后传输给谐振电路,DSP 对谐振时电路的电压、电流信号进行采集和处理,最后将得到的数据传回研究中心。该装置由变频电源主控器、励磁变压器、电抗器和电容分压器等部分组成,它们便于拆卸、方便运输,解决了以往装置体积庞大、维护困难等问题。同时装置采用智能调频调压算法,缩短了调节时间、减小了超调量,使装置输出动态性能得到了提高。本装置既能满足现场试验,也能应用于工厂和实验室;既能适用于电缆设备,也能推广应用于 GIS 等其他容性设备^[8-10],因而具有重要意义。

参考文献:

- [1] 黄新波. 变电设备在线监测与故障诊断[M]. 北京:中国电力出版社,2008:47-49.
- [2] 罗卓伟. 智能型特高压变频谐振试验电源的研制及工程应用[D]. 长沙:湖南大学,2009.
LUO Zhuowei. Research and engineering application of intelligent ultra high voltage frequency conversion resonant test power supply[D]. Changsha:Hunan University,2009.
- [3] 徐先勇,罗安,方璐,等. 新型调频式谐振特高压试验电源的参数设计与实现[J]. 中国电机工程学报,2009,29(10):24-30.
XU Xianyong,LUO An,FANG Lu,et al. Parameters design and realization of novel UHV frequency-tuned resonant test power supply[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(10):24-30.
- [4] 张文亮,胡毅. 特高压输变电设备应用于工程的分析研究[J]. 电力设备,2004,5(7):15-18.
ZHANG Wenliang,HU Yi. Analysis and research of UHV equipments for power transmission and transformation applied in roject[J]. Electrical Equipment,2004,5(7):15-18.
- [5] 朱永亮,马惠,张宗谦. 三相高功率因数 PWM 整流器双闭环控制系统设计[J]. 电力自动化设备,2006,26(11):87-91.
ZHU Yongliang,MA Hui,ZHANG Zonglian. Dual closed-loop control for three-phase high-power factor PWM rectifier[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(11):87-91.
- [6] 徐先勇. 调频式谐振特高压试验电源的研制及应用[D]. 长沙:湖南大学,2010.
XU Xianyong. Research and application of UHVAC frequency-tuned resonant test power supply[D]. Changsha:Hunan University,2010.
- [7] 高迎慧. IGBT 串联谐振型逆变器高频化技术的研究[D]. 保定:华北电力大学,2004.
GAO Yinghui. Research on HF technology of IGBT series resonant inverter[D]. Baoding:North China Electric Power University,2004.
- [8] 谭甜源,罗安,唐欣,等. 大功率并联混合型有源电力滤波器[J]. 中国电机工程学报,2004,24(3):41-45.
TAN Tianyuan,LUO An,TANG Xin,et al. Development of high-capacity hybrid active power filter [J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(3):41-45.
- [9] 胡庆波,吕征宇. 一种用于三相逆变器死区效应的数字补偿方法[J]. 电力电子技术,2005,39(4):9-11.
HU Qingbo,LÜ Zhengyu. Digital method for dead-time compensation of three-phase voltage inverter[J]. Power Electronics,2005,39(4):9-11.
- [10] 刘庆雪. 串联谐振高频电源逆变控制及调功装置的研究[D]. 西安:西安理工大学,2005.
LIU Qingxue. The research on series resonant inverter control and power regulation of high frequency power supply[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology,2005.
- [11] 金红元,邹云屏,林磊,等. 三电平 PWM 整流器双环控制技术 & 中点电压平衡控制技术研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(10):64-68.
JIN Hongyuan,ZOU Yunping,LIN Lei,et al. Research on the technology of the neutral-point voltage balance and dual-loop control scheme for three-level PWM rectifier[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(10):64-68.
- [12] 陈湘令,张莹. 基于 DSP 变频器的 SPWM 控制算法[J]. 微机计算机信息,2007,23(7):134-136.
CHEN Xiangling,ZHANG Ying. The arithmetic of the SPWM of transducer with SPWM control based on the DSP [J]. Microcomputer Information,2007,23(7):134-136.
- [13] 张文亮,张国兵. 特高压 GIS 现场工频耐压试验与变频谐振装置限频方案原理[J]. 中国电机工程学报,2007,27(24):1-4.
ZHANG Wenliang,ZHANG Guobing. UHVAC GIS on site power-frequency voltage resonance devices[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(24):1-4.
- [14] 陈荔,刘会金,陈格桓. 多回直流输电系统稳定性研究[J]. 电力自动化设备,2005,25(8):47-49.
CHEN Li,LIU Huijin,CHEN Gehuan. Transient stability analysis of multiple-loop HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(8):47-49.
- [15] 肖湘宁,徐永海,刘昊. 混合型有源电力补偿技术与实验研究[J]. 电力系统自动化,2002,26(3):39-44.
XIAO Xiangning,XU Yonghai,LIU Hao. Analysis of hybrid power compensator and its experimental study[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(3):39-44.
- [16] 张文亮,张国兵. 特高压交流试验电源特点探讨及比较[J]. 中国电机工程学报,2007,27(4):1-4.
ZHANG Wenliang,ZHANG Guobing. Discussion and comparison of characteristics of AC-testing supply used for UHVAC [J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(4):1-4.

(下转第 171 页 continued on page 171)

Key technologies of SFC system protection for pumped storage hydro unit

CHEN Jun¹,SI Hongjian²,ZHOU Rongbin¹,XU Jin¹,YAN Wei¹,SHEN Quanrong¹

(1. NR Electric Co.,Ltd.,Nanjing 211102,China;

2. Jiangsu Shahe Pumped-Storage Power Generation Co.,Ltd.,Liyang 213333,China)

Abstract: The configuration scheme of SFC(Static Frequency Converter) system protection for pumped storage hydro unit is introduced and solutions are proposed for its key technologies. Differential protection of SFC converter bridge;the variable-frequency current at generator side is converted to power-frequency current, which is used together with the current at grid side to form the differential current and braking current; full-period Fourier algorithm is adopted and the proportional breaking characteristic is applied to enhance its reliability. Variable-frequency differential protection of output transformer;the protection algorithm of generator startup/shutdown is applied to realize the accurate measuring during the low-frequency startup;the variable-slope braking characteristic is applied to avoid the misoperation due to out-zone fault;it is disabled by the position contact of bypass switch during the pulse commutation. Current changing rate protection;the repeated and continuous detection of action conditions and the additional auxiliary criterion of sampling value over-current are applied to enhance its reliability;the digital low-pass filter is designed to guarantee the accurate measuring of frequency at generator side during pulse commutation. All measures mentioned above are applied in the pumped storage hydro unit with excellent effect.

Key words: pumped storage hydro unit; SFC; power transformers; relay protection; current changing rate protection

(上接第 161 页 continued from page 161)

作者简介:

黄新波(1975-),男,山东海阳人,教授,博士后,研究方向为电力系统在线监测理论与技术(E-mail:huangxb1975@163.com);

程文飞(1987-),男,河南南阳人,硕士研究生,研究方向为检测技术与自动化装置;

张周熊(1987-),男,陕西周至人,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动。

Design of intelligent high-voltage and variable-frequency power source

HUANG Xinbo,CHENG Wenfei,ZHANG Zhouxiong,SHI Jie,ZHAO Yang

(College of Electronics and Information,Xi'an Polytechnic University,Xi'an 710048,China)

Abstract: An intelligent high-voltage and variable-frequency power source for insulation test is designed, which,applying the principle of LC series resonance,outputs PWM wave and SPWM wave by its DSP core board to control Buck circuit and inverter circuit respectively,adopts the intelligent correction algorithm and PI algorithm to modulate frequency and power,samples the secondary-side voltage of excitation transformer to automatically search the resonant point by the FFT operation,and adjusts the parameters of external reactor and capacitor to change the frequency of resonance point for modulating the amplitude of output voltage. The designed device outputs high/extra-high voltage with continuously variable frequency from 30Hz to 300 Hz.

Key words: electric power supplies to apparatus; design; resonance; SPWM; pulse width modulation; frequency modulation; electric inverters