

基于分布式控制的高压大容量次同步电流发生器

机端阻尼控制器可提高火电厂机组抑制次同步谐振能力,它需向机组定子注入与扭振模态互补频率的次同步和超同步补偿电流,针对此需求,设计了基于级联式 H 桥多电平逆变器的高压大容量次同步电流发生器 (High - Voltage High - Power Subsynchronous Current Generator, HHSCG) 装置。根据级联式逆变器电路结构的特点,设计了包括电压内、外环和电流内环的三环控制方法,制定了分布式控制方案,采用中央处理器加现场可编程逻辑门阵列加可扩展的多个复杂可编程逻辑器件作为主要的处理器,根据三者各自的特点分配功能,提高了 HHSCG 的总体性能。该 10 MV · A HHSCG 样机在电厂内大电流试验中可靠运行,试验结果表明,HHSCG 对目标次同步电流稳态跟踪误差小,动态调节时间快,装置具有良好的动、静态特性。

王晓宇¹ 张 涛² 操丰梅² 杨奇逊^{1,2} / 1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室 / 2. 北京四方继保自动化股份有限公司



王晓宇/博士研究生

关键词/Keywords

级联式逆变器 ·
次同步电流 ·
次同步谐振 ·
分布式控制 ·

在中国,能源与用电负荷分布的不均衡,决定了我国远距离大容量输电模式的普遍存在。然而,大量研究结果表明,大容量、远距离输电系统中的固定串补可能会引起次同步谐振 (Subsynchronous Resonance, SSR),危及电网的安全稳定运行^[1-4]。目前,已研究出一系列的 SSR 抑制方法,如扭振继电器^[5]、附加励磁阻尼控制^[6]和阻塞滤波器^[7]等。柔性交流输电技术由于其快速灵活的调节能力在电力系统中得到广泛应用^[8-9],这种快速灵活的变流技术如 STATCOM^[10]、SSSC^[11]等应用在抑制次同步振荡方面也越来越多受到重视;然而,已有的研究通常是将 SSR 抑制作为这些装置的辅助控制功能,迄今为止尚没有开发专门针对扭振阻尼控制的变流器式工业装置。

本文所讨论的高压大容量次同步电流发生器 (High - Voltage High - Power Subsynchronous Current Generator, HHSCG) 的设计是以扭振阻尼控制中用于发出次同步电流的大容量变流器为背景进行研究的。所研制的 10 MV · A HHSCG 由多个单元级联构成,这样的电路结构特点对控制系统的运算速度和跟踪准确度要求高,并需具有一定的可扩展性。为此,设计中利用中央处理器 (CPU) + 现场可编程门阵列 (FPGA) + 多个复杂可编程逻辑器件 (CPLD) 进行实时数据采集、处理和分布式控制。通过电压内、外环和电流内环的三环控制模式,达到在保证各级联单元稳定、均衡的基础上,对目标次同步电流跟踪的目的。

系统结构及工作原理

级联式 HHSCG 主电路拓扑图如图 1 所示,装置主电路为通过滤波电抗器并联接入 10 kV 系统的三相星形联结的 H 桥级联结构,再经 22 kV: 10 kV 的升压变压器,送入 22 kV 机端,变压器容量为 10 MV · A。每相都由 12 个逆变桥串联而成,各桥直流电容独立。装置的开关器件选用大功率自关断电子器件绝缘栅双极晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)。

图中, u_{sx} ($x = a, b, c$, 以下同) 为三相电源电压; u_{ex} 为逆变器输出电压; i_{sx} 为电源侧电流; i_{ex} 为装置输出的补偿电流; U_{dexi} ($i = 1, 2, \dots, 12$) 为 x 相各 H 桥直流侧电容电压。

图 2 为控制系统结构框图,该控制系

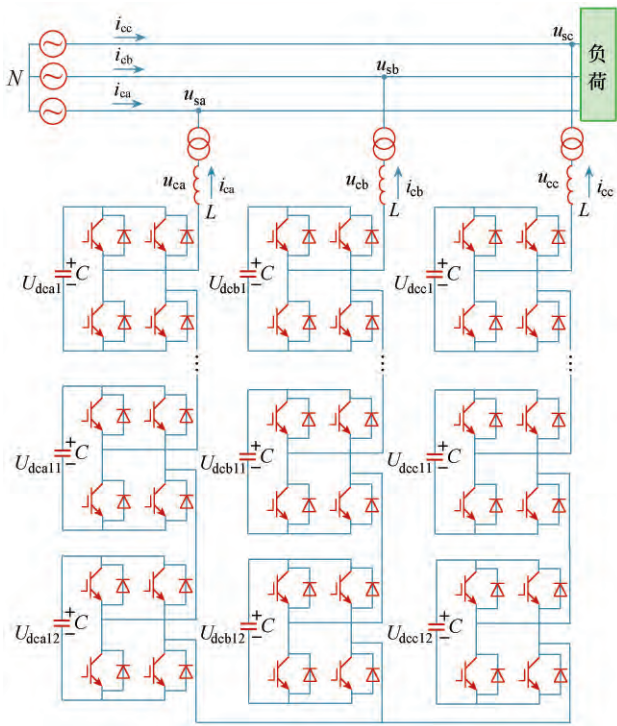


图1 HHSCG主电路图

统是基于中央处理器（CPU）、现场可编程门阵列（FPGA）和多个复杂可编程逻辑器件（CPLD），采用分布式控制，可满足级联式结构中多个级联单元和可扩展的控制需求。其中，CPU作为中央

处理器，利用其自身丰富的内部资源，完成系统管理、与FPGA通信、保护算法实现、开入和开出管理以及提供人性化的人机界面。FPGA作为中心处理单元，利用其并行处理功能、丰富的I/O管脚及可扩展的内部逻辑单元实现大量数据运算处理，如A-D采样、与其他级控制器通信、控制算法实现、载波、调制波生成及PWM输出等。CPLD作为各级联单元就地控制元件，其与FPGA通过光纤相互通信，交换电容电压、功率管温度、故障信息和控制命令等。CPLD实现各级联单元控制功能，其数量可根据变流器系统的级联单元数需求进行数量扩展。这样的设计充分满足了目前HHSCG控制系统的要求，并且大大提高了其级联单元的可扩展性和可靠性。

整个系统工作原理：FPGA接收目标次同步电流计算器^[1]发出的三相次同步目标后，利用FPGA内置的三环控制算法得到三相每个级联单元的72路PWM控制信号，下传至CPLD，通过CPLD实现对144个IGBT的开关控制。CPU实现对装置的欠电压、通信故障等报警，以及过电压、过电流保护和装置自检。

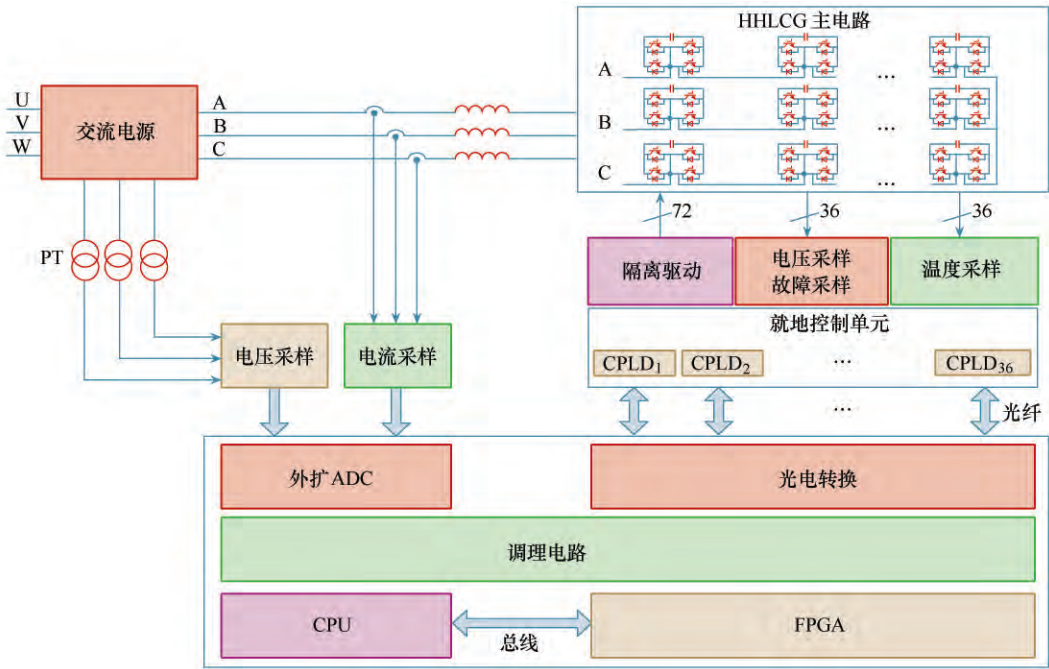


图2 HHSCG控制系统结构框图

控制策略

H 桥级联结构的多电平逆变器的电容是独立的，因此必须使其直流侧电容电压维持在一定的数值，以保证主电路在任何时刻都能跟踪指令电流的变化。若不对电容电压进行控制，由于系统存在损耗及补偿电流的变化会使电容端电压产生衰减或大的波动。而次同步电流与装置输出的工频电压矢量非同速旋转，使得电容电压波动较大，HHSCG 很难像级联式 STATCOM 可实现直压与输出无功电流解耦控制，此外，产生的电流中间谐波和谐波含量较大，在分析了上述控制目标及难点后，设计了一套适合 HHSCG 的控制策略。

HHSCG 采用电压内、外环和电流内环的三环控制方法，具体由电容电压平衡控制、电容电压稳定控制和电流跟踪控制三部分组成。其中，电容电压稳定控制是将每相 12 个单元的电容电压平均值经过二阶低通滤波后进行 PI 控制，输出可认为是等效的有功电导，与系统相电压 u_{sx} 相乘作为电流跟踪控制器中参考电流的一部分 i_{rx} ，其与三相次同步目标电流 i_{objx} 分别相加，作为电流跟踪控制器的参考电流，其中电流跟踪控制采用无差拍控制算法 [13]。电流跟踪控制器的输出为各相电压的初始调制信号 d_{mgx} 。电容电压平衡控制是通过每个级联单元加入 PI 控制，动态跟踪各级联单元实时动态平均值，其控制输出作为第 i 个级联单元的初始调制信号 d_{mgxi} ，再将各级联单元的调制信号 d_{mgxi} 叠加各相电压的初始调制信号 d_{mgx} 后，得到第 i 个单元的初始调制信号 d_{mgxi} ，经过 CPS-SPWM 调制，得到控制开关通断的脉冲信号，实现逆变器的输出。整个控制系统的控制原理框图如图 3 所示。

软件流程

HHSCG 控制系统采用分布式控制，中央处理器 (CPU)、现场可编程门阵列 (FPGA) 和多个复杂可编程逻辑器件 (CPLD) 三级控制器各尽其责，各取所长。上述电压内、外环和电流内环的三环控制策略是 HHSCG 的核心算法，其在 FPGA 中实现，软件流程图如图 4 所示。CPU 主流程处

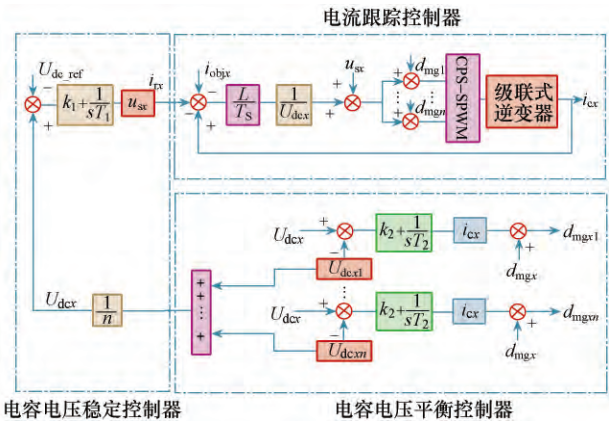


图 3 系统控制原理框图

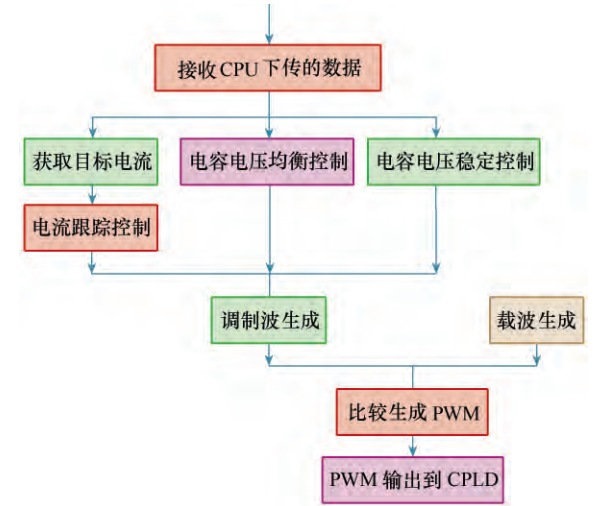


图 4 FPGA 软件流程图

理示意图如图 5 所示。中断处理流程图及 CPLD 软件流程如图 6 所示。

图 4 中，FPGA 以采样率 10 kHz 完成 A-D 采样，以双串口与上层目标电流控制器通信，通过 DP-NET 规约接收电流目标、上送相关状态信息等；通过接收 CPU 下传的控制参数等数据后，实现包括电流跟踪控制、电容电压均衡控制、电容电压稳定控制、载波生成、调制波生成及 PWM 输出，并下传至 CPLD。

图 5 中，CPU 作为中央处理器，完成系统管理、录波和自检等。对于本文中包含的 36 路单元直压等 50 多路波形数据，在装置试验现场很难有满足同时测量如此多通道的示波器测量工具。本文中的试验数据是通过触发 CPU 存储时间长度约为 510 ms 的 comtrade 格式的数据文件，并将其导

入画图软件中得到。FPGA 每 500 μs 触发 CPU 中断，在中断中实现向 FPGA 下达控制命令、从 FPGA 中接收信息等。此外，CPU 还用于开入、开出管理，与其他控制器通信，实现过电压、过电流和短路保护算法，并对欠电压、通信故障等报警，以及提供人性化的人机界面。

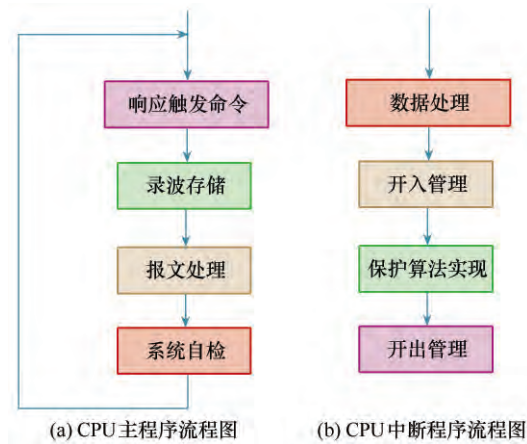


图5 CPU 软件流程图

图 6 中，CPLD 进行直压、温度的数据采集后，与 FPGA 通过四根光纤相互通信，其中包括两根 PWM、一个 TX 和一个 RX，每隔 400 μs 通信一次，其向 FPGA 上传各单元直流电压、功率管温度及故障信息，FPGA 向其下发控制命令。

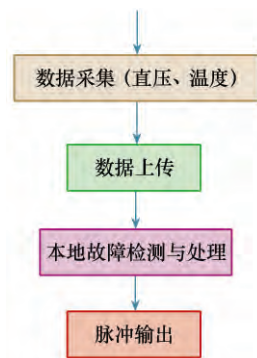


图6 CPLD 软件流程图

系统试验

HHSCG 样机及其控制器在某电厂 35 kV 施工变电站进行了现场试验。系统电压为 220 kV，经降压变压器 220/110/35 kV 及 35/10 kV 后与 HHSCG 相接。HHSCG 装置容量为 10 MV · A，系统及装置的主要电气参数如下表所示。

表 HHSCG 及系统主要参数

220 kV 变压器	90 MV · A，220 kV/110 kV/35 kV，Y/Y
35 kV 变压器	5 MV · A，35 kV/10 kV，Y/Y，7.23%
35 kV 开关 301、302	ZW7 - 40.5/T1600 - 31.5
10 kV 开关 901、902	ZW8 - 12/T600 - 20
HHSCG 级联单元数	12
单元直流电压	额定 900 V $\pm$ 150 V
HHSCG 输出	10 kV (rms)，816 A peak，等效容量 10 MV · A
开关器件	IGBT， $V_{ces} = 1\,700\text{ V}$ ， $I_{cnom} = 1\,000\text{ A}$
开关频率	600 Hz
直流电容器	22 240 μF /组，12 链 $\times$ 3 相 = 36 组
目标电流	22.4 Hz，560 A peak

图 7 ~ 图 11 给出的是 HHSCG 现场试验波形。其中图 7 ~ 图 9 中目标电流峰值恒定为 560 A，频率为 22.4 Hz。图 10、图 11 中，目标电流频率仍为 22.4 Hz，幅值突变 20%，进一步验证 HHSCG 的动态特性。由于级联单元数较多，试验现场不具备同时测量几十个单元直压通道的示波器，以下试验波形通过触发 CPU 存储时间长度约为 510 ms 的 comtrade 格式的数据文件，将其导入 Matlab 中画图，并做了输出电流的频谱分析。

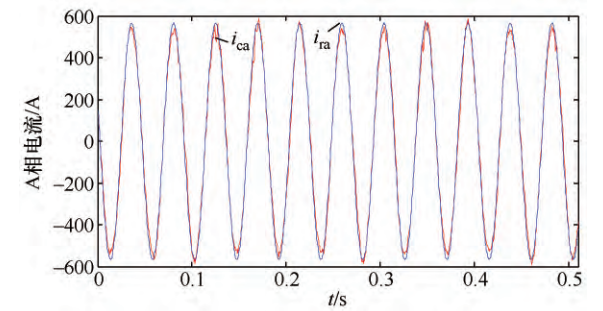


图7 现场试验 A 相目标及输出电流实测结果

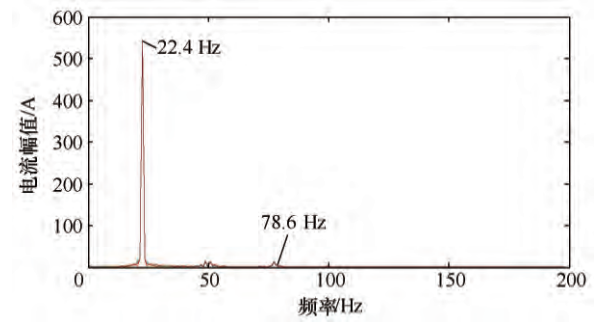


图8 现场试验 A 相输出电流频谱

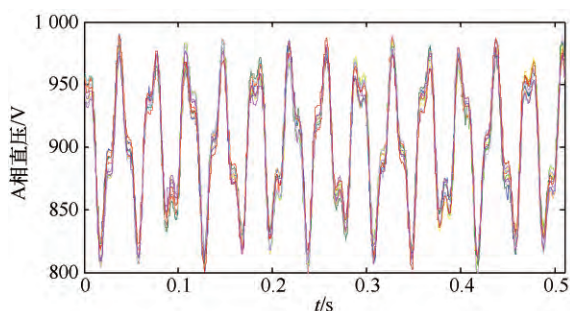


图9 现场试验 A 相各单元直压实测结果

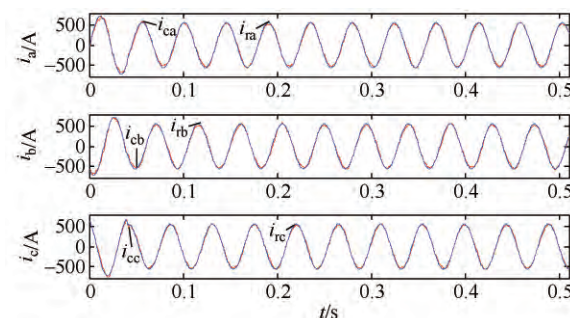


图10 现场试验三相电流实测结果

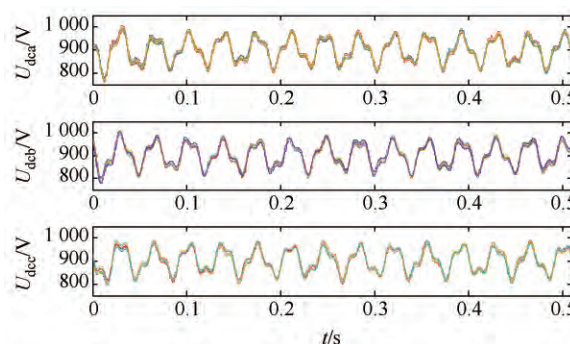


图11 现场试验三相各单元直压实测结果

图7给出了目标次同步电流与HHSCG输出的A相电流的实测波形,输出电流能够较好地跟踪目标电流。图8给出了输出电流的频谱分析,其中频率为22.4 Hz的幅值为551 A,跟踪误差小于2%;频率为78.6 Hz的幅值为5 A,该频率成分含量极少,可忽略;频率为50 Hz的幅值约为11 A,主要实现直流母线电压支撑。

图9中,A相各单元直压最大偏差不超过20 V,偏差量为2.2%,单元直流电压基本保持平衡,装置均压效果良好。图7~图9的试验结果表明,装置硬件结构及参数设计合理,本文所提出的控制策略在保证良好的电流跟踪效果的前提下,基本维持了各个级联H桥之间直流电压的平衡和稳定,稳态特性良好。

为验证装置的动态特性,在40 ms时,目标电流的峰值由760 V突变约20%,至588 V,频率仍为22.4 Hz。三相电流及三相各级单元电容电压分别如图10、图11所示。

图10中,目标电流幅值在40 ms时突变的动态过程中,输出电流能够较好地跟踪目标电流,动态调节时间小于5 ms。图11中三相各单元直流电容电压在幅值突变时,也能保证其稳定、平衡,表明装置具有较好的动态特性。

结束语

利用包括电容电压平衡控制、电容电压稳定控制和电流跟踪控制三部分组成的电压内、外环和电流内环的三环控制策略对级联式H桥逆变器结构的HHSCG的主功率器件进行控制。采用CPU+FPGA+CPLD对HHSCG进行分布式控制,达到在电容电压稳定、平衡的基础上实现对目标次同步电流的快速、准确跟踪的目的。试验证明,HHSCG对次同步电流跟踪误差小于2%,同时各单元直压最大偏差不超过20 V,偏差量为2.2%,单元直流电压基本保持平衡,装置均压效果良好。电流动态调节时间小于5 ms,调节速度快。另外,HHSCG装置的报警、保护功能强大,具有过电压、过电流和短路保护,以及欠电压、通信故障等报警功能。

参考文献

- [1] Chudasama M C, Kulkarni A M. Dynamic phasor analysis of SSR mitigation schemes based on passive phase imbalance [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26 (3): 1668-1676.
- [2] 李志鹏, 谢小荣. 应用静止同步补偿器抑制次同步谐振的模式互补电流控制方法 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (34): 22-27.
- [3] 兰泉妮, 杨波, 戴悦, 等. 次同步谐振分析和控制方法的综述 [J]. 电气应用, 2007, 26 (12): 6-9.
- [4] 黄北军, 王奔, 郭春平, 等. 基于输出反馈控制理论的HVDC附加次同步阻尼控制器 [J]. 电气应用, 2008, 27 (10): 65-67.
- [5] Agrawal B L, Farmer G R. Application of subsynchronous oscillation real-time type SSO [J]. IEEE

- Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100 (5): 2242-2451.
- [6] Xiaorong Xie, Xijiu Guo, Yingduo Han. Mitigation of multimodal SSR using SEDC in the shangdu series - Compensated Power System [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 26 (1): 22-27.
 - [7] 谢小荣, 刘平, 张仁伟, 等. 托克托电厂阻塞滤波器引发机组异步自励磁的分析 [J]. 电网技术, 2012, 36 (4): 79-83.
 - [8] Lai Jih - sheng, Peng Fangzheng. Multilevel converters: a new breed of power converters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32 (3): 509-517.
 - [9] Rostamkolai N, Piwko R J, Larsen E V, et al. Sub-synchronous interactions with static VAR compensators - concepts and practical implications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1990, 5 (4): 1324-1332.
 - [10] Padiyar K R, Prabhu N. Design and performance evaluation of subsynchronous damping controller with STATCOM [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 (3): 1398-1405.
 - [11] 郑翔, 徐政, 屠卿瑞, 等. 静止同步串联补偿器次同步谐振多模式阻尼控制器设计 [J]. 高电压技术, 2011, 37 (9): 2321-2327.
 - [12] 清华大学. 有效抑制次同步谐振和次同步振荡的次同步阻尼控制系统: 中国, 200910090158. 1 [P]. 2009-12-30.
 - [13] 王庚, 李永东, 游小杰. 级联式并联有源电力滤波器的控制 [J]. 电工电能新技术, 2004, 23 (4): 51-55.

(收稿日期: 2014-01-05) EA

信息动态

长城汽车生产线上再添 600 台 ABB 机器人

全球领先的电力和自动化技术集团 ABB 宣布, 将向长城汽车股份有限公司 (以下简称“长城汽车”) 提供 600 余台工业机器人, 用于长城汽车位于河北徐水基地二期新厂的新型 SUV 白车身焊装车间。这是多年来长城汽车与 ABB 签署的又一机器人采购订单, 彰显了双方持久稳固的合作伙伴关系。

车身焊接是直接影响车身安全性和整体性能的重要环节。根据协议, ABB 将向长城汽车提供包括 IRB 6640、IRB 7600 和 IRB 2600 等多种型号的工业机器人产品, 装配高效可靠、高度自动化的焊装生产线。同时, 长城汽车还在分焊线上与 ABB 白车身业务合作, 采用 ABB 机器人焊接解决方案, 大幅提高焊接生产线的自动化水平和柔性化程度。

其中, 供货数量最多的 IRB 6640 是 ABB 提供的一款大型机器人产品, 有效载荷达 235 kg, 通过配备长度不等的手臂可以满足重型工件搬运、上下料和点焊等各种作业要求, 能够帮助长城汽车设计年产量达 25 万台的保定二期新厂实现持续、高效和高品质的汽车制造。

长城汽车自动化事业部李建和表示 “一直以来, 长城汽车不断提高自动化程度和生产工艺水平来提升生产能力和品质保障水平, 铸造中国自主品牌汽车品质。ABB 优秀的机器人及分焊线解决方案能很好地满足长城汽车对智能制造和高效生产的要求, 同时双方还在策划更深入

的、有创意的合作模式, 这也成为双方保持多年良好合作关系的原因。”

长城汽车是中国最大的 SUV 和皮卡制造企业。2006 年, 长城汽车与 ABB 开展首次合作, 成为与 ABB 机器人合作的第一家自主品牌车厂。截止目前, ABB 机器人已成功应用于长城汽车位于天津和徐水等生产基地的冲压、焊装、喷涂、总装车间及长城汽车零部件工厂, 支持长城汽车的轿车和哈弗系列 SUV 车型的高效生产。



ABB 机器人业务单元中国区负责人李刚表示 “非常荣幸与长城汽车再度携手, 通过 ABB 领先的机器人技术帮助客户提高整车生产线自动化水平和汽车制造实力。未来, ABB 将继续致力于提供机器人及智能技术解决方案, 帮助企业在产业升级中摆脱能源、人力、场地以及资金方面的约束, 共同实现智慧跨越。”