

基于 DSP 的高水头冲击水轮发电机组交流励磁控制系统研制

刘伟¹, 贺晓蓉², 贺娟², 熊文², 李钊²

(1. 重庆大学自动化学院, 重庆 400044; 2. 重庆理工大学电子信息与自动化学院, 重庆 400050)

摘要: 在国内首次对高水头冲击水轮发电机组的变速恒频运行、最大效率追踪等问题进行系统分析和研究。针对被控对象多变量、强耦合特点, 提出了变结构、变参数协调控制策略, 实现了交流励磁控制与液压调速器的最优动态匹配。采用双 PWM 变换器结构, 构建了一套基于 TMS320F2812 的高可靠、低成本交流励磁与调速协调控制系统, 通过实验分析表明, 该控制系统提高了电网稳定性, 实现了高水头冲击水轮发电机的最大效率追踪。

关键词: 变速恒频; 交流励磁控制; 数字信号处理器; 高水头冲击水轮发电机组

Development of excitation control system of high water-head pelton turbine based on DSP

LIU Wei¹, HE Xiao-rong², HE Juan², XIONG Wen², LI Zhao²

(1. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. College of Electronic Information & Automation, Chongqing University of Technology, Chongqing 400050, China)

Abstract: This paper for the first time in China analyses and researches the VSCF, maximum efficiency tracking, etc of high water-head pelton turbine. In order to cope with the multivariate nature and strong coupling of the controlled device, it put forwards a coordination control scheme with variable structure and variable parameter, fulfils the optimal dynamic matching of the AC excitation control system and the hydrodynamic governor. It adopts the back-to-back PWM converters and builds the AC excited and speed coordinated control system on the basis of TMS320F2812. The system is fairly reliable and lowcost. Experimental analysis proves that this system strengthens the security and stability of grid, and at the same time achieves the maximum efficiency tracking.

Key words: variable speed constant frequency (VSCF); AC excitation control system; DSP; high water-head pelton turbine

中图分类号: TM312 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)20-0183-06

0 引言

冲击式水轮机的效率研究表明: 高水头冲击水轮机最优效率所对应的最优转速范围很窄, 转速是影响效率的重要因素。因此, 应采用变速恒频运行措施来提高机组性能, 它可使水轮发电机组一直处于最优工况运行, 加权平均效率提高 2%~5%, 并减少水轮机转轮空蚀和磨损, 大大延长机组的检修周期和寿命。

本文研制了基于 32 位 DSP 的高水头冲击水轮发电机组交流励磁控制系统, 在国内首次对高水头冲击水轮发电机组的变速恒频运行、最大效率追踪等问题进行系统分析和研究。并开发了高可靠、高性能、低成本交流励磁与调速协调控制系统, 提出了空载运行控制策略和发电运行协调控制策略, 提

高了电网稳定性, 实现了高水头冲击水轮发电机的最大效率追踪。

1 系统总体结构和工作原理

交流励磁变速恒频冲击水轮发电机组主要由冲击式水轮机、双馈型异步发电机、液压调速器、交流励磁主回路、交流励磁与调速器协调控制系统组成, 总体结构如图 1 所示。

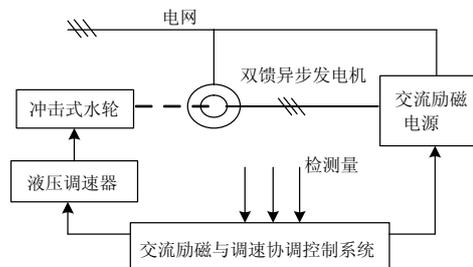


图 1 交流励磁变速恒频发电机组总体结构
Fig.1 Structure of AC excited VSCF generator

基金项目: 重庆市科技攻关计划项目 (2007AC3033); 重庆理工大学青年科学基金项目 (2008ZQ02)

并网发电机组多工况运行（如空载运行和并网运行等），控制系统具有多变量、多回路、多目标等特点，且被控参量非线性、强耦合。为了获得良好的控制品质，笔者提出了变结构、变参数协调控制思想，即设计协调控制模块，建立协调控制机制。

在协调控制模块管理下实现空载运行控制和并网发电控制的动态切换、交流励磁控制和转速控制的动态匹配。并网运行时交流励磁与液压调速协调控制系统原理如图 2 所示。

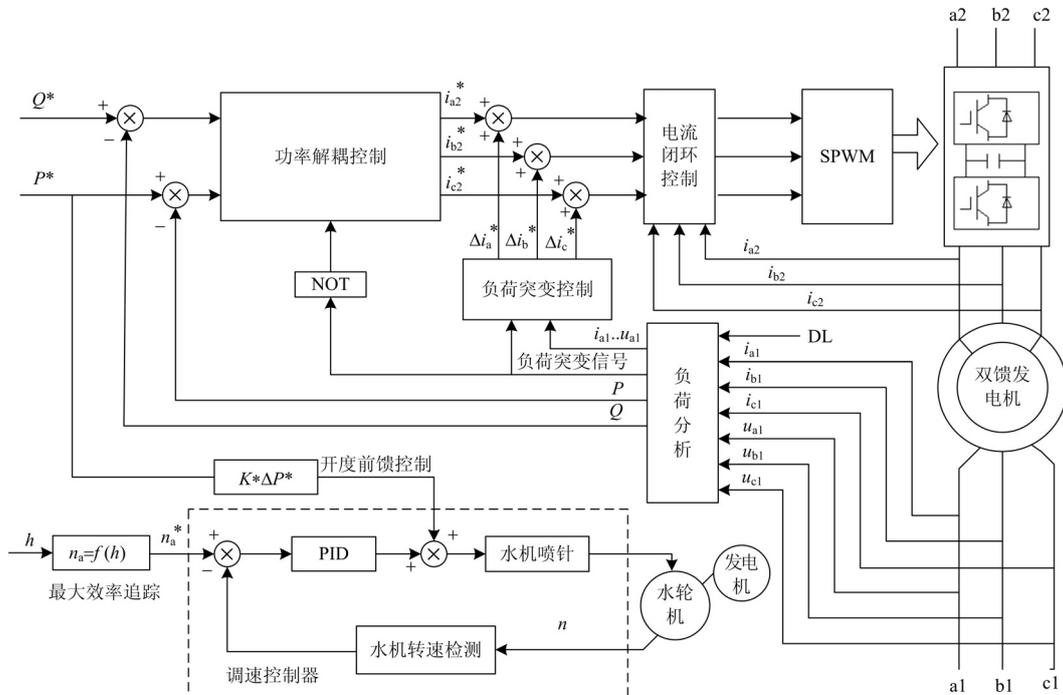


图 2 交流励磁与调速协调控制原理框图

Fig.2 Functional block diagram of the AC excited and speed coordinated control system

空载运行是为并网运行做准备的。此时，空载控制程序根据水头和最优转速模型计算最优转速 n_a ，其速度调节回路按转速指令控制调速器，粗调水轮机转速至 n_a ，完成最优转速开机。系统投励操作信号发出后，其电压调节回路检测水机转速，调节交流励磁电流的幅值、频率和相位，使之满足： $f_m + f_e = f_z$ ， $u_t = u_n$ ， $\theta_t = \theta_n$ ，以等待并网。式中： f_m 代表水轮机频率； f_e 代表交流励磁电流频率； f_z 代表电网同步频率； u_t 代表机端电压有效值； u_n 代表电网电压有效值； θ_t 代表机端电压相位角； θ_n 代表电网电压相位角。

并网运行以提高电网稳定性为首要目标，主要完成功率调节和最大效率追踪，交流励磁与液压调速采用协调控制，协调控制系统包含功率解耦调节、速度调节、负荷突变控制和水机喷针开度前馈控制等四个部分，电网负荷变化和水头变化是主要扰动因素。中小机组的输出功率给定一般都是由电网调度来分配，功率调节回路按功率需求指令调节。和同步发电机的调速器调节有功输出、直流励磁系统调节无功输出的控制方法相比较，交流励磁异步发

电机组的优点是交流励磁控制系统可以实现有功、无功的独立控制。若功率需求变化时，有功和无功调节回路调节励磁电流，跟随电功率需求变化；喷针开度前馈控制预调水机出力以减小速度波动；速度调节回路缓慢调节水机喷针开度以调节机械出力，平衡电功率变化，抑制水轮机转速波动。若水头变化，控制系统计算最优转速，速度调节回路按新的转速指令控制转速，实现最大效率追踪。同时，功率调节回路检测水机转速，快速调节交流励磁电流幅值与频率，以使输出功率无波动。得益于交流励磁与液压调速的动态协调控制，功率调节快而精，提高了电力系统稳定性；速度调节慢而粗，减少了机组喷针抽动，降低了速度控制难度，实现了最大效率追踪控制^[1-6]。

2 交流励磁与液压调速协调控制策略

协调控制模块实时监测发电机组状态，按协调机制调用控制策略、调整控制结构、重配控制参数。协调控制系统总体结构框图如图 3 所示^[7-9]。

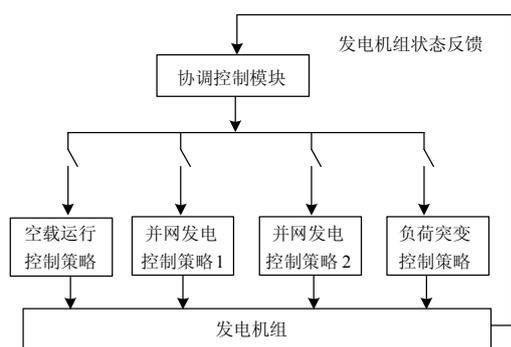


图3 协调控制系统总体结构框图

Fig.3 Structure block diagram of speed coordinated control system

2.1 空载运行控制策略

空载运行时，发电机组为并网发电做准备。空载运行控制策略由电压调节回路和速度调节回路组成。速度调节回路按最优转速指令调节水轮机的喷针开度，实现最优转速开机、多转速并网。系统投励操作指令发出后，电压调节回路跟踪电网电压向量、检测水机转速、快速精确地调节励磁电流幅值、频率和相位，从而调节发电机机端电压向量以满足并网条件。具体调节步骤如下：

(1) 根据水头数据和最优转速模型计算最优转速 n_a ；

(2) 将 n_a 作为速度调节回路的转速指令，速度调节器调节水轮机喷针开度，将水轮机转速稳定在最优转速；

(3) 操作指令发出后，其电压调节回路以电网电压为参考量，检测水机转速、调节励磁电流的频率、幅值和相位，使发电机机端电压满足并网条件；

(4) 接并网指令后，操作并网断路器合闸并网。

2.2 并网发电控制策略 1

并网发电时，调节输出电功率满足负荷快速变化、提高系统稳定性是协调控制系统的核心任务。当 $DL=1$ 时，即并网油开关合闸，协调控制模块调用并网发电控制策略 1。控制策略 1 由功率解耦控制、速度闭环控制和开度前馈控制组成。当功率需求变化时，有功功率调节回路和无功功率调节回路以功率指令为给定值，快速、精确地独立调节有功和无功励磁电流分量，使输出电功率快速跟随有功和无功变化；开度前馈控制根据有功变化量，在机组转速尚未变化时预调喷针开度以减小转速波动；输出电机功率的变化将破坏电功率和机械功率的平衡，机组转速缓慢变化，这时速度调节回路作用，

调节水轮机喷针开度，重新恢复发电机与水轮机功率的平衡，保持机组转速恒定。

当工作水头发生变化时，控制任务是实现最大效率追踪。按最优转速模型计算最优转速指令，最优转速指令变化时，速度调节回路起作用，调节水轮机喷针开度以满足新的转速指令。速度调节过程中，转速变化将对功率调节产生扰动。要维持电机输出功率恒定不变，功率调节回路也同时起作用，检测水机转速，调节励磁电流频率。因为机组转速变化缓慢，电功率调节响应迅速，因此可通过提高功率调节回路的抗速度扰动能力来获得良好的控制品质，不设功率前馈控制。

2.3 并网发电控制策略 2

当 $DL=1$ ，且功率需求和工作水头同时变化时，协调控制模块调用并网发电控制策略 2。控制策略 2 同样由功率解耦控制、转速闭环控制和开度前馈控制组成，不同之处在于三种控制遵循严格的时序，即先启动功率控制以保证电网稳定，待调节过程基本稳定后再启动最大效率追踪。协调控制模块首先将功率指令下发给功率调节回路，功率调节回路快速、精确地独立调节有功和无功励磁电流分量，使输出电功率满足电网需求变化；前馈控制在机组转速尚未变化时预调喷针开度以减小转速波动。功率调节基本稳定后，电机功率的变化势必打破电功率和水轮机出力的平衡，引起机组转速缓慢变化，这时启动最大效率追踪控制：计算最优转速指令，投入速度控制回路以调节水轮机喷针开度，从而平衡发电机与水轮机功率，调节并稳定转速。

2.4 负荷突变控制策略

当 $DL=1$ 时，为了快速抑制负荷突变或电网故障所引起的频率和电压波动，协调控制模块检测电网电压的幅值变化 Δu 和频率变化 Δf 。当变化大于死区时，调用负荷突变控制策略，投入有功、无功校正环节，即在转子励磁电流给定环节叠加有功、无功校正分量 $\Delta i_{t2}^* = f(\Delta f)$ 和 $\Delta i_{m2}^* = f(\Delta u)$ 。

3 交流励磁控制系统硬件实现

交流励磁控制系统硬件平台由微处理器模块、传感器模块、信号调理模块、信号隔离、驱动模块、双 PWM 主回路等组成。全数字化交流励磁控制系统结构框图如图 4 所示。由于系统检测参量多、变化快、数据处理量大，且对控制系统实时性要求高，故选用 TMS320F2812 作为主控器^[10-11]。

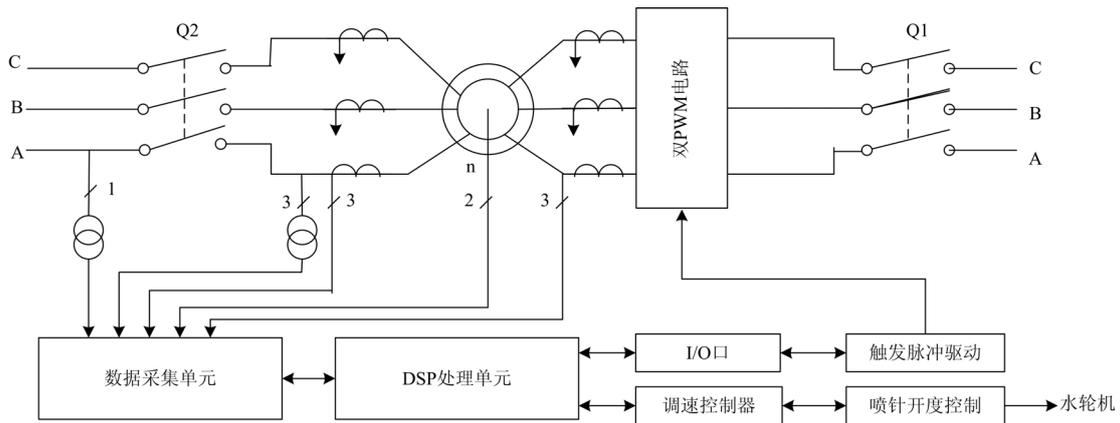


图 4 数字化交流励磁控制系统结构框图

Fig.4 Structure block diagram of digital AC excited control system

4 交流励磁控制系统软件实现

控制系统软件主程序流程，如图 5 所示。

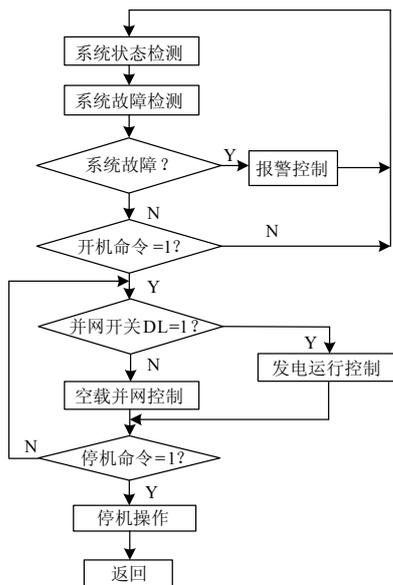


图5 控制系统软件主程序流程图

Fig.5 Flow chart of the main program for the control system software

系统状态检测模块主要用于检测开机命令、停机命令、并网断路器状态、功率给定等信号。系统故障检测模块主要用于微机控制系统自检和检测锁定、复归、油压、温度等开机准备信号是否正常。若系统检测无故障且开机命令发出，控制系统调用空载运行控制策略，开机并进入空载运行，等待并网操作。开机顺序是先打开水轮机喷针至空载开度，在速度控制回路作用下，将机组转速稳定在最优转速；然后交流励磁控制投入，实施机端电压闭环控

制，调节励磁电流幅值、频率和相位，跟踪电网电压向量以达到并网条件。

进入空载运行后若并网断路器合闸，即 $DL=1$ ，系统自动转入发电运行。在发电运行控制策略作用下，有功、无功和速度控制回路协调工作，实现有功、无功独立控制和最大效率跟踪；若断路器再次分闸，即 $DL=0$ ，系统解列后回到空载运行。在空载运行或发电运行状态，若机组接到停机命令，则进入停机操作：关闭喷针开度，切除交流励磁，同时反向冲水制动，等待机组转速为零后锁定。

空载并网控制程序由定子电压检测、转子电流检测、状态检测、空载运行交流励磁控制、SPWM 控制、速度控制、并网操作、停机控制等子程序组成。

发电运行控制程序由定子电流电压检测、转子电流检测、运行状态检测、交流励磁与液压调速器协调控制、SPWM 控制、解列操作、停机控制等子程序组成。

5 实验结果与分析

实验装置由直流电动机、交流异步发电机、直流可控电源、双 PWM 主回路、励磁与调速协调控制系统、同期并网装置等组成。直流电动机及直流可控电源模拟水轮机作原动机，功率为 3.3 kW，采用调压调速方式；交流绕线电机模拟双馈异步发电机，功率 2.2 kW，4 极，额定转速 1 500 rpm，直流拖动电机和交流异步发电机直轴连接；双 PWM 主回路向交流异步电机转子绕组提供变频励磁电源，直流可控电源向直流电动机提供电源；励磁与调速协调控制系统检测状态量、输出控制量，协调控制发电机功率和直流电动机转速；同期并网装置用于

并网操作, 电网电压 380 V。

5.1 空载并网控制实验

实验波形及数据如图 6 所示。实验结论: 1) 经计算, 并网时间 0.20~0.25 s; 跟网调节时间<0.1 s;

该实验条件下冲击电流<5 A, 并迅速衰减。2) 空载并网控制策略使机端电压快速跟踪电网电压, 并网时间短, 冲击电流小。3) 交流变频范围 $\geq \pm 15.00$ Hz, 机组能在宽转速范围内快速小扰动并网。

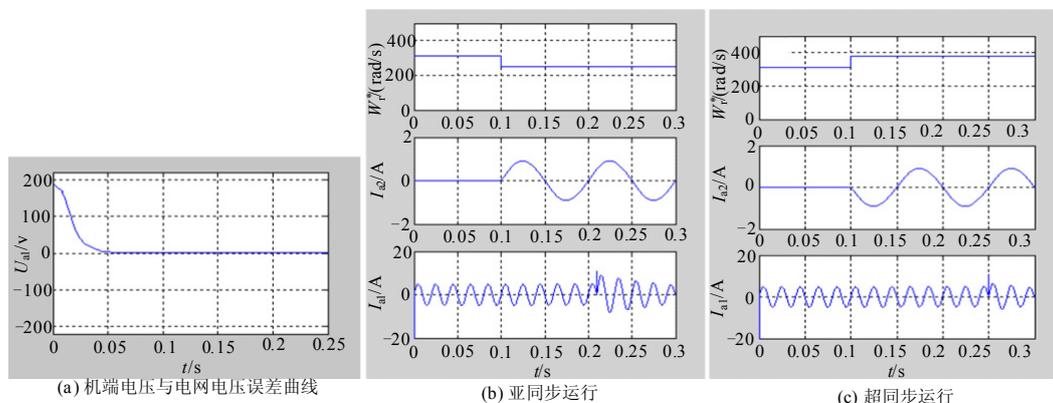


图 6 空载并网控制实验

Fig.6 No-load grid-connection control experiment

5.2 最大效率追踪实验

实验波形及数据如图 7 所示。实验结论: 1) 最优转速算法能实时计算最优转速, 计算精度高; 最优转速变化 $\pm 20\%$, 水头变化范围可达 $\pm 44\%$ 。2) 速度控制回路按最优转速指令调节, 将转速稳定在最优转速; 转速响应慢而稳、有效克服了机组抽动。3) 交流励磁与调速器的协调控制, 使最大效率追踪过程中的转速变化不影响有功、无功输出。调节过程中有功波动小, 无功无波动, 稳定后有功、无功不变。

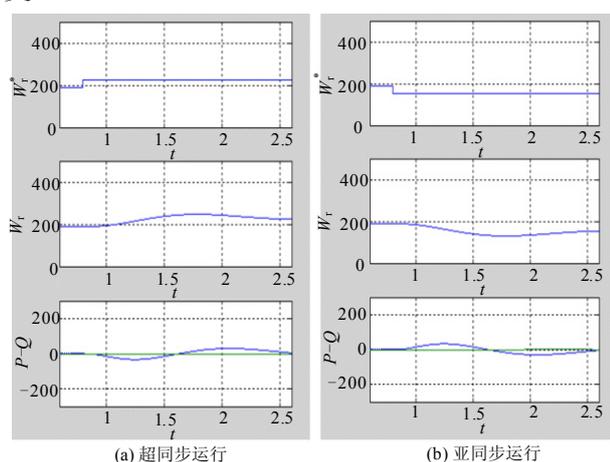


图 7 最大效率追踪实验

Fig.7 Maximum efficiency tracking experiment

6 结论

运用交流励磁技术与高水头冲击式水轮发电机组结合能更充分有效地利用水力资源, 从环境保护、

节约能源等方面体现出巨大的社会效益。本文以 32 位 DSP 为控制器, 开发了能实现最优动态匹配重构容错控制的高可靠、低成本交流励磁与调速协调控制系统。课题研究成果不仅可以用于水力发电机组, 同时也能在风力发电机组上加以推广应用。高水头冲击水轮发电机组的最大效率追踪以及相关的交流励磁控制技术的研究成果, 具有一定的学术应用价值和较大的推广应用前景。

参考文献

- [1] Pena R, Clare J C, Asher G M. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation[J]. IEEE Proceedings on Electric Power Application, 1996, 143 (3): 231-241.
- [2] Tang Y, Xu L. A flexible active and reactive power control strategy for a variable speed constant frequency generating system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1996, 10 (4): 472-478.
- [3] 李晶, 等. 大型变速恒频风力发电机组建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (6): 100-105.
LI Jing, et al. Modeling and dynamic simulation of variable speed wind turbine with large capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (6): 100-105.
- [4] 吴国祥, 等. 变速恒频双馈风力发电运行综合控制策略[J]. 电机与控制学报, 2008 (4): 435-440.
WU Guo-xiang, et al. A synthetic control strategy for DFIG wind power generation[J]. Electric Machines and Control, 2008 (4): 435-440.

- [5] 贺益康, 等. 交流励磁变速恒频风电系统运行研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (7): 55-59, 68.
HE Yi-kang, et al. Investigation on an AC excited variable-speed constant-frequency wind-power generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (7): 55-59, 68.
- [6] 廖勇, 杨顺昌. 交流励磁发电机励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18 (12): 87-90.
LIAO Yong, YANG Shun-chang. The excitation control of alternation current excited generator[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18 (2): 87-90.
- [7] 辜承林, 韦忠朝, 等. 对转子交流励磁电流实行矢量控制的变速恒频发电机[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (12): 119-124.
GU Cheng-lin, WEI Zhong-zhao, et al. VSCF generator with vector control for rotor AC exciting current[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (12): 119-124.
- [8] 卞松江, 吕晓美, 等. 交流励磁变速恒频风力发电系统控制策略的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (16): 57-62.
BIAN Song-jiang, Lü Xiao-mei, et al. Modeling and simulation of Ac excited VSCF in wind power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (16): 57-62.
- [9] 刘其辉, 贺益康, 卞松江. 变速恒频风力发电机空载并网控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (3): 7-12.
LIU Qi-hui, HE Yi-kang, BIAN Song-jiang. Study on the no-load cutting in control of the variable-speed constant-frequency (VSCF) in power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (3): 7-12.
- [10] 刘和平. DSP 原理及电机控制应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- [11] 陈栋, 等. 一种基于 DSP 的交流电机矢量控制系统[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003 (6): 19-21, 36.
CHEN Dong, et al. A vector control system of AC induction motor based on DSP[J]. Proceedings of the EPSA, 2003 (6): 19-21, 36.

收稿日期: 2009-10-31; 修回日期: 2009-12-27

作者简介:

刘伟 (1964-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: liuwei@cqut.edu.cn

贺晓蓉 (1973-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为电机及其自动控制;

贺娟 (1980-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为控制理论与控制工程。

(上接第 182 页 continued from page 182)

- [6] 王松, 宣晓华, 周华. 基于 IEC61850 变电站自动化系统的系统组态研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (3): 48-50, 104.
WANG Song, XUAN Xiao-hua, ZHOU Hua. Research of system configuration process based on IEC61850 substation automation system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (3): 48-50, 104.
- [7] 王文龙, 张兆广, 季友军, 等. 嵌入式继电保护信息系统子站[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (13): 29-31.
WANG Wen-long, ZHANG Zhao-guang, LI You-jun, et al. Reserach on some important matters of sub station in relay information management system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (13): 29-31.
- [8] 文永亮, 孟文, 王艳秋, 等. 基于 MySQL 5 的 SCADA

海量数据的存储方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (12): 76-78, 105.

WEN Yong-liang, MENG Wen, WANG Yan-qiu, et al. A study of the method to store the SCADA's data of great number based on MySQL5[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (12): 76-78, 105.

收稿日期: 2009-11-04; 修回日期: 2010-04-08

作者简介:

陈泽青 (1978-), 女, 本科, 工程师, 主要研究方向为继电保护故障信息系统; E-mail: zeqing2000@tom.com

吴广宁 (1969-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为局部放电检测, 大型电力设备在线检测及故障诊断;

李延 (1965-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为变电站自动化系统、继电保护故障信息系统。