

新型并网逆变器控制策略比较和数字实现

郭小强 邬伟扬 赵清林

(燕山大学电气工程学院 秦皇岛 066004)

摘要 介绍两种新型 PR (P+Resonant) 控制策略, 实现了并网逆变器输出电流的零稳态误差。通过理论分析对采用更实用的低通式和带通式准 PR 控制器性能进行了比较研究, 并将数字信号处理中 IIR 数字滤波器的理论应用到控制器的离散化中, 实现了控制器性能的优化。仿真分析证明带通式准 PR 控制策略具有更好的动态性能和抗电网电压干扰能力。1kW 实验样机上的实验结果验证了理论和仿真分析的正确性。

关键词: 并网逆变器 PR 控制 零稳态误差 数字实现

中图分类号: TM615

Comparative Analysis and Digital Implementation of Novel Control Strategies for Grid-Connected Inverters

Guo Xiaoqiang Wu Weiyang Zhao Qinglin

(Yanshan University Qinhuangdao 066004 China)

Abstract Two novel P+resonant control strategies for grid-connected inverters are presented in the paper, which can achieve zero steady-state error of output current. A more practical low pass mode and a band pass mode quasi-PR controller are used, and their performances are compared based on theoretical analysis. Infinit impulse reponse (IIR) digital filter theory in digital signal processor is introduced to the digital implementation of controllers so as to optimize the performance of controllers. Simulation results demonstrate that band pass mode quasi-PR controller has higher performance in dynamic response and grid voltage disturbance rejection. Experimental results of a 1kW experimental prototype verify the validity of the theoretical and simulation analysis.

Keywords: Grid-connected inverter, PR control, zero steady-state error, digital implementation

1 引言

近年来, 风能、太阳能等可再生能源并网发电技术成为研究热点。并网逆变器作为可再生能源发电系统和电网的接口设备, 起着重要的作用。其控制目标是实现正弦电流输出和相位控制, 使逆变器工作在单位功率因数并网模式或无功补偿模式^[1]。常见的电流控制方法有 PI 控制等^[2]。PI 控制易于实现、可靠性高, 但其对正弦参考量却难以消除稳态误差^[3]。为了解决该问题, 本文采用 PR 控制实现了正弦电流控制的零稳态误差^[3]。首先分析了并网逆变器的基本原理, 然后对两种 PR 控制器的性能进

行了理论分析和比较, 在此基础上采用更实用的准 PR 控制器, 并借鉴数字信号处理中 IIR 数字滤波器理论, 采用 delta 算子对控制器的性能进行了优化, 最后, 仿真和实验结果验证了理论分析的正确性。

2 并网逆变器基本原理

2.1 系统结构

并网逆变器原理图如图 1 所示, 系统直流侧电压由再生能源发电设备提供。本文采用 400V 直流稳压电源模拟再生能源设备。逆变桥输出经过电感 L 和并网开关 S 连接到电网上。逆变器正常工作在单位功率因数并网模式, 并网输出电流是与电网电压同频同相的正弦波^[4]。

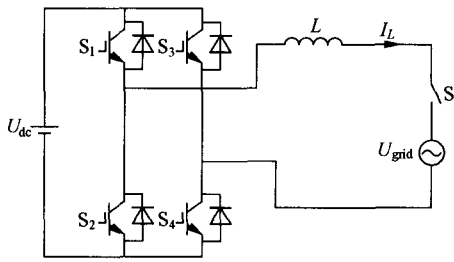


图1 并网逆变器原理图

Fig.1 Schematic diagram of grid-connected inverter

2.2 系统模型

系统控制结构如图2所示。由于开关频率(20kHz)远远高于电网频率,因此,为了便于分析忽略开关动作对系统的影响,将PWM逆变单元近似为一增益环节K。图2中, G(s)为系统控制器传递函数, R为电感L的串联等效电阻, Ugrid为电网电压, Iref是与电网电压同频同相的并网电流参考信号。

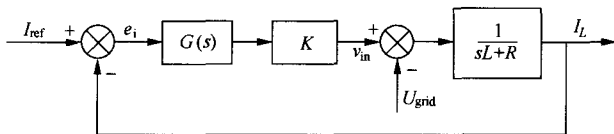


图2 并网逆变器系统模型

Fig.2 Model of grid-connected inverter system

根据系统模型可以推出并网逆变器输出电流的传递函数为

$$I_L = \frac{KG(s)}{sL+R+KG(s)} I_{ref} - \frac{1}{sL+R+KG(s)} U_{grid} \quad (1)$$

由上式可知,并网逆变器输出电流与参考电流和电网电压有关。

3 控制策略比较和数字实现

3.1 控制器性能比较

PI控制器传递函数为

$$G_{PI}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} \quad (2)$$

两种新型PR控制器传递函数分别为^[5-6]

$$G_1(s) = K_P + \frac{K_R \omega_0^2}{s^2 + \omega_0^2} \quad (3)$$

$$G_2(s) = K_P + \frac{2K_R s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (4)$$

对于PI控制,基波频率 ω_0 处控制器的幅频特性

$A(\omega_0) = \sqrt{K_P^2 + (\frac{K_I}{\omega_0})^2}$ 是有限的,因此式(1)的

第一项可写成 ϵI_{ref} ($\epsilon = \frac{1}{1 + \frac{sL+R}{KG(s)}}$, $0 < |\epsilon| < 1$), 即

输出电流小于参考电流,系统存在稳态误差;同理,第二项不为0,即输出电流受电网电压影响。而对于两种新型的PR控制,在基波频率 ω_0 处的幅频特性分别为 $K_P + \frac{K_R \omega_0^2}{-\omega_0^2 + \omega_0^2}$ 和 $\sqrt{K_P^2 + (\frac{2K_R \omega_0}{-\omega_0^2 + \omega_0^2})^2}$,

均趋于无穷大,因此,式(1)的第一项基本等于 I_{ref} ;同理,第二项趋于0,此时,有 $I_L = I_{ref}$,因此两种PR控制均可以实现零稳态误差和抗电网电压干扰。

在实际系统中,PR控制器的实现存在两个主要问题:①由于模拟系统元器件参数精度和数字系统精度的限制,PR控制器不易实现;②PR控制器在非基频处增益非常小,当电网频率偏移时,不能有效地抑制电网引起的谐波。因此,本文采用两种准PR谐振控制器,既可以保持PR控制器的高增益,还可以减小电网频率偏移对逆变器输出电流的影响。

低通式准PR控制器传递函数为

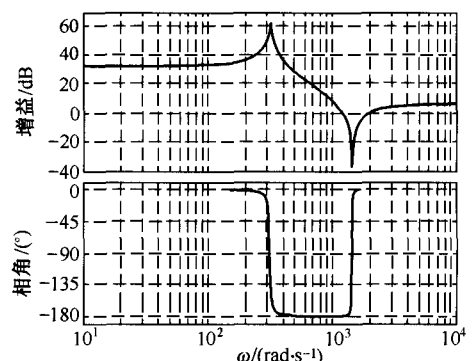
$$G_3(s) = K_P + \frac{K_R \omega_0^2}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (5)$$

带通式准PR控制器传递函数为

$$G_4(s) = K_P + \frac{2K_R \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (6)$$

为了比较两种准PR控制器的性能,选择控制器的设计参数为 $G_3(s)$: $K_P=2, K_R=40, \omega_c=5, \omega_0=314$; $G_4(s)$: $K_P=2, K_R=1000, \omega_c=5, \omega_0=314$ 。

控制器波特图如图3所示。由图3可知,两控制器在基波频率处幅频特性 $A(\omega_0)=60\text{dB}$,基本可以实现零稳态误差。比较两控制器的相频特性可知, $G_3(s)$ 的相角裕度为 1.55° 而 $G_4(s)$ 的相角裕度为无穷大,因此可以得出结论:与 $G_3(s)$ 相比, $G_4(s)$ 具有更大的稳定裕度和更好的暂态性能。



(a) G3波特图

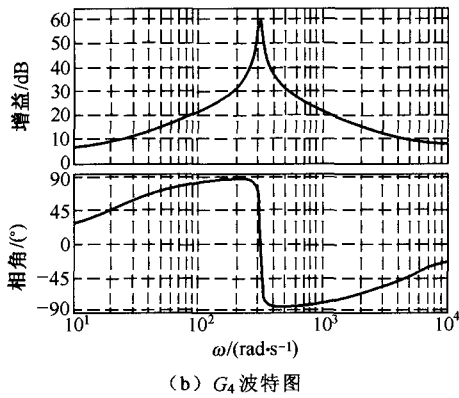


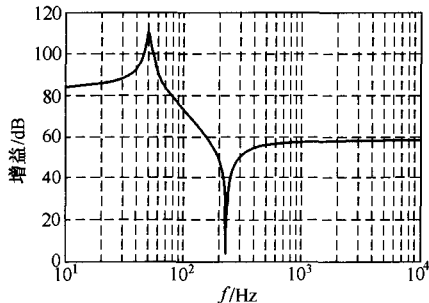
图 3 准 PR 控制器波特图

Fig.3 Bode diagram of the quasi-PR controllers

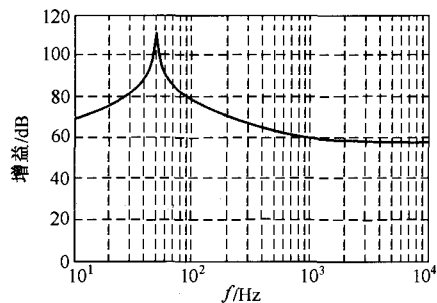
为了研究控制器的抗扰性能，定义谐波阻抗为电网电压谐波与引起的输出谐波电流之比。谐波阻抗越大，引起的输出谐波电流越小，系统的抗扰性能越好。由图 2 可得系统谐波阻抗为

$$Z = \frac{U_{grid}}{I_L} = sL + R + KG(s) \quad (7)$$

系统谐波阻抗如图 4 所示。由图 4 可知，在基波频率 50Hz 处，两控制器下系统具有极高的谐波阻抗，均大于 110dB，因此，电网电压基波不会对并网逆变器输出电流产生影响。在 100~1000Hz 之间，控制器 $G_4(s)$ 下系统的谐波阻抗明显高于 $G_3(s)$ 下系统的谐波阻抗，而电网电压谐波主要以低次谐波为主，因此可知控制器 $G_4(s)$ 比 $G_3(s)$ 具有更好的抗电网电压干扰性能。



(a) $G_3(s)$ 下系统谐波阻抗



(b) $G_4(s)$ 下系统谐波阻抗

图 4 谐波阻抗

Fig.4 Harmonic impedance

根据图 2，可得到系统的特征方程

$$sL + R + KG(s) = 0 \quad (8)$$

系统闭环极点如图 5 所示。为了便于分析，系统根轨迹中忽略非主导极点。由图 5 可见，两准 PR 控制器下系统的闭环极点均位于虚轴左侧，说明系统稳定。但与 $G_3(s)$ 相比， $G_4(s)$ 下系统闭环主导极点距虚轴更远，因此，与上述分析一致， $G_4(s)$ 比 $G_3(s)$ 具有更大的稳定裕度和更好的暂态性能。

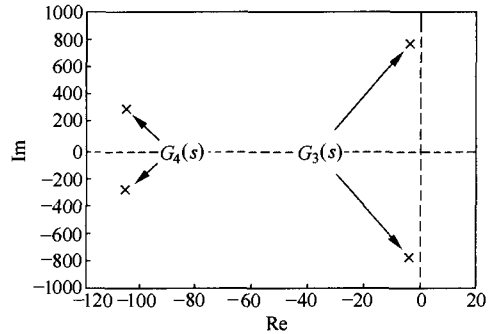


图 5 系统闭环极点

Fig.5 Closed-loop poles of the system

3.2 数字实现

连续域离散化设计通常采用双线性变换^[7]。变换公式为

$$G(z) \Leftrightarrow G(s) \quad s = \frac{2}{T} \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \quad (9)$$

将式 (9) 代入式 (5) 或式 (6)，可以得到控制器离散域传递函数为

$$G(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (10)$$

数字实现框图如图 6 所示。其中， $u(k)$ 为控制器输出， $e(k)$ 为电流误差信号。

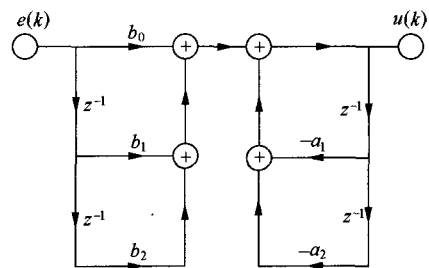


图 6 基于双线性变化的数字实现框图

Fig.6 Digital implementation structure diagram based on bilinear transformation

但是，当采样频率较高时，由于数字信号处理器有限字长的限制和截断误差的影响，系统离散化后的性能可能会严重恶化。为了解决这一问题，本文将数字信号处理中 IIR 的实现原理引入到准 PR

的离散化中^[8],采用 delta 算子进行控制器性能的优化,结构框图如图 7 所示,变换公式为

$$\delta^{-1} = \frac{\Delta z^{-1}}{1-z^{-1}} \quad (11)$$

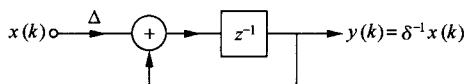


图 7 delta 算子结构框图

Fig.7 Block diagram of delta operator

将式 (10) 和式 (11) 联立并化简, 可得

$$G(\delta) = \frac{\beta_0 + \beta_1 \delta^{-1} + \beta_2 \delta^{-2}}{1 + \alpha_1 \delta^{-1} + \alpha_2 \delta^{-2}} \quad (12)$$

式 (10) 和式 (12) 中系数关系见表 1。

表 1 系数关系

Tab.1 Coefficients relation

β_0	$\beta_0 = b_0$	α_0	$\alpha_0 = 1$
β_1	$\beta_1 = \frac{2b_0 + b_1}{\Delta}$	α_1	$\alpha_1 = \frac{2 + a_1}{\Delta}$
β_2	$\beta_2 = \frac{b_0 + b_1 + b_2}{\Delta^2}$	α_2	$\alpha_2 = \frac{1 + a_1 + a_2}{\Delta^2}$

基于 delta 算子的准 PR 数字实现框图如图 8 所示。

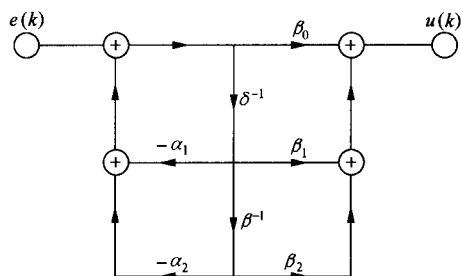


图 8 基于 delta 算子的数字实现框图

Fig.8 Digital implementation structure diagram based on delta operator

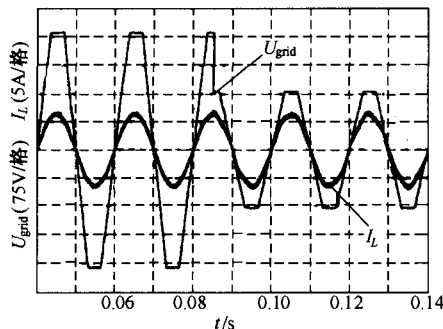
4 仿真与实验结果

采用仿真软件 Matlab 分别对两种新型控制策略进行仿真。仿真结果如图 9 所示。仿真参数如下: 输入电压 400V; 电网电压有效值 220V; 电网电压频率 50Hz; 滤波电感 3mH; 给定正弦电流峰值 6.43A; 电网电压总谐波畸变率 THD 为 4.63%; 谐波中以 5 次谐波和 7 次谐波为主。

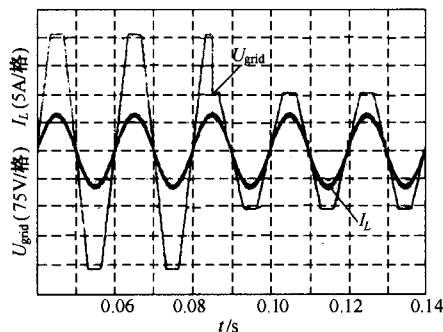
如图 9 所示, 稳态时, 两种控制器下逆变器输出电流峰值均为 6.43A, 说明两种控制器均可实现零稳态误差。图 9d 所示为控制器 $G_3(s)$ 下并网电流的谐波分析, 从图中可以看出, 由于电网电压谐波的影响, 电流的 5 次和 7 次谐波较大, 此时并网电流总谐波畸变率 THD=1.55%。图 9c 所示为控制器 $G_4(s)$ 下并网电流的谐波分析, 由图 9c 可见, 由于

$G_4(s)$ 具有比 $G_3(s)$ 更高的谐波阻抗, 并网电流总谐波畸变率 THD 减小到 0.24%。从仿真结果可以看出, 控制器 $G_4(s)$ 具有更好的抗电网电压谐波干扰能力。

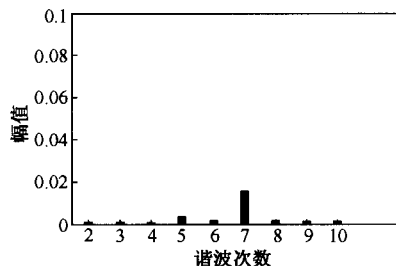
为了比较两种控制器的动态性能, 仿真中模拟电网电压突降的情况。如图 9 所示, 电网电压突变后, 控制器 $G_4(s)$ 下系统很快就恢复到稳态, 而 $G_3(s)$ 下系统瞬态响应较慢, 且并网电流波形发生畸变。仿真结果说明 $G_4(s)$ 具有更好的动态性能。



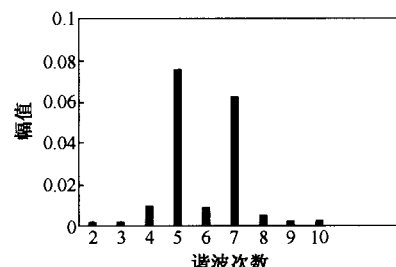
(a) $G_4(s)$ 下的仿真波形



(b) $G_3(s)$ 下的仿真波形



(c) $G_4(s)$ 下并网电流谐波分析 (基波 (50Hz) = 6.43, THD=0.24%)



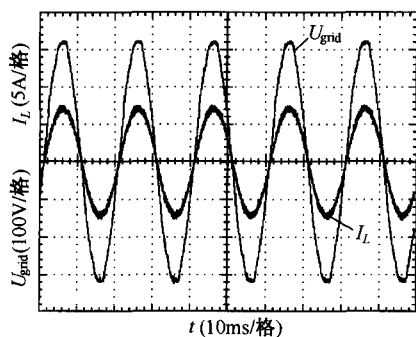
(d) $G_3(s)$ 下并网电流谐波分析 (基波 (50Hz) = 6.43, THD=1.55%)

图 9 并网逆变器仿真结果

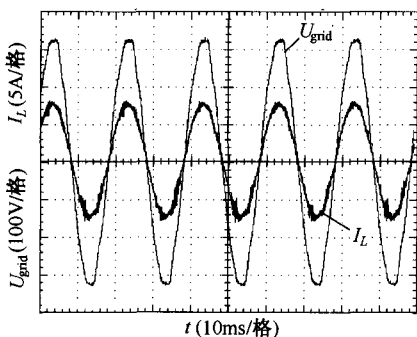
Fig.9 Simulation results of grid-connected inverter

实验样机参数如下：直流输入电压 400V；滤波电感 3mH；参考电流峰值 7A；输出功率 1kW；开关频率 20kHz；采样频率 20kHz。

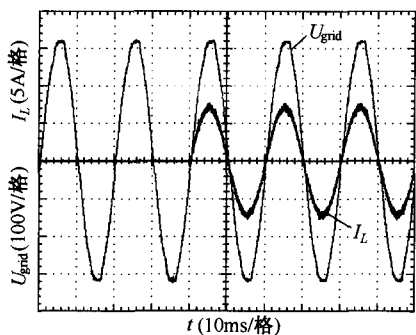
系统数字化控制采用 TMS320LF2407A 定点 DSP 实现。实验结果如图 10 所示。



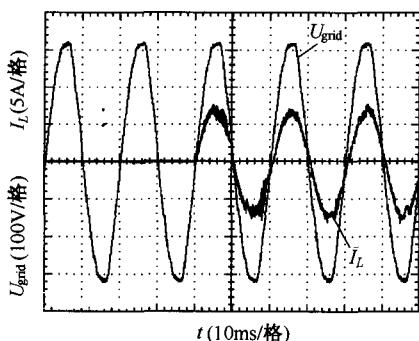
(a) $G_4(s)$ 下的实验波形



(b) $G_3(s)$ 下的实验波形



(c) $G_4(s)$ 下并网启动波形



(d) $G_3(s)$ 下并网启动波形

图 10 并网逆变器实验波形

图 10a、图 10b 分别为两种控制器下并网电流的稳态波形。稳态时，并网功率因数均大于 0.99，且并网电流基波分量误差很小；而由于控制器 $G_4(s)$ 具有比 $G_3(s)$ 更大的谐波阻抗，因此， $G_4(s)$ 抗电网电压谐波干扰能力更强，并网电流 THD 由 $G_3(s)$ 下 2.047% 减小到 1.716%。

图 10c、图 10d 为两种控制器下并网逆变器的启动电流波形。与上文理论分析一致，控制器 $G_3(s)$ 下并网逆变器瞬态性能较差，暂态过渡时间较长，且波形发生畸变；而控制器 $G_4(s)$ 下并网逆变器能够很好地实现从电压过零点启动工作，且并网电流能够很快跟踪指令电流。实验结果表明控制器 $G_4(s)$ 具有更好的动态性能。

5 结论

本文对两种新型的并网逆变器控制策略进行了详细的理论分析和比较研究，并将数字信号处理理论中 IIR 滤波器的优化思想引入到控制器的数字化实现中。仿真结果表明，低通式准 PR 控制器和带通式准 PR 控制器均具有良好的稳态性能，但带通式准 PR 控制器具有更好的抗电网电压谐波干扰能力和动态性能。实验结果验证了理论及仿真分析的正确性。

参考文献

- [1] 汪海宁, 苏建徽, 张国荣, 等. 光伏并网发电及无功补偿的统一控制[J]. 电工技术学报, 2005, 20(9): 114-118.
Wang Haining, Su Jianhui, Zhang Guorong, et al. Unitive control of PV grid connected generatioin and reactive compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(9): 114-118.
- [2] 刁利军, 刘志刚, 郝荣泰, 等. 能量回馈式 PWM 整流器并网的工程设计方法[J]. 电工技术学报, 2005, 20(11): 75-79.
Diao Lijun, Liu Zhigang, Hao Rongtai, et al. Engineering design techniques of energy-fed PWM rectifier connected to AC mains[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(11): 75-79.
- [3] Yuan X, Merk W, Stemmler H, et al. Stationary-frame generalized integrators for current control of active power filters with zero steady-state error for current harmonics of concern under unbalanced and distorted operating conditions[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(2): 523-532.

Fig.10 Experimental waveforms of grid-connected inverter

- [4] 王飞, 余世杰, 苏建徽, 等. 太阳能光伏并网发电系统的研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(5): 72-74.
Wang Fei, Yu Shijie, Su Jianhui, et al. Research on photovoltaic grid-connected power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(5): 72-74.
- [5] Yukihiro Sato, Tomotsugu Ishizuka, Kazuyoshi Nezu, et al. A new control strategy for voltage-type PWM rectifiers to realize zero steady-state control error in input current[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34 (3): 480-486.
- [6] Daniel Nahum Zmood, Donald Grahame Holmes. Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(3): 814-821.
- [7] Groutage F, Volfson L, Schneider A. S-plane to Z-plane mapping using a simultaneous equation algorithm based on the bilinear transformation[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1987, 32(7): 635-637.
- [8] Juha Kauraniemi, Timo I Laakso, Iiro Hartimo, et al. Delta operator realizations of direct-form IIR filters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1998, 45(1): 41-52.

作者简介

郭小强 男, 1979 年生, 博士研究生, 研究方向为电力电子技术应用及可再生能源并网发电技术。

郭伟扬 男, 1940 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为高频功率变换、功率因数校正、牵引电力传动等。

第三届电工技术前沿问题学术论坛征文通知

一、会议主题

1. 新型功率器件和电力电子集成技术
 - (1) SIC 器件和宽禁带器件
 - (2) 高频磁元件和集成磁技术
 - (3) 功率电路封装技术
 - (4) EMI/EMC 技术
 - (5) 标准化、模块化技术
 - (6) 电力电子系统集成理论
2. 电力电子技术在电力系统中的应用
 - (1) 可再生能源与新能源发电技术
 - (2) 分布式电源系统
 - (3) 柔性输电 (包括 HVDC, SVC 和 SVG 等)
 - (4) 超导电力应用
 - (5) 新型储能技术
 - (6) 电能质量及其控制 (包括电能质量标准, 测试技术, 谐波、电压跌落抑制等)
3. 现代交流传动技术
 - (1) 中压变频器及控制技术
 - (2) 永磁电机和多相电机及其控制
 - (3) 电力机车驱动
 - (4) 电动汽车与混合动力汽车
4. 电力电子变换器及控制技术
 - (1) 多电平技术
 - (2) 功率因数校正技术
 - (3) 软开关技术
 - (4) 新颖 PWM 调制技术
 - (5) 数字控制技术
5. 电源新技术
 - (1) 新颖开关电源技术
 - (2) UPS 技术
 - (3) 加热、电焊电源技术
 - (4) 照明电源技术

二、投稿要求

1. 论文内容必须是会议主题所涉及的方向。投稿时 Email 主题一定要注明“论坛投稿”。论文以附件的形式发送到 xuebao@vip.163.com 或 tes@mail.machineinfo.gov.cn。注意提供详细联系方式, 如电话、传真等。详情请参阅 www.eage.com.cn
2. 论文请按《电工技术学报》的格式撰写, 以便送审和编辑加工。
3. 论文由学报编委会进行评选, 评选通过论文将收录到大会论文集中, 同时将在大会上宣读。部分优秀论文将在《电工技术学报》增刊上发表, 特别优秀论文在《电工技术学报》上给予刊登。
4. 投稿截止时间为 2007 年 6 月 15 日。

三、联系方式

通信地址: 北京百万庄大街 22 号《电工技术学报》编辑部 100037

联系电话: 010-88379848/88379629 传真: 010-68994786

E-mail: xuebao@vip.163.com tes@mail.machineinfo.gov.cn 联系人: 杜永红 杨晓花