

直接电容接入动态电压恢复器研究

王智勇, 吴正国, 周卫平

(海军工程大学电气与信息工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 动态电压恢复器能快速补偿电网电压变化, 确保敏感负载端电压稳定, 是用于电能质量控制的主要设备之一。介绍了一种基于电压型逆变器, 采用直接电容接入电网的动态电压恢复器, 以及根据技术要求设计实现其原理样机的过程。相较传统接入方式, 该方案避免了接入变压器设计上的困难。仿真和实验结果证明原理样机能及时地检测系统电压扰动, 并予以准确的补偿。

关键词: 动态电压恢复器; 电能质量控制; 基波相量; 自适应 PI 控制

Study on the dynamic voltage restorers with capacitor direct-coupled

WANG Zhi-yong, WU Zheng-guo, ZHOU Wei-ping

(College of Electrical and Information Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Dynamic voltage restorers can prevent the voltage of load end from voltage disturbance. It's one of important power quality control facilities. A novel dynamic voltage restorers with capacitor direct-coupled based on voltage source inverter is presented in this paper. The prototype of the DVR avoids the difficult of design of the series transformer for the conventional DVRs. The result of simulation and experiments shows the quick detection and correct compensation on voltage disturbance of the principle prototype machine.

Key words: dynamic voltage restorers; control of power quality; base wave vector; adaptive PI control

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)17-0082-06

0 引言

随着电力电子技术的广泛应用, 静态变流设备和电网中的非线性负载与日俱增, 电力系统电能质量问题日益严重。同时伴随着数控工业流水线、电信系统和其它大量敏感负载的投入使用, 系统故障、重型负载的投切以及负载动态变化导致的短时电力中断、电压下陷上冲和闪变、谐波以及频率偏移等电能质量问题日益凸显。它们轻则缩短设备寿命, 重则引起设备的误动作甚至招致灾难性的经济损失^[1,2]。电能质量的控制技术业已成为电力工程领域的热点话题。保护敏感负载免受超出其承受能力的电压扰动的串联补偿器通常被称作动态电压恢复器(DVR)。DVR 根据电压参考波形通过控制电力电子逆变器产生一组幅值相位波形可变的交流电压注入电网, 以保证源端存在电压扰动时负载端电压稳定^[3]。

DVR 在主电路拓扑结构上通常采用串联变压器接入电网, 为便于设计在低压电网条件下可以省略串联变压器直接通过滤波电容接入电网。

采用串联变压器接入法可使逆变器在接入端与电网隔离, 另外还可通过使用升压变压器结构(逆变器侧电压低于注入电压)降低直流母线电压等级, 充分利用器件的电流容量。但是由于变压器的非线性特性, 逆变器产生的高次谐波给接入变压器的设计带来困难, 使其容量上升。另外, 串联变压器的短路电抗将降低开环控制的电压精度, 并产生功率损耗, 而串联变压器和逆变器滤波电路的相互影响将带来附加的相移和电压降落, 从而影响控制器的性能。此外, 变压器还存在饱和及电压跌落时的瞬间涌流等问题。在高压配电网中, 考虑到逆变器结构、开关器件电压容量、直流母线电压、装置成本等因素, 采用串联变压器接入是一个较好的选择。

在电压等级较低的应用中, 可省略串联变压器而通过滤波电路直接将 DVR 接入电网, 采用相对容易设计的电源变压器在直流母线侧与系统隔离,

已回避在接入变压器设计上的困难。

1 主电路设计方案

1.1 主电路拓扑结构

本文介绍的DVR应用于工频三相三线制380 V电网。单相补偿容量5 kW, 基于特征相量提取的参考波生成算法, 采用同向补偿和最小能量补偿相结合的补偿策略, 应用自适应PI控制构成的稳定双环数字控制系统。其拓扑结构见图1。由于三相三线制电网中两相电压为自由变量, 上述DVR系统由两个独立的逆变单元分别对此两相进行电压补偿。在直流端的三相整流桥之前采用工频电源变压器将逆变器与被补偿电网隔离。通过霍尔元件取自公共连接端(PCC)的电压经DSP计算得到的参考波与负载端电压之差为外环电压控制信号, 取自接入端的电流信号作为内环电流控制信号, 从而使整个DVR系统形成稳定的双环控制结构。图中实线部分为电气

连接, 虚线部分为信号控制关系。

1.2 主要电路参数及元器件选型

直流母线电压应高于线电压峰值(电压峰值为537 V), 但母线电压过高会导致储能电容和逆变器IGBT的选型困难, 综合各种因素, 确定系统直流母线电压为600 V。

根据设计要求, 上述DVR对2~40次电压谐波进行补偿。根据采样定理逆变器开关频率只需大于两倍的最高次谐波频率即4 kHz, 为提高控制精度, 综合考虑确定开关频率为10 kHz。基于此开关频率, 为保证采样精度, 通过仿真研究选取采样频率为12.5 kHz。

根据补偿容量要求选取逆变器开关器件采用西门康SKM75GB120IGBT^[4]。采用电解电容经过串并联构成耐压为900 V容量为10 000 μ F的电容组作为单向直流储能单元。

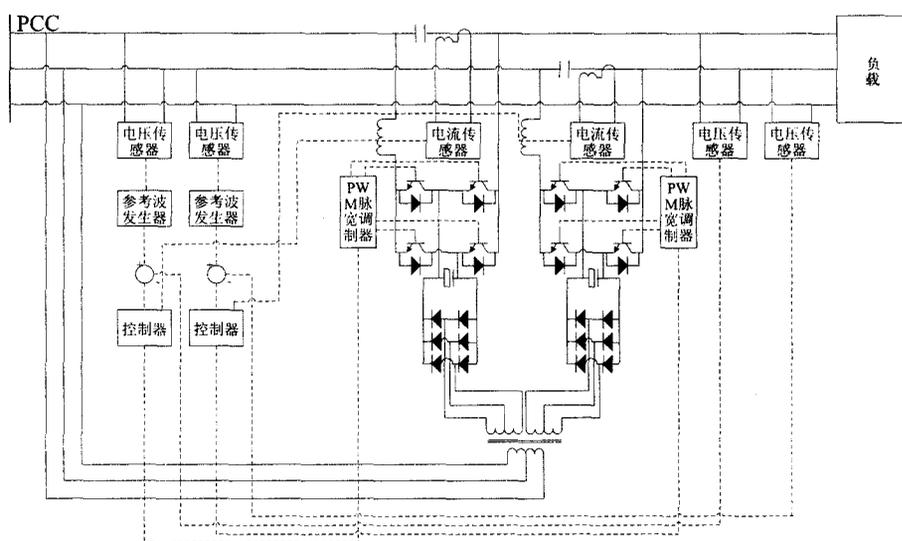


图1 三相三线制DVR拓扑结构

Fig.1 Topology of DVR in three phase three wire system

上述DVR系统的数字控制核心DSP在每个控制周期要完成六路模拟信号的采样、参考波生成运算、自适应控制并生成PWM脉冲信号, 选用具有16通道12位AD采样150 MHz主频的TMS320F2812型定点DSP作为系统控制核心。

2 系统实现

2.1 检测算法

快速准确的扰动检测和参考波生成算法是实现DVR的关键。上述DVR系统采用的检测算法使

用一工频周期内的采样数据计算电压电流基波特征相量。按不同的补偿策略生成参考电压波形控制逆变器输出。

由于受到各种干扰, 公共连接端电压电流幅值和相位将发生变化(相对50 Hz工频, 在实际应用中一般频率变化较小, 造成的影响主要是波形相位的缓慢偏移, 因此可归结为相位变化), 并且往往包含谐波成分。忽略频偏相移, 检测信号可表示为

$$u(t) = \sum_{i=1}^{\infty} U_i \sin(i\omega t + \varphi_i) \quad (1)$$

其中: i 为谐波次数, $i=1$ 表示的分量即为基波分量。此表达式具有如下积分特性:

$$\begin{cases} \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \sin(\omega t) d\omega t = U_1 \cos \varphi_1 \\ \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \cos(\omega t) d\omega t = U_1 \sin \varphi_1 \end{cases} \quad (2)$$

结果与积分起止时刻无关。

根据这一特性, 使用标准单位正余弦序列与被补偿电压的采样值序列卷积即可得到 R^2 空间内的被补偿电压特征向量

$$Z(n) = (z_1(n) \quad z_2(n)) = (U_1 \cos \varphi_1 \quad U_1 \sin \varphi_1) \quad (3)$$

反映的是被补偿电压基波的幅值和相位。通过检测特征向量的幅值和相位的变化即可检测到被补偿电压的幅值涨跌及相移。

2.2 补偿策略

DVR最基本的补偿目标是使负载端电压幅值保持为标称电压值。为实现这一目标可采用三种不同补偿策略^[5], 见图2。

完全补偿是将负载电压的幅值和相位完全恢复为正常时的状态; 同相补偿是采用与被补偿电压相位相同的补偿电压, 以最大限度地提高电压利用率; 最小能量补偿是采用与负载电流正交的补偿电压进行补偿以实现最小有功输出。不难理解, 不同的补偿策略在实现上可以体现为参考波与被补偿电压基波的不同相位差。这样按照确定的幅值相位即可计算生成标准的参考波并得到被补偿电压幅值的涨跌比率。

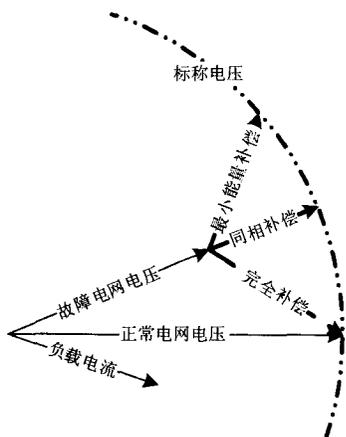


图2 补偿策略相量示意图

Fig.2 Vector insinuation of compensation strategy

2.3 控制算法

由图1所示的系统拓扑结构可知, 两相逆变单元相互独立, 为便于分析, 单相逆变单元电路结构可等效为图3。

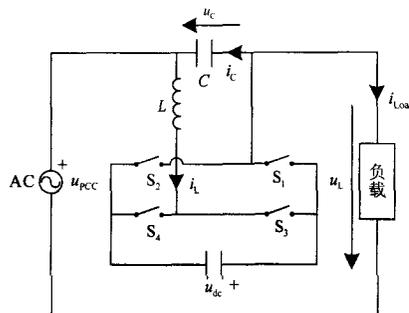


图3 单相DVR原理结构

Fig.3 Mechanism of single phase DVR

四个IGBT简单等效为受控开关, u_{PCC} 为公共连接端线电压, u_L 为负载端电压, u_{dc} 为逆变器直流母线电压, u_C 为DVR输出的补偿电压, i_{Load} 、 i_C 和 i_L 分别为负载电流、滤波电路中电容支路和电感支路上的电流。

根据基尔霍夫定律可得状态方程如下

$$\begin{aligned} C \frac{du_C}{dt} &= i_L - i_{Load} \\ L \frac{di_L}{dt} &= S^* u_{dc} - u_C \end{aligned}$$

其中: S^* 为开关函数, 表征逆变器的开关状态, 定义如下:

$$S^* = \begin{cases} 1 & S_1, S_4 \text{ 导通, } S_2, S_3 \text{ 关断} \\ -1 & S_2, S_3 \text{ 导通, } S_1, S_4 \text{ 关断} \end{cases}$$

当开关频率远远高于被调制的基波频率时, 可采用一开关周期内状态平均的方法, 用一开关周期内两个状态持续时间的平均值取代 S^* , 其值正比于调制波的瞬时值。这样逆变器在控制上等效为一个增益为 u_{dc} 的线性环节。

根据上述状态方程可建立结构如图4所示的双环控制系统。其中 u_{ref} 为参考电压波, 比例系数 K_v 和积分常数 τ 根据2.1中得到的被补偿电压幅值的涨跌比率进行自适应调节。

根据控制框图可以求得参考电压到输出电压的闭环传递函数为

$$G_{cr}(s) = \frac{u_{dc} K_v \tau s + u_{dc} K_v}{LC \tau s^3 + u_{dc} C \alpha \tau s^2 + \tau s (1 + u_{dc} K_v \beta) + u_{dc} K_v \beta}$$

反应系统输出负载电压对参考电压的传递特性, 通过适当选取系统参数, 使系统稳定且具有较高的稳定裕度, 即在低频带系统的输出电压跟踪参考电压, 具有较好的低频特性。

求得负载电路到输出电压的传递函数为

$$G_{ci}(s) = \frac{-L\tau s^2}{LC\tau s^3 + u_{dc}C\alpha\tau s^2 + \tau s(1 + u_{dc}K_v\beta) + u_{dc}K_v\beta}$$

通过适当选取系统参数可使得 $|G_{ci}(s)|$ 在所有频率范围内都很小, 使输出电压具有较好的负载适应性。

2.4 IGBT模块驱动电路设计

IGBT驱动电路原理图如图5所示, 该电路由IGBT驱动模块及其外围电路构成, 图中示意的为一个驱动单元, 每相逆变器控制器共有四个IGBT驱动电路单元, 分别驱动H桥臂上的四个IGBT模块。

M57962模块的供电电源为+15 V和-9 V, 其中13、14脚之间为一光耦的原边, 与其它引脚隔离。来自PWM整形电路的PWM波V11被送到M57962的13脚, 经M57962隔离后在电路中G1、E1间产生一个PWM驱动信号。当V11为低时该信号为高 (+15 V), 驱动相应的IGBT导通, 当V11为高时该信号为低 (-9 V), 关断相应的IGBT。

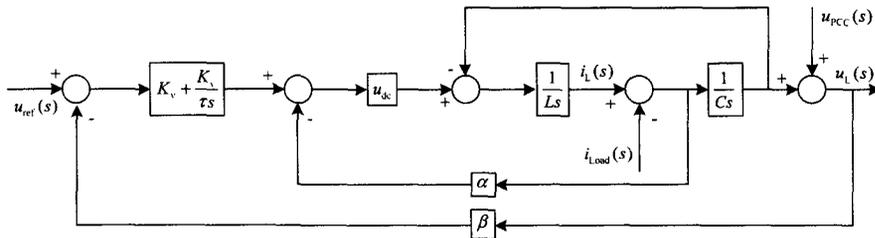


图4 系统控制框图

Fig.4 Block diagram of the control system

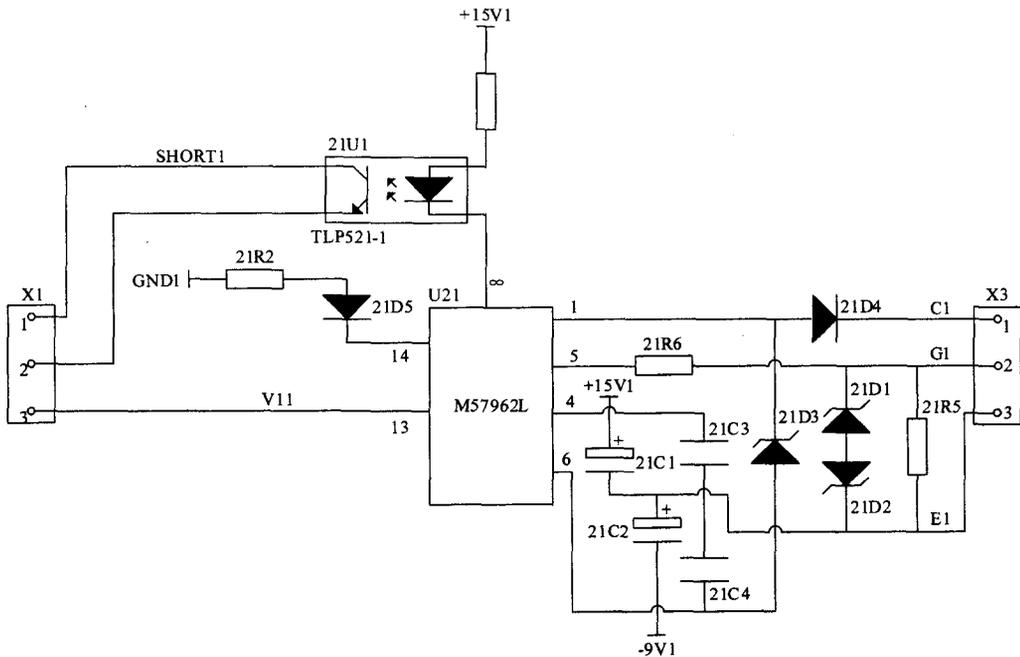


图5 IGBT驱动电路原理图

Fig.5 Functional block diagram of the driving circuit for IGBT

二极管 21D4 的作用是检测 IGBT 故障, 当 IGBT 出现直通时, 该信号被 IGBT 驱动模块捕捉到, 并在 M57962 的 8 脚产生一个低电平信号。确

认 IGBT 故障后, 故障低电平信号通过高速光耦送到控制器进行处理, 利用中断或软件关断 PWM 控制信号, 从而达到保护目的。在本文的基于

F2812DSP 的控制系统中, 利用事件管理器中功率驱动保护引脚(PDPINTA)中断实现故障保护。通常 1 个事件管理器产生的多路 PWM 可控制多个 IGBT 工作, 多路驱动单元的故障输出经与门连至 PDPINTA。当任一开关管有故障时输出低电平, 与门输出低电平。PDPINTA 低电平导致 DSP 产生中断, 所有的事件管理器输出引脚均被硬件设置为高阻态, 并进入预先设置的故障处理中断程序, 从而达到保护目的。

为减少辅助电源的路数, 辅助电源板仅向 IGBT 驱动电路提供 24 V 单电源, 需要在驱动电路外围将 24 V 单电源通过稳定电路分为+15 V 和-9 V 双路电源, 提供给 M57962 用电。

3 实验结果

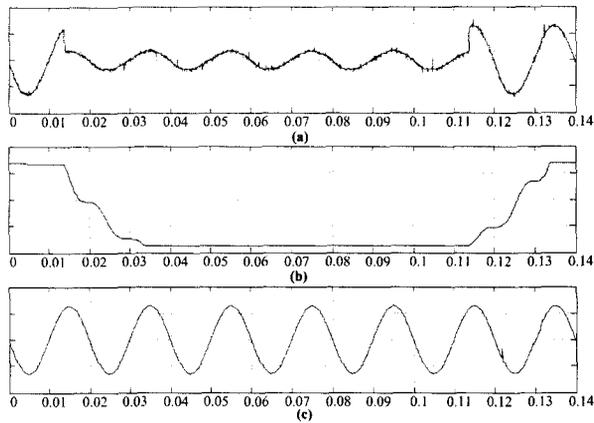
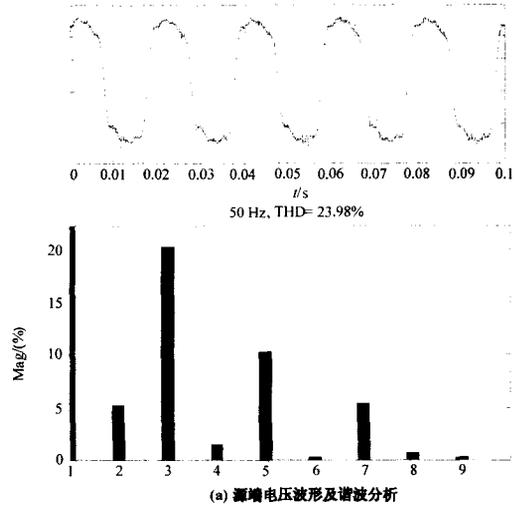


图6 参考波生成实验结果

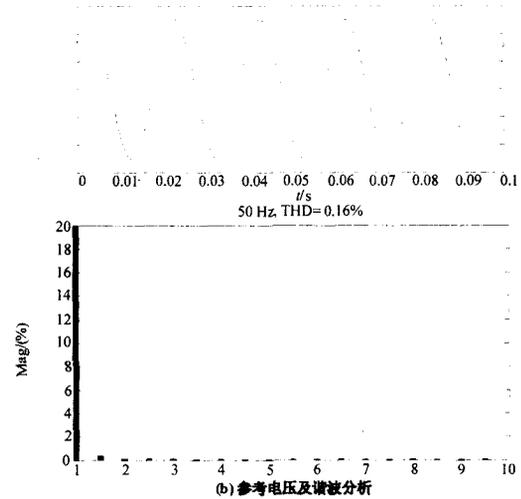
Fig.6 Experimental result of reference wave generating

图6为单相参考波发生试验结果, 图6(a)是发生跌落的被补偿电压波形, 为研究极端情况, 特选择在电压峰值时刻发生大幅电压跌落。图6(b)为上述特征向量的幅值, 可见在电压发生跌落的几个采样周期之内, 通过检测上述特征向量的幅值即可检测到电压变化, 在一个工频周期之后即可得到电压幅值的变化率; 而图6(c)为基于特征向量重构的电压参考波, 可见参考波可以稳定地跟踪被补偿电压的相位。

图7所示为DVR对谐波电压补偿的结果。图7(a)所示的50 Hz工频电压中含有5%的二次谐波、20%的三次谐波、10%的五次谐波以及5%的七次谐波, 总谐波畸变率将近24%。在12.5 kHz的采样频率下, DSP得到的参考电压波如图7(b)所示, 其总谐波畸变率仅为0.16%。



(a) 源端电压波形及谐波分析



(b) 参考电压及谐波分析

图7 谐波补偿实验结果

Fig.7 Experimental result of compensation for harmonic

图8所示为单相全系统试验结果, 图8(a)为源端电压在约0.072 s处发生20%的电压跌落和10°的相位跳变, DVR最终采用同相补偿(过渡过程完成后参考波相位与被补偿信号基波同相)。图8(b)为经过补偿的负载端电压波形。负载端电压的频谱如图8(c)所示, 总谐波畸变率为2.56%, 其中二次谐波较高约近2%。

4 结论

本文介绍的10 kW DVR原理样机基于电压型逆变器采用电容直接接入电网。上述DVR从被补偿电压波形中提取基波分量特征向量, 以检测电压扰动并重构参考波形, 采用自适应参数调节的PI控制器构成电压外环和电流内环的双环控制算法。实验证明, 该系统能有效补偿电压跌落、相移和谐波, 具有良好的动态性能, 符合技术设计要求。

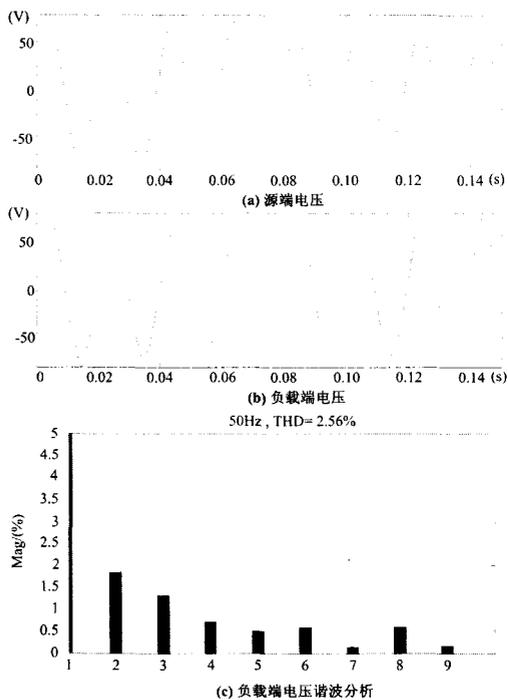


图8 电压跌落补偿试验结果

Fig.8 The experiment result of compensation for voltage sag

参考文献

- [1] Bollen M H J. Understanding Power Quality Problems, Voltage Sags and Interruptions[M]. IEEE Press, 2000.
- [2] 程彦华. 电能质量问题及改进措施[J]. 青海电力, 2005, (4): 52-54.
- CHENG Yan-hua. Problem of Electric Power Energy Quality and Its Improving Measures[J]. Qinghai Electric

- Power, 2005,(4):52-54.
- [3] 赵贺,周孝信,武守远. 改善电能质量的电网补偿技术[J]. 电力设备, 2003, (1):23-29.
- ZHAO He, ZHOU Xiao-xin, WU Shou-yuan. Power Network Compensation Technology for Improving Electric Energy Quality[J]. Electrical Equipment, 2003, (1):23-29.
- [4] SEMIKRON 说明文档 11-09-2006 RAA[EB/OL]. <http://www.semikron.com/internet/gecont/pdf/40.pdf>
- [5] 刘昊,韩民晓,尤勇,等. 线电压补偿型 DVR 的补偿能力分析[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (21): 54-57.
- LIU Hao, HAN Min-xiao, YOU Yong, et al. Analysis of Compensation Capability of Line Voltage Compensation Based Dydamic Voltage Recovery(DVR)[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (21): 54-57.
- [6] MITSUBISHI ELECTRIC 说明文档. Laogu, Arm, Dsp, Mcu, Embedded Systems, Ic, Chip, Semiconductor, Transistor, Eletronic Component, Iso Component, Datasheet[EB/OL]. <http://www.Laogu.com>,

收稿日期: 2008-09-23; 修回日期: 2009-01-20

作者简介:

王智勇(1977-), 男, 博士研究生, 研究方向为电能质量检测与控制; E-mail: free_wzy@tom.com

吴正国(1963-), 男, 学士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子技术、数字信号处理、电能质量检测与控制。

(上接第 81 页 continued from page 81)

- CHEN Jin-huan, CHEN Zhong-hua. Prospect of Photovoltaic in 21st Century[J]. Journal of Shanghai Institute & Electric Power, 2001, 17(4): 23-28.
- [9] Shigenori Naka, Takamu Genji, Yoshikazu Fukuyama. Practical Equipment Models for Fast Distribution Power Flow Considering Interconnection of Distributed Generators[A]. in: Power Engineering Society Summer Meting[C]. 2001. 1007-1012.
- [10] El-Sharkh M Y, Rahman A, Alam M S. Analysis of Active and Reactive Power Control of a Stand-Alone PEM Fuel Cell Power Plant[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19 (4): 2022-2028.
- [11] Rekha, Jagaduri T, Ghadir Radman. Modeling and Control of Distributed Generation Systems Including PEM Fuel Cell and Gas Turbine[J]. Electric Power System Research, 2007,77: 83 -92 .
- [12] 沈海权,李庚银,周明. 联网燃气轮机动态特性分析[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 27-31.
- SHEN Hai-quan, LI Geng-yin, ZHOU Ming. Dynamic Performance Analysis of Gas Turbine Generators Connected to Grid[J]. Power System Technology, 2004,28(16): 27-31.
- [13] Haque M H. A General Load Flow Method for Distribution Systems[J]. Electric Power Systems Research, 2000, (54): 47-54.

收稿日期: 2008-09-18; 修回日期: 2008-11-10

作者简介:

李新(1960-), 女, 博士, 教授, 博导, 从事在线检测与故障诊断工作;

彭怡(1983-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为含分布式电源的配电网规划; E-mail: pengyi_0701@yahoo.com.cn

赵晶晶(1980-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统仿真分析与计算、分布式发电。