

基于阻抗源的单相光伏并网系统研究

李 杨¹, 谢 柱², 郑连清²

(1. 重庆市电力公司江北供电局, 重庆 401147; 2. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044)

摘 要:近年来太阳能并网发电系统得到广泛应用, 并网逆变器是系统核心部件, 系统中逆变器多采用多级式结构。采用阻抗源代替 DC/DC 升压装置, 在升压的同时稳定逆变桥直流侧电压, 保证后级逆变器的稳定工作, 使并网电流相位严格跟踪电压相位, 实现单位功率因数的并网。由于阻抗源不含开关管, 允许桥臂直通短路状态的出现, 消除了死区时间, 降低成本的同时减小了并网电流的谐波畸变, 改善了系统输出。采用文献 [1] 中的光伏阵列模型, 利用改进的电导增量法实现最大功率点, 解决跟踪速度及精度的矛盾, 证明基于阻抗源的单相光伏并网系统的可靠性。

关键词: Z 源型逆变器; 并网; 功率点跟踪 (MPPT); 光伏阵列

Abstract: In recent years the grid-connected photovoltaic (PV) system has been widely used. Grid-connected inverter is the key component of the system. In the system, most of the inverter adopts the hierarchical structure which simplifies the system control but reducing the system efficiency. The impedance source is adopted to replace the DC/DC device. It boosts and stabilizes the DC link voltage. The phase current follows grid phase voltage strictly in unity power factor. The Z-source does not contain the switch tubes and the switch tubes in the same arm can conduct at the same time so it can reduce the costs, eliminate the dead-zone time and reduce the harmonic distortion. Using the photovoltaic array model in reference [1], the maximum power point tracking (MPPT) and the grid-connected operation in unity power factor are achieved. It proves the reliability of single-phase grid-connected photovoltaic system based on Z-source.

Key words: Z-source inverter; grid-connected; maximum power point tracking (MPPT); photovoltaic array

中图分类号: TM734 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0009-05

0 引 言

近些年太阳能作为可靠能源得到广泛应用。太阳能并网发电系统以其机动灵活、转换效率高的优势, 成为太阳能利用的主要形式之一。由光伏阵列特性可知, 为增大其输出功率, 须使阵列电压稳定在最大功率点电压附近, 实现最大功率点跟踪 (maximum power point tracking MPPT)。利用改进的电导增量法进行仿真研究, 实现 MPPT。为降低成本提高效率和系统可靠性, 采用阻抗网络代替 DC/DC 变换器, 实现升压和稳定逆变器直流侧电压的功能, 保证后级逆变器的稳定工作。为尽可能地将光伏阵列输出的电能

送上电网, 采用单位功率因数的并网方式, 使并网电流相位严格跟踪并网电压相位。通过仿真研究一套基于阻抗源的单相光伏并网系统, 实现 MPPT、升压和逆变并网功能, 证明系统可靠性。

1 主电路结构及控制策略

控制系统的目的是最大可能地将光伏阵列输出的直流电转化为交流电, 并通过对电流幅值、频率、相位的控制, 实现单位功率因数的并网。系统主电路结构框图如图 1, 控制结构框图如图 2。

控制系统有 3 个闭环结构^[2-4]: 交流并网电流环、Z 源电容电压环和光伏阵列电压环。交流并网电

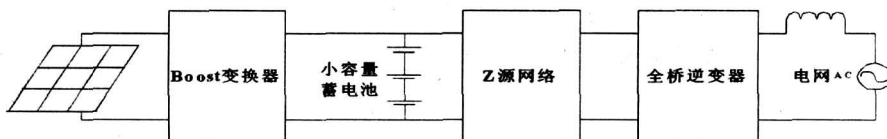


图 1 主电路结构框图

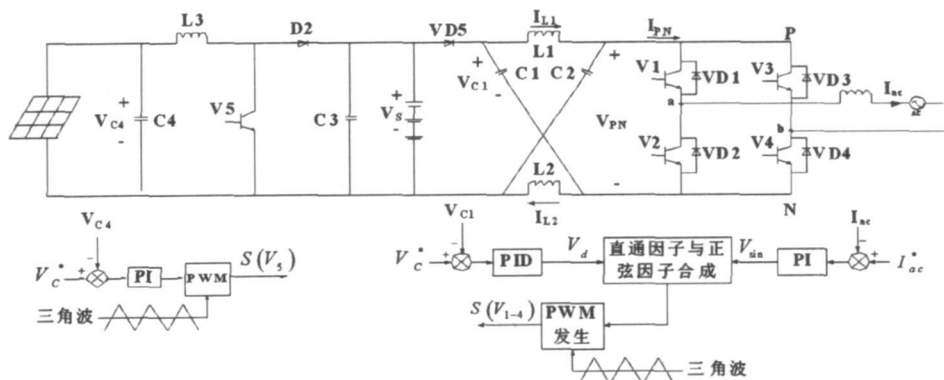


图 2 Z源并网逆变器控制结构框图

流闭环实现并网电流对电网电压的相位跟踪；Z源电容电压环稳定 Z源电容电压；光伏阵列电压环控制其输出电压，实现最大功率点跟踪。并网电流环正弦指令的正弦量为与电网同相的单位正弦信号，幅值量利用光伏阵列功率计算得到。采用简单升压控制方法实现 Z源网络的升压功能^[5-7]。小容量蓄电池起到稳定电压的作用。

寻找到新的最大功率点，很快进入稳态。

2 最大功率点跟踪

为增大光伏阵列能量输出，需进行最大功率点跟踪，常用的电导增量法通过比较光伏阵列的瞬时电导及其变化量判断跟踪方向，步长设置、跟踪速度和精度之间存在矛盾。下面尝试对经典电导增量法进行改进，设置步长为 $K |dP/dU|$ ，由开路电压比例系数法得到启示，最大功率点电压约为开路电压的 0.76 倍，尝试先设定光伏阵列电压为此电压，再利用电导增量法以动态步长继续跟踪。跟踪流程图如图 3 所示。

图 1 中 Boost 变换器用于跟踪最大功率控制。利用文献 [1] 封装好的光伏阵列电路进行 MPPT 仿真，电路如图 4 所示。仿真中设置初始环境为标准测试条件 (STC: 光照 1000 W/m^2 , 温度 25°C)。 $t=0.5 \text{ s}$ 时环境条件阶跃变化为标称温度条件 (NOCT: 光照 800 W/m^2 , 温度 48°C)， $t=1 \text{ s}$ 时环境条件阶跃变化为任意条件 (光照 900 W/m^2 , 温度 40°C)，光照和温度变化曲线和对应的光伏阵列输出曲线如图 4 所示。

仿真开始后控制系统设置光伏阵列电压为 0.76 倍开路电压 (76 V)，通过电导法搜寻最佳工作点，0.1 s 后基本稳定。电压波动幅度为 0.1 V，电流波动幅度小于 0.05 A，功率波动太小，可忽略。在 0.5 s 和 1 s 环境发生阶跃变化时，控制系统能快速跟踪并

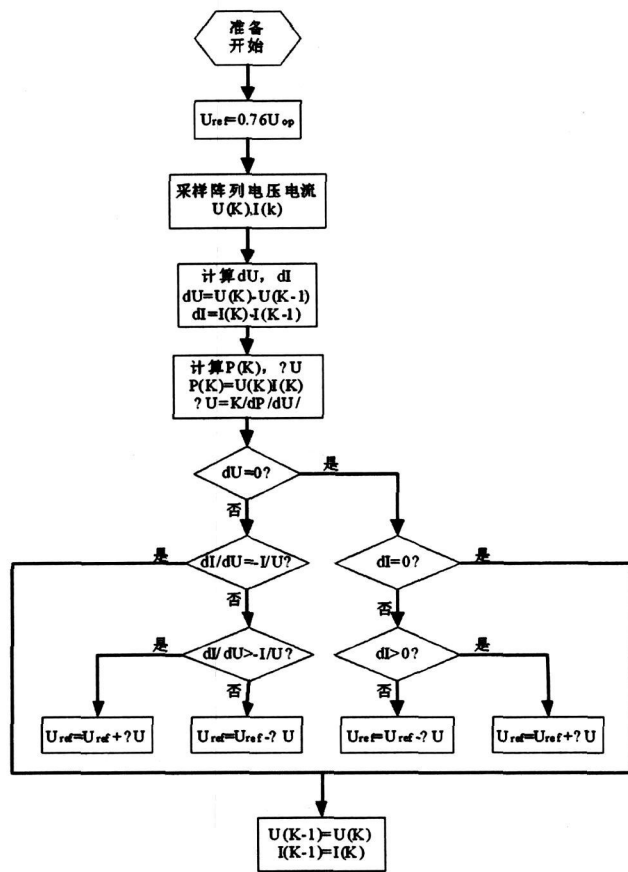
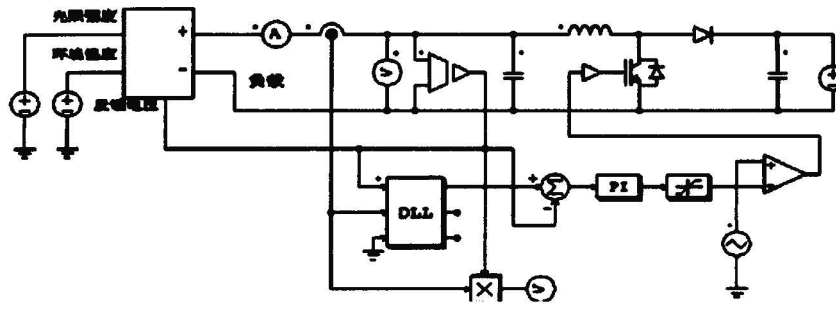


图 3 变步长电导增量法控制流程图

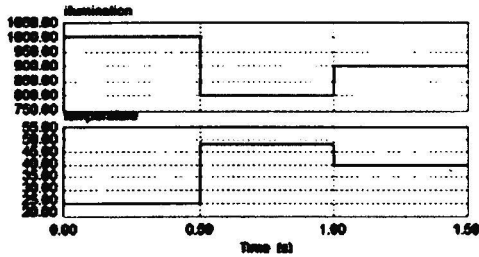
3 系统仿真

根据系统主电路结构、各个闭环控制策略和改进的电导增量法，对整套系统进行仿真。仿真中采用峰值 310 V，频率 50 Hz 的正弦交流电压源作为等效电网， $t=1 \text{ s}$ 时环境条件发生阶跃变化，稳定逆变器直流侧电压于 630 V。设置仿真条件及参数如下。

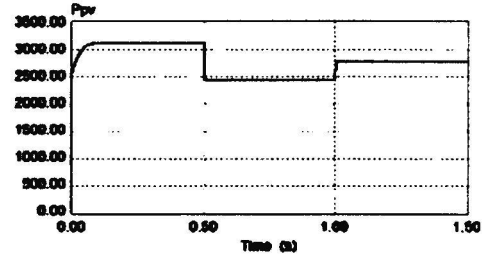
- 环境 1: 光照强度 966 W/m^2 、温度 25°C ；
- 环境 2: 光照强度 600 W/m^2 、温度 48°C ；



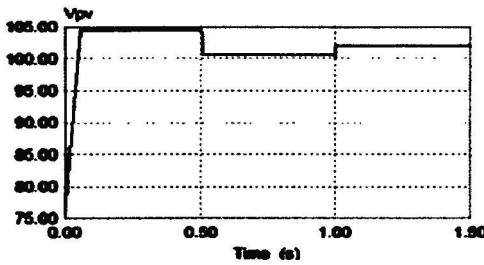
mppt 仿真电路



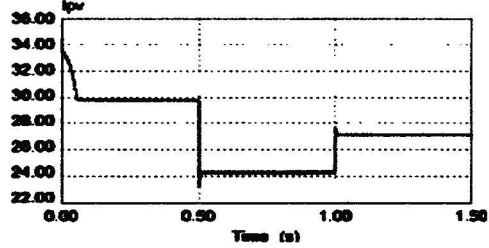
(a) 光照和温度变化情况



(b) 光伏阵列输出功率变化情况



(c) 光伏阵列输出电压变化情况



(d) 光伏阵列输出电流变化情况

图 4 仿真电路及光伏阵列输出特性

输入电压: 100 V 至 105 V;
 电网频率: 50 Hz 峰值 310 V;
 逆变桥直流侧电压: 630 V DC
 Z源电容电压: 368 V DC 波动幅度 3%;
 开关频率: 10 kHz
 光伏阵列输出电容: $C_{pv} = 220 \mu\text{f} / 200 \text{ V}$;
 并网电感: $L_{ac} = 9 \text{ mH} / 30 \text{ A}$;
 Z源电容: $C = 2000 \mu\text{f} / 600 \text{ V}$;
 Z源电感: $L = 8 \text{ mH} / 60 \text{ A}$;
 输入二极管: 反向耐压 额定电流 (350 V / 70 A)
 开关管: 反向耐压 额定电流 (800 V / 25 A)
 并联二极管: 反向耐压 额定电流 (800 V / 25 A)
 表 1 为稳态时系统重要的电气参数, 可与仿真结果对照。其中 E_g 为等效电网电动势峰值; I_{ic} 为交流并网电流峰值; T_{PWM} 为开关周期; T_s 为直通状态调制周期; V_{PN} 为非直通状态母线电压; ω 为基波角频率; V_c 为稳态时 Z源电容电压; V_{PV} 为光伏阵列输出电压; I_{PV} 为光伏阵列输出电流; I_L 稳态时为 Z源电感电

流。

表 1 单相 Z源并网逆变系统电气参数

参数	数值	参数	数值
E_g	310 V	I_{ic}	13.65 A / 8.27 A
T_{PWM}	0.1 ms	T_s	0.05 ms
V_{PN}	630 V	ω	314 rad
V_c	390 V	V_{PV}	104 V
I_L	20 A / 12.4 A	I_{PV}	29 A / 18 A

3.1 并网电流

环境 1 下, 稳态时并网电流和电网电压波形及频谱分析如图 5、图 6。t=1 s 环境阶跃变化时并网电

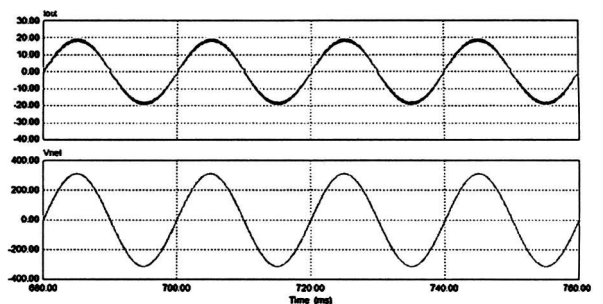


图 5 环境 1 下稳态时并网电流时域波形

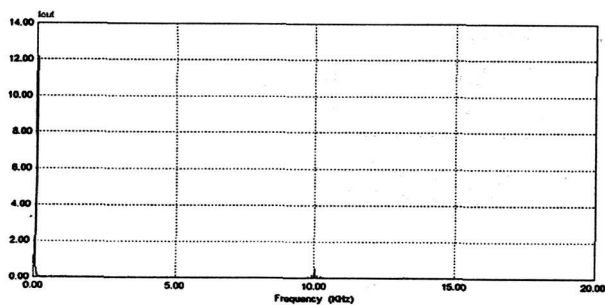


图 6 环境 1 下稳态时并网电流 FFT 波形

流和电网电压波形如图 7。环境 1 下稳态时,并网电流和电网电压基本同相,并网电流峰值 19.3 A,在开关频率 10 kHz 及边频带处存在较小的谐波,并网功率 2 991.5 W。环境阶跃变化时,并网电流大小发生变化,稳定后电流峰值 11.7 A,并网功率为 1 813.5 W。

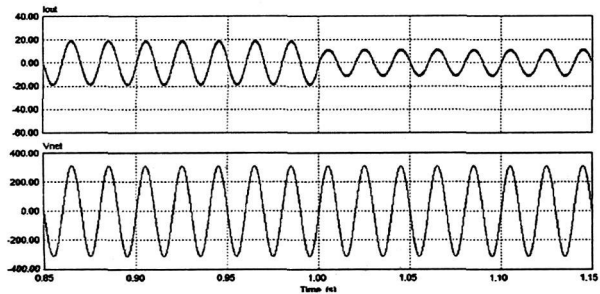


图 7 环境阶跃变化时的并网电流波形

3.2 光伏阵列输出

光伏阵列输出电压、电流、功率波形如图 8—图 10。环境 1 时,光伏阵列电压从 0.76 倍开路电压追踪最大功率点电压,在 56 ms 左右稳定于 104 V。环境阶跃变化时,光伏阵列重新开始追踪最大功率点电压,10 ms 以后调整稳定于 100 V。环境 1 下稳态时,输出电流 28.7 A,功率 3 000 W;环境 2 下稳态时,输出电流 18.2 A,功率 1 820 W。

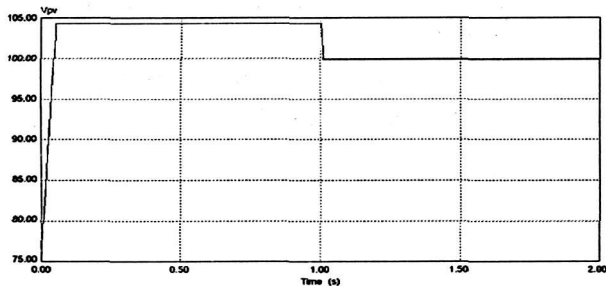


图 8 光伏阵列输出电压

3.3 逆变桥交流侧电压

环境 1 下逆变桥交流侧电压波形如图 11。环境发生阶跃变化导致阻抗网络输入电压变化时,逆变桥直流侧电压波形如图 12。逆变桥交流侧电压的非零

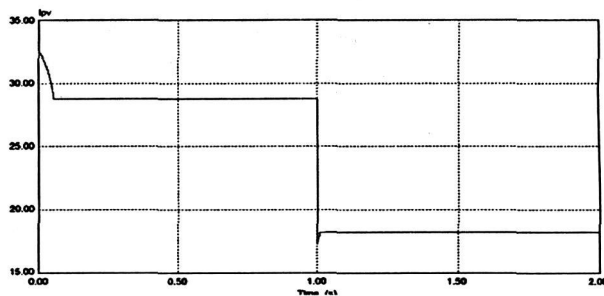


图 9 光伏阵列输出电流

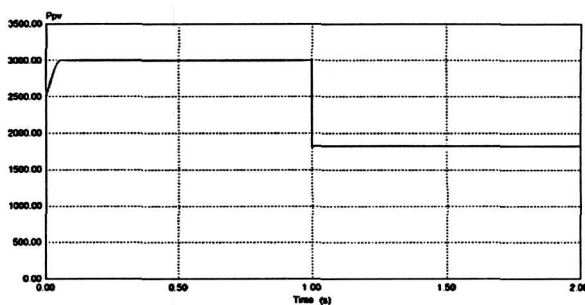


图 10 光伏阵列输出功率

值存在波动,波动频率 100 Hz 由非直通状态时直流母线电压的波动引起。环境阶跃变化时,逆变桥交流侧电压对应直流侧电压变化。

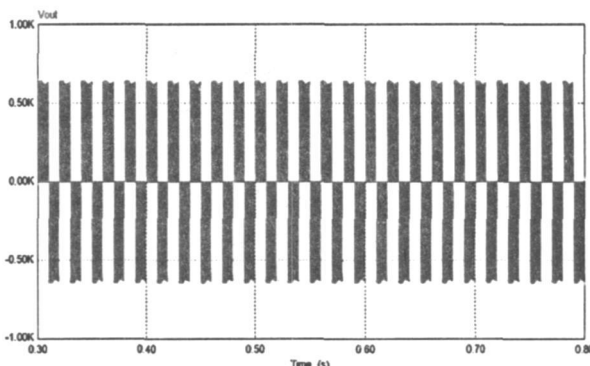


图 11 环境 1 下逆变桥交流侧电压

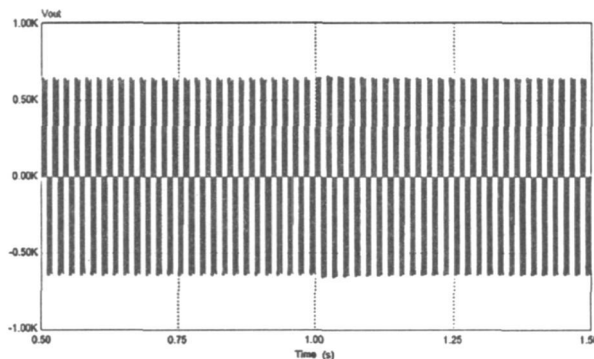


图 12 环境阶跃时的逆变桥交流侧电压

4 结 论

在常规并网逆变器中引入阻抗网络代替传统的

DC/DC 升压变换器, 形成 Z 源型逆变器; 利用文献 [1] 的光伏阵列电路模型结合改进的电导增量法进行 MPPT 仿真; 设计了整套系统的控制策略, 对一套功率为 3 000 W 基于 Z 源的单相光伏并网系统进行仿真, 并对仿真波形进行了分析。证明改进的电导增量法跟踪速度和跟踪精度有所提高, 基于阻抗源的单相光伏并网装置节约成本的同时改善了系统的输出, 并增加了系统的可靠性。

参考文献

[1] 郑连清, 谢柱. 基于特性参数的太阳能电池和光伏阵列建模研究 [J]. 低压电器, 2010(8): 21-25.
[2] 吴理博. 光伏并网逆变系统综合控制策略研究及实现 [D]. 北京: 清华大学博士学位论文, 2006.
[3] 丁新平. Z 源变流器关键技术的研究 [D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2007.
[4] 蔡磊. Z 源逆变器并网应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学

硕士学位论文, 2008.

[5] Jong-Hyoung Park, Heung-Geun Kim, Tae-Won Chun. A Control Strategy for the Grid-connected PV System Using a Z-Source Inverter [C]. 2nd IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08), December.
[6] Poh Chiang Loh, Vilathgamuwa D. M., Yue Sen Lai, Geok Tin Chua, Yunwei Li. 2004. Pulse-width Modulation of Z-source Inverters [J]. Industry Applications Conference 39th IAS Annual Meeting Conference Record Oct. 2004.
[7] 张超, 何湘宁. 一种用于光伏发电系统的新型高频逆变器 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 51-53.

作者简介:

李 杨 (1962), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化及电力电子技术的应用。

(收稿日期: 2010-09-15)

(上接第 5 页)

[1] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网 [J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(1): 7-11.
[2] IBM 论坛 2009. 点亮智慧的地球 [EB/OL] [D]. <http://www-900.ibm.com/cn/forum2009/wisdom.shtml>
[3] Giuseppe Parise. A New Approach to Calculate the Decaying AC Contributions to Short Circuit [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 1995, 31(1): 214-221.
[4] 赵敏. 基于电流变化率的电网短路保护原理 [J]. 电网技术, 2008, 32(4): 105-108.
[5] 王建元, 师旭, 师耀林, 等. VB 与 Matlab 混合编程在电力系统短路计算中的应用 [J]. 电网技术, 2007, 32(2): 143-146.
[6] 罗庆跃, 李晓明. 变结构模型短路电流计算方法 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 77-80.
[7] 邵玉槐, 李肖伟, 程晋生. REI 等值法用于多节点配电系统短路电流计算的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(4): 64-67.
[8] 范忠, 张慧媛. 基于 GIS 数据平台的配电网短路电流计算 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 76-79.
[9] 徐贤. 220 kV 电网短路电流预测的新方法及应用 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(16): 103-106.
[10] 刘波, 张焰, 陈煜. 基于 GA2 改进 BP 神经网络算法在大电网短路电流预测中的应用 [J]. 电工电能新技术, 2006, 25(4): 43-46.
[11] 刘俊, 马志瀛, 闫静, 等. 基于改进梯度校正法的短路电流在线实时计算 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 66-70.

[12] Carson W. Taylor 著, 王伟胜译. 电力系统电压稳定 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
[13] 王文成. 神经网络及其在汽车工程中的应用 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.
[14] Carson W. Taylor 著, 王伟胜译. 电力系统电压稳定 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
[15] Specht D. F. A General Regression Neural Network [J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1991, 2(6): 568-576.
[16] 张际先, 宓霞. 神经网络及其在工程中的应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
[17] 冯志鹏, 宋希庚, 薛冬新, 等. 基于广义回归神经网络的时间序列预测研究 [J]. 振动、测试与诊断, 2003, 23(2): 106-109.
[18] 谷志红, 牛东晓, 王会青. 广义回归神经网络模型在短期电力负荷预测中的应用研究 [J]. 中国电力, 2006, 39(4): 11-14.
[19] 王尔智, 赵玉环. 电力网络灵敏度分析与潮流计算 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
[20] 万千云等. 电力系统运行实用技术问答 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

作者简介

潘 睿 (1984), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制。

刘俊勇 (1963), 男, 四川成都人, 教授, 博士生导师。研究方向为电力市场、分布式发电、灵活输电与电力系统可视化等方面的研究。
(收稿日期: 2010-10-06)