

# 不间断电力变电站中分布式电源接入系统研究

李峰, 李兴源, 郝巍

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 将新兴的发电技术(风力发电、燃料电池发电)及新型储能技术(制氢储能、超导储能装置)引入传统的电力变电站后, 由于各分布式电源的多样性和复杂性, 使得整个系统的运行和控制变的复杂, 独立运行单个分布式电源, 很难维持整个系统的频率和电压稳定。提出让高度可控的分布式电源, 如燃料电池发电系统在通过电压源型逆变器并网的同时参与系统的频率和电压调节, 用以解决随机性较大的分布式电源, 如风力发电系统功率输出的随机性导致电网电能质量下降的问题。最后通过仿真分析验证了储能装置的这种并网方式能够有效地提高变电站输出电能质量。

**关键词:** 不间断电力变电站; 分布式电源; 电压源型换流器; 频率控制; 电压控制

## A research of the distributed generation in the uninterrupted power substation connected to the grid

LI Feng, LI Xing-yuan, HAO Wei

(School of Electrical and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** When introducing the burgeoning power generation technology and new types of energy storage technology such as wind farm power generation, fuel cell, hydrogen production based energy storage and superconducting magnetic energy storage, to traditional power substation, the various types of distributed generation(DG) are to be independently controlled by their owners, the large-scale introduction of DGs makes system operation complicated. In this paper, the controllable DGs such as fuel cells in the UPS are connected to the grid through the voltage source inverter and participated in voltage control and primary frequency control of the system. The proposed method is helpful to improve the power quality decline of the substation because of the existence of the uncontrollable DGs such as a wind power generation in the UPS. And the simulation results show qualitatively that this method will improve the output power quality of the substation.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50577044).

**Key words:** uninterrupted power system; distributed power source; voltage-typed converter; frequency control; voltage control

中图分类号: TM715      文献标识码: A      文章编号: 1003-4897(2007)10-0013-06

## 0 引言

可再生能源与分布式电源系统是指: 功率为数千瓦到 50 MW 的小型模块式的、与环境兼容的独立电源, 也叫模块化发电单元。分布式一次能源主要有风能、太阳能和生物质能, 目前常见的分布式发电技术包括: 燃料电池、太阳能光伏电池、风力发电技术及飞轮、超导储能技术等。

在最近的几十年中, 分布式电源以其投资低、环保好、灵活性高的特点得到了广泛的应用, 相关调查显示, 到 2010 年, 新建的发电机组将有 25%到 30%是分布式电源。如今, 大电网与分布式发电相结

合被世界许多能源、电力专家认为是降低能耗、提高电力系统可靠性和灵活性的主要方式, 更是解决我国电力紧缺现状的有效途径。因此, 基于分布式发电和储能技术的新型不间断电力变电站将是分布式电源的主要应用形式<sup>[1~3]</sup>。

不间断电力变电站中的分布式电源大多通过电压源型逆变器(VSI)接入系统<sup>[4, 5]</sup>。VSI 的控制策略有很多, Mostafa I. Marei 在文献[6]中提出了灵活分布式发电的概念, 并在后来的文献[7, 8]中引入希尔伯特变换和自适应神经控制, 提高了分布式电源的电能质量; 文献[9]则是采用双环串级 PI 结构的控制器, 第一级为功率控制, 第二级为电流控制, 也有效地提高了电能质量。本文针对不间断电力变

电站中不同分布式电源的特点以及多种电源协调工作的需要, 提出燃料电池等高度可控的分布式电源在经 VSI 接入系统时参与频率和电压调节, 协同随机性较大的分布式能源如风力发电系统更好的工作, 提高输出电能质量。

文章从介绍不间断电力变电站的构成开始, 在风力发电系统和固体氧化物燃料电池详细数学模型的基础上, 给出燃料电池在同并网风力发电系统并联运行时候的 VSI 控制策略, 最后通过仿真验证了这种控制策略的有效性。

## 1 不间断电力变电站的构成

我国风能资源丰富, 全国可供开发利用的风能资源总量为 253GW。风力发电<sup>[10, 11]</sup>是目前新能源开发中技术最成熟、最具规模化商业开发前景的发电方式。由于风速决定风力发电机的最大输出功率, 因此其输出功率具有很大的随机性, 但用户却希望电能输出较为确定。引入储能装置可以使随机性电源的功率输出较平滑。

燃料电池<sup>[12, 13]</sup>是一种利用燃料和氧化剂产生电能的系统。燃料可以是氢气、碳氢化合物、天然气、甲醇甚至是汽油等, 在催化剂的作用下, 燃料慢慢的与空气或氧气之类的氧化剂相结合, 可以不断的产生电流。它具有能量转化效率高、适应负荷变化能力强和燃料适应性强等优点。

随着燃料电池技术的突破和制氢技术的发展, 燃料电池可以与风力发电系统构成“风力发电制氢储能—燃料电池发电系统”, 以制氢储能代替传统的蓄电池储能环节。当风源情况良好时, 通过电解水制氢将多余的电能储存起来; 在风力不足时, 将储存的氢通过燃料电池再转换为电能, 继续向负荷供电, 从而保证了系统供电的连续性和稳定性。文献[1]详细介绍了基于多代理技术的不间断电力变电站设计方案。

综上所述, 不间断电力变电站的结构示意图如图 1。



图 1 不间断电力变电站示意图

Fig.1 Structure of uninterrupted power substation

## 2 风力发电系统模型<sup>[14]</sup>

### 2.1 风力发电系统的构成

文章中采用变速风力机驱动同步交流发电机

经换流器与系统联网的模型, 变频器(换流器)用于耦合同步交流发电机转速和电网频率, 如图 2 所示。

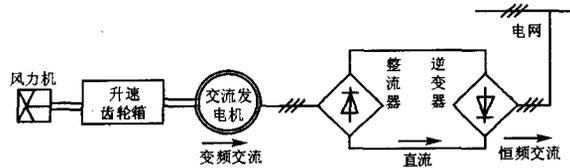


图 2 风力机驱动交流发电机经整流-逆变装置与电网连接图

Fig.2 Wind turbine connected to the grid through a converter

### 2.2 风力机方程

假定风力机的偏航系统已经将风力发电机组的主轴调整到与风向垂直的方向, 自然风速采用下式模拟<sup>[2]</sup>:

$$v_w = v_{base} + A \sin(\omega t) + v_{noise} \quad (1)$$

其中:  $v_w$  为输入到仿真系统中的风速,  $v_{base}$  为平均风速,  $A$  为正弦调制振幅,  $v_{noise}$  为均值为零方差为 1 的白噪声。

风力机模型为:

$$T_m = \frac{P_w}{\omega_m} \quad (2)$$

$$P_w = \frac{\rho}{2} c_p (\lambda, \theta_p) A_r v_w^3 \quad (3)$$

$$c_p = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda} - 0.4\theta_p - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda}} \quad (4)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\theta_p} - \frac{0.035}{\theta_p^3 + 1} \quad (5)$$

其中:  $T_m$  为机械转矩,  $P_w$  为风力产生的机械功率,  $\omega_m$  为转子转速,  $\rho$  为空气密度,  $A_r$  为扫风面积,  $c_p$  为风能利用系数,  $\lambda$  为叶尖速比,  $\theta_p$  为调节桨距角。  $\theta_p$  的控制方程为:

$$\dot{\theta}_p = (K_p \phi (\omega_m - \omega_{ref}) - \theta_p) / T_p \quad (6)$$

### 2.3 交流同步电机方程

交流同步电机的定子电压方程为:

$$v_{ds} = -r_s i_{ds} + \omega_m x_q i_{qs} \quad (7)$$

$$v_{qs} = -r_s i_{qs} - \omega_m (x_d i_{ds} - \psi_p)$$

其中:  $\psi_p$  表示转子回路的磁链。

而交流同步电机的有功和无功功率如下:

$$P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \quad (8)$$

$$Q_s = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}$$

同步发电机转子运动方程为:

$$\dot{\omega}_m = (T_m - T_e) / 2H_m \quad (9)$$

$$T_e = \psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}$$

其中:  $\omega_m$ 、 $T_e$  分别为转子转速和电磁转矩。

其定子磁链方程为:

$$\dot{\psi}_{ds} = -x_d i_{ds} + \psi_p \quad (10)$$

$$\dot{\psi}_{qs} = -x_q i_{qs}$$

## 2.4 换流器方程

注入网络的功率由网络侧的换流器电流决定:

$$P_c = v_{dc} i_{dc} + v_{qc} i_{qc} \quad (11)$$

$$Q_c = v_{qc} i_{dc} - v_{dc} i_{qc}$$

其中  $i_{dc}$ 、 $i_{qc}$ 、 $v_{dc}$ 、 $v_{qc}$  分别为网络侧的换流器电流和电压的交、直轴分量。换流器电压是网络电压幅值和相角的函数:

$$v_{dc} = V \sin(-\theta) \quad (12)$$

$$v_{qc} = V \cos(\theta)$$

假设换流器没有损耗且功率因数为 1, 则:

$$P_c = P_s \quad (13)$$

注入网络的无功功率通过换流器直流电流  $i_d$  来控制, 从而注入系统的无功功率为:

$$Q_c = V \cdot i_d / \cos(\theta) + \tan(\theta) P_s \quad (14)$$

换流器动态高度简化, 用理想电流源表示。

$i_{qs}$ 、 $i_{ds}$ 、 $i_d$  为状态变量, 分别用于转速控制、无功功率控制和电压控制, 有如下微分方程:

$$\dot{i}_{qs} = (i_{qsref} - i_{qs}) / T_{ep} \quad (15)$$

$$\dot{i}_{ds} = (i_{dsref} - i_{ds}) / T_{ep}$$

$$\dot{i}_d = (K_v (V_{ref} - V) - i_d) / T_v$$

其中:

$$i_{qsref} = \frac{P_\omega^*(\omega_m)}{\omega_m (\psi_p - x_d i_{ds})} \quad (16)$$

$$i_{dsref} = \frac{\psi_p}{x_d} - \sqrt{\frac{\psi_p^2}{x_d^2} - \frac{Q_{ref}}{\omega_m x_d}}$$

其约束条件为:

$$i_{qsmax} = -P_{min} \quad (17)$$

$$i_{qsmin} = -P_{max}$$

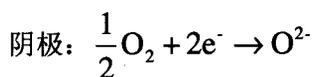
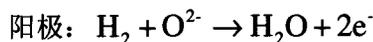
$$i_{dsmax} = i_{dcmax} = -Q_{min}$$

$$i_{dsmin} = i_{dcmin} = -Q_{max}$$

## 3 固体氧化物燃料电池及其与系统联网模型

### 3.1 SOFC 数学模型<sup>[15]</sup>

燃料电池是一种把贮存在燃料和氧化剂中的化学能直接转化为电能的能量转化装置。固体氧化物燃料电池 (SOFC) 的运行效率很高, 是目前燃料电池电厂较常采用的一种。其两电极的基本化学反应可以描述为,



根据 Nernst 方程, SOFC 的直流电压为:

$$\dot{V}_{dc} = \left( -V_{dc} - R I_{dc} + N_0 \left( E_0 + \frac{RT}{2F} \ln(p_{H_2} \sqrt{p_{O_2}} / p_{H_2O}) \right) \right) / T_c \quad (18)$$

$$K_r = N_0 / 2F$$

$p_{H_2}$ 、 $p_{H_2O}$ 、 $p_{O_2}$  由下式给出:

$$\dot{p}_{H_2} = - \left( (q_{H_2} - 2K_r I_{dc}) / K_{H_2} + p_{H_2} \right) / T_{H_2}$$

$$\dot{p}_{H_2O} = - \left( 2K_r I_{dc} / K_{H_2O} + p_{H_2O} \right) / T_{H_2O} \quad (19)$$

$$\dot{p}_{O_2} = - \left( (q_{H_2} / r_{HO} - K_r I_{dc}) / K_{O_2} + p_{O_2} \right) / T_{O_2}$$

$$\dot{q}_{H_2} = (2K_r I_{dc} / U_{opt} - q_{H_2}) / T_f$$

其中:  $q_{H_2}$  是氢的摩尔流量,  $K_{H_2}$ 、 $K_{H_2O}$ 、 $K_{O_2}$  分别是氢、水和氧流的阀摩尔系数,  $T_{H_2}$ 、 $T_{H_2O}$ 、 $T_{O_2}$  则是它们各自的响应时间常数,  $r_{HO}$  是氢氧比率,  $r$  为欧姆损耗,  $U_{opt}$  是燃料最优利用率,  $T_f$  燃料处理响应时间常数,  $T_e$  电气响应时间常数,  $R$  是气体密度常数,  $F$  是法拉第常数,  $T$  是绝对气温,  $N_0$  是电池串联数,  $K_r = N_0 / 2F$ 。

SOFC 采用定功率控制时, 燃料电池电流为:

$$I_{dc} = (P_{ref} / V_{dc} - I_{dc}) / T_e \quad (20)$$

采用定电流控制时, 燃料电池电流为:

$$I_{dc} = (P_{ref} / V_{dc,ref} - I_{dc}) / T_e \quad (21)$$

其中:  $V_{dc,ref}$  是燃料电池直流电压初始值。

考虑到燃料流的动态极限, 则有:

$$I_{dc} = \left( \frac{U_{lim} q_{H_2}}{2K_r} - I_{dc} \right) / T_e \quad (22)$$

其中:  $U_{lim} = \{U_{max}, U_{min}\}$  是燃料电池燃料的最大和

最小利用率。

### 3.2 与系统联网模型<sup>[16]</sup>

对于整个电力系统的稳定运行而言,系统产生的功率和消耗功率之间的平衡是十分重要的,二者之间的不平衡会导致旋转电机注入系统能量的变化,从而影响电机的转速和电网的频率。传统可控(频率和电压都可控制)电力变电站,系统频率变化同变电站有功功率变化有着相应的线性关系,系统频率变化会使变电站有功功率相应的变化,同样,当负荷有功功率发生 $\Delta P$ 的变化后,系统频率也会随之改变,直到发电功率和负荷功率达到一个新的平衡。

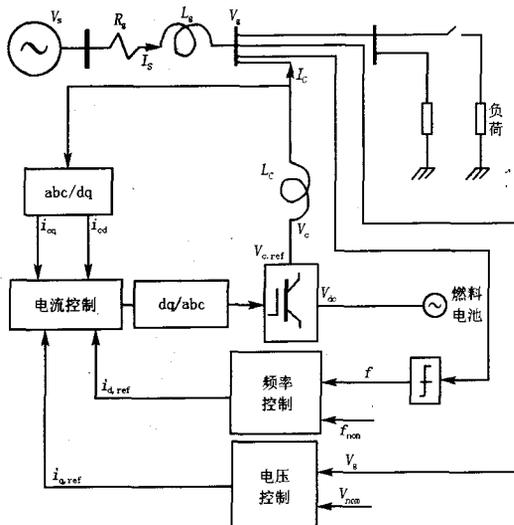


图3 燃料电池接口控制原理

Fig.3 Control principle of distributed generation connected to the grid

本文所构造的不间断电力变电站同传统电力变电站的区别就是加入了风力发电、燃料电池发电等分布式电源。如果这些分布式电源加入变电站后不参与变电站的频率调节,由于有功功率的增加,势必会引起频率变化,只能通过改变变电站中同步电机出力来调节频率的变化,再由于风力机功率输出的随机性,将会使输出电能质量大幅降低。因此,考虑到SOFC具有能量转化效率高且平稳、适应负荷变化能力强和高度可控的优点,在SOFC通过采用PWM技术的电压源型逆变器(VSI)接入交流电网的同时,参与系统的频率调节和电压调节,更好地配合风力发电系统的并网运行。接入系统原理图如图3所示。

#### 1) 数学模型

VSI 根据控制回路获取输入电压信号 $V_{c,ref}$ 来调节燃料电池注入网络的电流 $I_c$ , VSI的调节系数 $m$ 为:

$$\dot{m} = (K_m (V_{c,ref} - V_c) - m) / T_m \quad (23)$$

在如图3所示的控制系统中,采用派克变换,将输出电流 $I_c$ 分解成直轴和交轴分量,即:

$$\begin{pmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ 0 & 1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{pmatrix} \quad (24)$$

其中: $\theta$ 为VSI电压相角,同时,与经过频率控制和电压控制产生的控制信号 $i_{d,ref}$ 、 $i_{q,ref}$ 一起进行电流控制,根据图3所示关系,有

$$I_c(t) = \frac{1}{L_c} \int [V_c(t) - V_g(t)] dt \quad (25)$$

将电流信号转变成电压信号 $V_{cd}$ 和 $V_{cq}$ ,最后利用派克反变换

$$\begin{pmatrix} v_{cd,ref} \\ v_{cq,ref} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} v_{cd} \\ v_{cq} \end{pmatrix} \quad (26)$$

得到电压参考信号 $v_{c,ref}$ 。

#### 2) 控制器设计

##### A. 频率控制器

派克变换后,分布式电源注入网络的功率为: $P = v_d i_d + v_q i_q$ ,  $v_d$ 和 $v_q$ 是VSI交流侧电压 $v_g$ 的直轴和交轴分量, $i_d$ 、 $i_q$ 是交流侧电流 $I_c$ 的直轴和交轴分量,可将 $v_g$ 的方向定位在同步转轴的的直轴方向,则有: $v_d = v_g$ ,  $v_q = 0$ ,  $P = v_g i_d$ 。又因频率变化和发电机有功功率的变化有类似线性关系, $\Delta p = k_{inv} \cdot \Delta f$ ,  $k_{inv}$ 为分布式电源逆变侧调节器增益。所以,两式结合可写为:

$$\Delta i_d = \frac{k_{inv}}{v_g} \Delta f = k_d \Delta f \quad (27)$$

根据式(27),得出频率控制器的控制原理,如图4(a), $\Delta i_d$ 与 $I_{set}$ 产生直轴电流参考信号 $i_{d,ref}$ ,  $I_{set}$ 的值要略低于分布式电源最大出力时候的电流值。

##### B. 电压控制器

同样,在派克变换后,q轴分量对应无功功率,母线电压 $v_g$ 和参考电压 $V_{nom}$ 的比较信号通过一个积分环节,可以得到交轴电流参考信号 $i_q$ ,如图4(b)。

##### C. 电流控制器

由式 $I_c(t) = \frac{1}{L_c} \int [V_c(t) - V_g(t)] dt$ ,将d轴和q

轴电流信号经过 PI 控制再各自加上  $v_g$  的 d 轴和 q 轴分量得到  $V_{cd,ref}$  和  $V_{cq,ref}$ , 如图 4(c)。

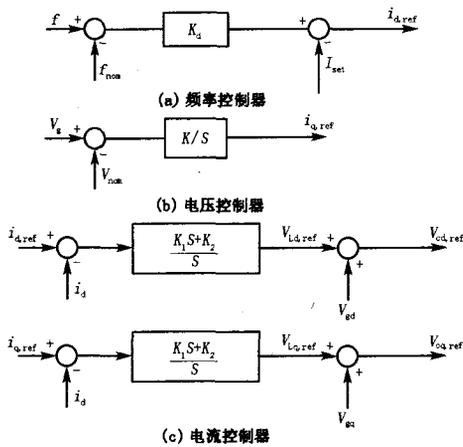


图 4 控制器  
Fig.4 Controller

通过上述控制器让燃料电池直接参与到系统的频率和电压调节中去, 采取对系统接入点的频率和电压的 PID 控制, 能够有效地抑制由电源或负荷引起的功率波动, 稳定输出电压, 提高系统的输出电能质量, 详见仿真分析。

4 仿真分析

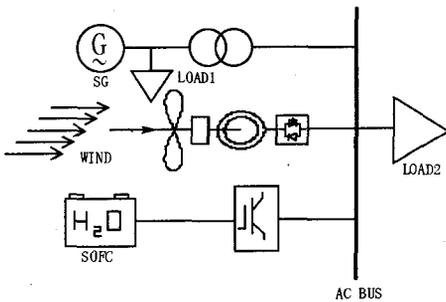


图 5 风力发电—燃料电池系统  
Fig.5 Power system consist of wind and fuel

基于上述风力发电系统和固体氧化物燃料电池模型, 应用 Matlab 仿真软件将这两种分布式电源接入传统 35/10 kV 电力变电站进行仿真, 仿真示意图如图 5。分别对风力机单独并网运行和燃料电池与风力机并联运行做研究, 考察燃料电池采取本文所提出的 VSI 控制策略并网后对风力发电系统的随机性引起的功率波动的补偿作用。

系统主要仿真参数如下: 同步发电机容量 10 MVA, 风力发电机容量 1 MVA, 燃料电池发电容量 1 MVA, 35kV 母线上负荷 Load1 容量 10 MVA, 10 kV 侧母线负荷 Load2 容量为 2 MVA, 负荷功率因数均为 0.8。风力发电及燃料电池控制系统参数见表 1。

表 1 控制系统参数

Tab.1 Parameters of the control system

风力发电	$K_v$	$T_v$	$K_p$	$T_p$	$T_{ep}$	$T_{eq}$
	10	1	10	3	0.01	0.01
燃料电池	$K_m$	$T_m$	$T_c$	$T_f$	$U_{opt}$	$T_{H2}$
	100	10	0.8	5	0.85	26.1
	$T_{H_2O}$	$T_{O_2}$	$K_d$	$K$	$K_1$	$K_2$
	78.3	2.91	3.5	20	0.5	100

Matlab 仿真波形见图 6~11。

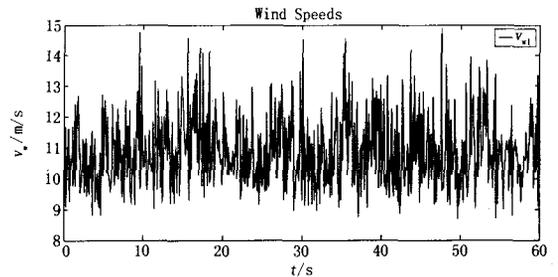


图 6 风速曲线  
Fig.6 Curve of the wind

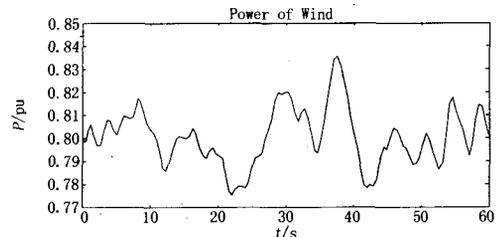


图 7 风力机输出功率  
Fig.7 Power of the wind turbine

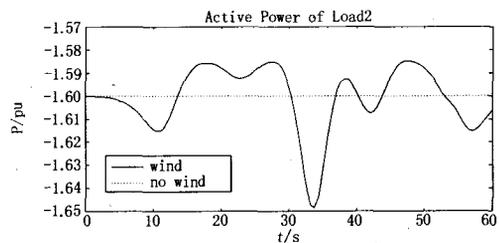


图 8 风力机单独加入前后负荷 2 有功功率  
Fig.8 Active power of load2 before and after the wind power generation connected to the system

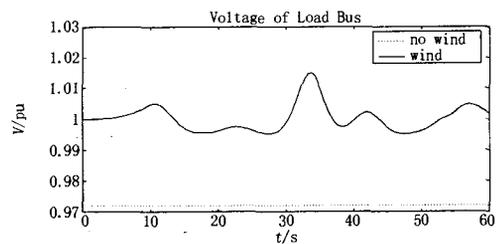


图 9 风力机单独加入前后母线电压  
Fig.9 Voltage of load bus before and after the wind power generation connected to the system

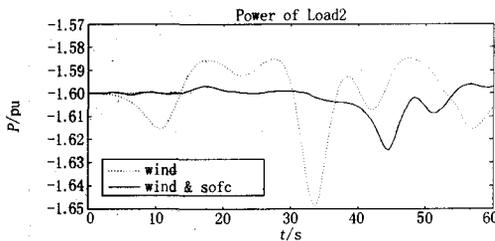


图 10 燃料电池加入前后负荷 2 有功功率

Fig.10 Active power of load2 before and after the fuel cell connected to the system

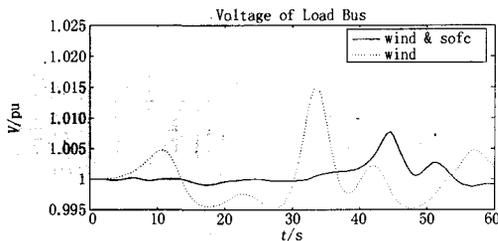


图 11 燃料电池加入前后母线电压

Fig.11 Voltage of load bus before and after the fuel cell connected to the system

可见, 由于风速的随机性, 风力发电机加入配电系统后, 负荷电压、有功功率都发生了波动; 而当燃料电池接入系统时参与系统电压和频率调节后, 整个系统的运行效果得到了明显的改善, 负荷母线电压波动幅度降低, 波动频率减小, 有功功率的波动也大幅减小。

## 5 结论

基于分布式发电和储能技术的新型不间断电力变电站将是未来分布式电源的主要应用形式, 根据各分布式电源的特点, 在接入系统时采取不同的 VSI 控制策略, 特别是燃料电池等储能单元由于可控性高, 输出功率比较平稳, 在接入时参与系统的频率和电压控制, 能够有效的和其它分布式电源协调工作, 平滑其功率输出, 提高整个变电站的输出电能质量。

## 参考文献

- [1] 罗凯明, 李兴源. 基于多代理技术的不间断电力变电站设计方案[J]. 电网技术, 2004, 28(22):1-5.  
LUO Kai-ming, LI Xing-yuan. Study on Multi-agent System Based Uninterrupted Power Substation Control System[J]. Power System Technology, 2004, 28(22):1-5.
- [2] 王建, 李兴源, 邱晓燕. 含有分布式发电装置的电力系统研究综述[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24).  
WANG Jian, LI Xing-yuan, QIU Xiao-yan. Power

- System Research on Distributed Generation Penetration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24).
- [3] 李蓓, 李兴源. 分布式发电及其对配电网的影响[J]. 国际电力, 2005, 9(3):45-49.  
LI Bei, LI Xing-yuan. Distributed Generation Sources and Their Effects on Distribution Networks[J]. International Electric Power for China, 2005, 9(3):45-49.
- [4] Delfino B. Modeling of the Integration of Distributed Generation Into the Electrical System[A]. In: Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Summer Conference [C]. Chicago(United States):2002.170-175.
- [5] Slootweg J G, Haan S W H, Polinder H, et al. Modeling New Generation and Storage Technologies in Power System Dynamics [A]. In: Proceedings of the IEEE Power Engineering Transmission and Distribution Summer Conference[C]. Chicago(United States):2002.868-873.
- [6] Marei M I, El-Saadany E F, Salama M M A. Flexible Distributed Generation[A]. In: Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference[C]. Chicago(United States):2002. 49-53.
- [7] Marei M I, El-Saadany E F, Salama M M A. A Novel Control Algorithm for the DG Interface to Mitigate Power Quality Problems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(3):1384-1392.
- [8] Marei M I, Abdel-Galil T K, El-Saadany E F, et al. Hilbert Transform Based Control Algorithm of the DG Interface for Voltage Flicker Mitigation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2):1129-1133.
- [9] Prodanovic M, Green T C. Control of Power Quality in Inverter-based Distributed Generation IECON - 2002[A]. In: 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society[C]. 2002.
- [10] 杨秀媛, 梁贵书. 风力发电的发展及其市场前景[J]. 电网技术, 2003, 27(7):78-79.  
YANG Xiu-yuan, LIANG Gui-shu. Development of Wind Power Generation and Its Market Prospect[J]. Power System Technology, 2003, 27(7): 78-79.
- [11] 王承煦, 张源. 风力发电[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.  
WANG Cheng-xu, ZHANG Yuan. Wind Power Generation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [12] 靳智平. 燃料电池发电技术在我国电力系统的应用[J]. 电力学报, 2004, 19(1):4-6.  
JIN Zhi-ping. The Application Prospect of the Technology of Fuel Cell Generating Electricity in China Electric Power System[J]. Journal of Electric Power, 2004, 19(1): 4-6.

(下转第 22 页 continued on page 22)

该线路无功优化前网损为 9.68%，从表 1 计算结果可以看出，改进排挤小生境自适应遗传算法比传统遗传算法的优化结果要好，能更大限度的降低线路的网损率，提高运算速度，节省运行时间，缩短投资回收期。

## 5 结论

针对配电网的特点确定了无功优化的数学模型，建立了以投资回收年限作为评价电容器安装方案经济效益优劣标准的目标函数，通过采用改进排挤小生境自适应遗传算法，编制了配电网无功优化计算程序，在实际配电网中进行计算结果表明，改进排挤小生境自适应遗传算法收敛速度快，具有更高的实用性。

## 参考文献

- [1] 颜伟, 孙渝江, 罗春雷, 等. 基于专家经验的进化规划力法及其在无功优化中的应用[J]. 中国电机工程学, 2003, 23(7): 76-80.  
YAN Wei, SUN Yu-jiang, LUO Chun-lei, et al. EP Basing on Specialist Experiences and Its Application to Var Optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 76-80.
- [2] 基于遗传算法的城市配电网无功综合优化[D]. 北京: 华北电力大学, 2001.  
Reactive Power Optimization Based on Genetic Algorithm in City Distribution Network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2001.
- [3] 徐郑. 配电网 10 kV 馈线及配变的无功规划研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2005.  
XU Zheng. Research on Reactive Power Planning on 10 kV Feeders and Transformers in Distribution Network[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.
- [4] 任晓娟, 邓佑满, 赵长城, 等. 高中压配电网动态无功优化算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 31-36.  
REN Xiao-juan, DENG You-man, ZHAO Chang-cheng, et al. Study on the Algorithm for Dynamic Reactive Power Optimization of Distribution System[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 31-36.
- [5] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [6] 向铁元, 周青山, 李富鹏, 等. 小生境遗传算法在无功优化中的应用研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 48-51.  
XIANG Tie-yuan, ZHOU Qing-shan, LI Fu-peng, et al. Research on Niche Genetic Algorithm for Reactive Power Optimization. [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 48-51.

收稿日期: 2006-12-04 修稿日期: 2007-01-11

作者简介:

张敬平(1981-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析运行与控制; E-Mail: jingpingzhang2005@163.com

梁志瑞(1959-), 男, 教授, 从事电力系统自动化、电气设备参数测量技术及故障分析的的教学与研究工。

(上接第 18 页 continued from page 18)

- [13] 李瑛, 王林山. 燃料电池[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.  
LI Ying, WANG Lin-shan. Fuel Cell[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2000.
- [14] Milano F. Power System Analysis Toolbox Documentation for PSAT[M]. 2005.
- [15] Miao Z, Choudhry M A, Klein R L, et al. Study of a Fuel Cell Power Plant in Power Distribution System, Part I: Dynamic Model[A]. In: IEEE Power Engineering Society General Meeting[C]. 2004.
- [16] Winjnbergen S, de Haan S W H, Slootweg J G A System

for Dispersed Generator Participation in Voltage Control and Primary Frequency Control of the grid[A]. In: IEEE 36<sup>th</sup> Conference on Power Electronics Specialists[C]. 2005.

收稿日期: 2006-11-25 修回日期: 2006-12-20

作者简介:

李峰(1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: lifengwx@163.com

李兴源(1945-), 男, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 研究方向为电力系统分析, 电力系统稳定和控制等方面。