

面向负荷的光伏电池和 燃料电池建模及其等效描述

钱军, 李欣然, 王玲, 马亚辉

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410082)

Load Modeling Oriented Modeling of Photovoltaic Cell and Fuel Cell and Its Equivalent Description

QIAN Jun, LI Xinran, WANG Ling, MA Yahui

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China)

ABSTRACT: To research the impacts of photovoltaic cell (PV) and fuel cell (FC) on characteristics of composite load at distribution network side, on the basis of building generation system based on PV and FC, the models of functional modules and grid-connection strategy are expounded; by means of analyzing steady state characteristics of PV and FC as well as their external characteristics of grid-connection control, a equivalent description model with constant power control for generation system based on PV and FC is proposed. Results of case simulation show that the voltage source with constant power control can equivalently describe the pseudo-external characteristic of generation system based on PV and FC better, and then a structure of generalized composite load model for induction motors parallelly connected with static load and DC distributed generation is put forward.

KEY WORDS: distributed generation; load modelling; photovoltaic cell; fuel cell

摘要: 为研究光伏电池(photovoltaic cell, PV)和燃料电池(fuel cell, FC)对配网侧综合负荷特性的影响, 构建了 PV 和 FC 发电系统并研究了各功能模块的模型和并网控制策略; 通过分析 PV 和 FC 的稳态特性和并网控制外特性, 提出了 PV 和 FC 发电系统恒功率控制的电压源等效描述模型。实例仿真结果表明, 恒功率控制的电压源能等效描述 PV 和 FC 发电系统的拟负荷外特性。基于此, 提出了感应电动机并联静态负荷和直流分布式电源的广义综合负荷模型结构。

关键词: 分布式发电; 负荷建模; 光伏电池; 燃料电池

0 引言

随着全球气候环境的恶化, 节能减排、绿色能

源、可持续发展成为现阶段各国关注的重点。人们对电网安全、经济、交互等方面的需要和用户对电能质量的高要求, 促使传统电网需向智能电网转变^[1-3]。分布式发电(distributed generation, DG)技术作为智能电网的重要组成部分, 因其大量使用诸如太阳能、风能等清洁、可再生能源, 在各国发电装机容量中所占比例日益增大。

光伏电池(photovoltaic cell, PV)和燃料电池(fuel cell, FC)作为 2 种典型分布式电源, 因其清洁、环保、高效等特点而备受关注^[4-6], 其共同特点就是产生的都是直流电。作为典型的小容量直流分布式电源, PV 和 FC 大多接入电网 10 kV 及以下配网侧, 而在电力系统仿真计算中, 负荷模型是对主网变电站母线综合负荷特性的等值描述, 这种综合负荷成份自然也包括了 PV 和 FC。因此, 研究面向负荷的 PV 和 FC 建模及其等效描述, 提出能较准确描述其特性的综合负荷模型结构, 是 PV 和 FC 广泛应用的一个重要条件。

然而, 在 PV 和 FC 建模方面, 尽管国内外学者提出了诸如基于 BP 神经网络的 PV 模型^[7]、非线性 FC 模型^[8]、基于神经模糊辨识的 FC 模型^[9]等, 但这些模型较为复杂, 在电力系统仿真计算中应用有较大难度, 且没有针对负荷建模的等效描述模型, 不适合考虑 PV 和 FC 的配网侧综合负荷建模研究。

基于此, 本文首先对 PV 和 FC 发电系统各模块进行建模, 研究该直流电源并网控制策略; 然后根据其运行特性, 提出适合描述其外特性的等效描述模型, 进行仿真计算和比较分析; 在此基

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50977023)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50977023).

基础上提出能描述考虑 PV 和 FC 的配网侧综合负荷模型结构。

1 光伏电池发电系统建模与控制

1.1 光伏发电系统的供电模式

光伏发电是在一定条件下使太阳能直接转化为电能的过程，在转化过程中，没有污染和噪声，因此作为一种清洁环保和可再生的分布式发电方式被各国应用。按照制造光伏电池的材料不同，可以把光伏电池分成 4 种类型：单晶硅电池、多晶硅电池、薄膜电池和非晶硅电池。本文研究以单晶硅为例，其它类型可通过适当的数学转换转为这种类型。光伏发电的一个主要特点就是受气候条件(光照强度、温度等)因素影响显著，为减少这些因素对用户的影响，可以用由光伏电池阵列、最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)、脉冲调制(pulse width modulation, PWM)、DC/DC 变换器、蓄电池、并网逆变单元等部分构成的光伏发电系统对用户进行供电，供电模式如图 1 所示。

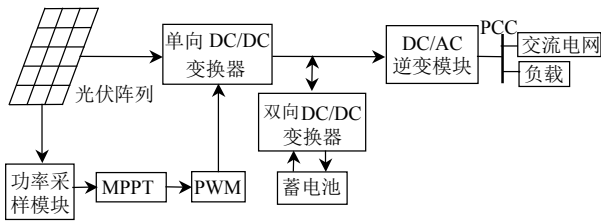


图 1 光伏发电系统供电模式

Fig. 1 Power supply mode of PV system

1.2 光伏电池阵列数学模型

光伏电池阵列由单个的光伏电池串联、并联或串并联相结合连接而成，每一个电池本质上等效为一个 P-N 结，基本特性与二极管类似，直接将光能转换成电能，其等效电路如图 2 所示^[10]。

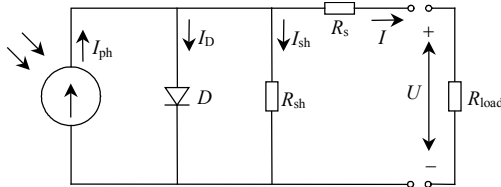


图 2 光伏电池的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of a PV module

单个光伏电池的输出电流可以由以下数学表达式来描述

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (1)$$

式中： I_D 表示单晶硅的短路电流； I_{sh} 指的是电池对地的泄漏电流； I_{ph} 表示单晶硅的光电流强度，其大

小主要与太阳日照强度和电池温度有关，可描述为

$$I_{ph} = \frac{G}{1000} [I_{SCR} + K_1(T - T_r)] \quad (2)$$

式中： G 为太阳日照强度； I_{SCR} 为在太阳日照强度为 1000 W/m^2 、参考温度为 25°C 时的电池短路电流； K_1 为电池短路电流温度系数； T 为电池温度； T_r 为参考温度， $T_r=25^\circ\text{C}$ 。

式(1)中 I_D 的大小与光伏电池的温度和输出电压有关，可表达为

$$I_D = I_{os} (\exp \frac{qU_{oc}}{AKT} - 1) \quad (3)$$

$$I_{os} = I_{or} (\frac{T}{T_r})^3 \exp[\frac{qE_{GO}}{BK} (\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T})] \quad (4)$$

$$U_{oc} = U + IR_s \quad (5)$$

式中： I_{os} 为电池反向饱和电流； U_{oc} 为电池开路电压； q 为电子电荷， $q=1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ； A 、 B 为 P-N 结理想因子； K 为波尔兹曼常数； T 为电池温度； T_r 为参考温度， $T_r=301.18 \text{ K}$ ； I_{or} 为在参考温度下的电池饱和电流； E_{GO} 为带隙硅常数； U 为电池的输出电压； R_s 为电池的等效串联电阻。

式(1)中的 I_{sh} 可以用下式表达

$$I_{sh} = \frac{U_{oc}}{R_{sh}} = \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (6)$$

式中 R_{sh} 为电池的等效并联电阻。

将式(3)—(6)代入(1)可以得到

$$I = I_{ph} - I_{os} [\exp \frac{q(U + IR_s)}{AKT} - 1] - \frac{(U + IR_s)}{R_{sh}} \quad (7)$$

由于一个光伏阵列通常由几个光伏电池串联、并联或串并联结合连接而成，故光伏阵列的输出电压 U_{pv} 和电流 I_{pv} 与单个光伏电池的输出电压 U 和电流 I 的关系为

$$\begin{cases} U_{pv} = n_s U \\ I_{pv} = n_p I \end{cases} \quad (8)$$

式中： n_s 表示每组串联的光伏电池个数； n_p 表示一个光伏阵列并联的组数。

将式(8)代入式(7)可以得到一个光伏阵列等效的数学模型，通常可以表示为

$$I_{pv} = n_p I_{ph} - n_p I_{os} [\exp \frac{q(U_{pv}/n_s + I_{pv}R_s/n_p)}{AKT} - 1] - \frac{(n_p U_{pv}/n_s + I_{pv}R_s)}{R_{sh}} \quad (9)$$

光伏阵列的输出功率是电流与终端电压的乘积，其数学表达式为

$$P = n_p I_{ph} U_{pv} - n_p I_{os} \left[\exp \frac{q(U_{pv} / n_s + I_{pv} R_s / n_p)}{AKT} - 1 \right].$$

$$U_{pv} = \frac{(n_p U_{pv} / n_s + I_{pv} R_s) U_{pv}}{R_{sh}} \quad (10)$$

1.3 最大功率点跟踪控制

如何有效地降低光伏电池设计成本、提高发电效率是光伏电池广泛推广应用的难点。采用最大功率点跟踪技术可以最大限度提高光伏电池输出功率，从而显著提升光伏电池的工作效率。目前，常用的最大功率点跟踪算法有扰动观测法、恒电压控制法、电导增量法等。本文采用扰动观测法，通过成比例的增加或减少升压式 DC/DC 变换器的输入电压，移动操作点向最大功率点靠近，同时计算升压变换器的占空比，达到控制光伏阵列始终在最大功率点运行的目的，提高光伏阵列的工作效率。

基于 MATLAB/Simulink 构建的 MPPT 模块、PWM 模块、单向 DC/DC 变换器模块的详细设计、建模与仿真参照文献[11]。

1.4 蓄电池模型

光伏阵列通过 DC/DC 变换器稳压输出供给负载，当光照较强时，多余的电能向蓄电池充电；当负载所需电能不够时，由蓄电池放电来补充。蓄电池等效电路如图 3 所示。

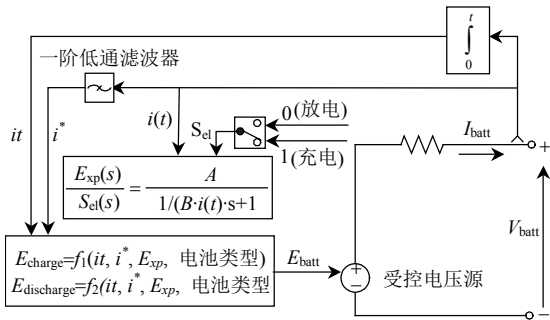


图 3 蓄电池等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of the battery

对铅酸蓄电池而言，放电模式($i^* > 0$)下，有

$$E_{batt} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + L_{aplace}^{-1} \left(\frac{E_{xp}(s)}{S_{el}(s)} \cdot 0 \right) \quad (11)$$

充电模式($i^* < 0$)下，有

$$E_{batt} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + 0.1Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + L_{aplace}^{-1} \left[\frac{E_{xp}(s)}{S_{el}(s)} \cdot \frac{1}{s} \right] \quad (12)$$

式中： E_{batt} 为蓄电池非线性电压； E_0 为蓄电池恒定电压； $E_{xp}(s)$ 为指数域动态值； $S_{el}(s)$ 为电池运行模式，

0 表示放电，1 表示充电； L_{aplace}^{-1} 为拉普拉斯逆变换； K 为极化常数； i^* 为低频电流动态值； i 为电池电流； Q 为最大电池容量； A 为指数电压； B 为指数容量。

本文基于 MATLAB/Simulink 搭建的铅酸蓄电池模型，采用文献[12]的双向 DC/DC 变换器控制策略，构建了蓄电池充放电模块。

2 燃料电池发电系统建模

2.1 燃料电池发电系统供电模式

燃料电池发电是在一定条件下使氢气、天然气或煤气与氧化剂发生电化学反应，将化学能直接转化为电能的过程。FC 与 PV 一个最大的区别就是不受气候条件等因素影响，只要燃料和氧化剂供给，FC 就会有持续不断的电力输出，具有能量转化效率高、洁净、无污染、噪声低等优点。燃料电池发电系统一般由燃料电池堆、DC/DC 变换器、DC/AC 逆变控制模块等构成，其供电模式如图 4 所示。图中，PCC 为公共连接点(point of common coupling, PCC)。

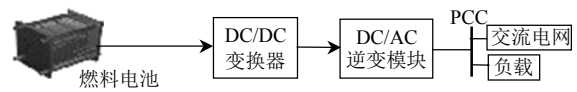


图 4 燃料电池发电系统供电模式

Fig. 4 Power supply mode of fuel cell system

适用于分布式发电应用的燃料电池有质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)、熔融碳酸盐燃料电池(molten carbonate fuel cell, MCFC)和固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)。常用的燃料电池数学模型有机理模型、经验模型和半经验模型，前面 2 种模型一般比较复杂，难以操作，且不适合用于负荷建模的研究。本文以 SOFC 为例，建立既能简单模拟电池堆性能又能进行负荷建模研究的半经验模型。

2.2 基本假设

本文建立的 SOFC 数学模型基于下面基本假设：1) 气体是理想气体，燃料为 H_2 ，氧化剂为 O_2 ；2) 电池工作在恒温，且温度分布均匀；3) 忽略电池对环境的热量损失；4) 不考虑水管理和系统湿度；5) 可以用能斯特方程来计算电压。

2.3 数学模型

2.3.1 气体状态方程

根据理想气体状态方程，可以得到 H_2 、 O_2 和水蒸气的微分方程如下

$$\begin{cases} \frac{dP_{H_2}}{dt} = \frac{RT}{V_a} (N_{H_2}^{in} - N_{H_2}^{out} - N_{H_2}^r) \\ \frac{dP_{O_2}}{dt} = \frac{RT}{V_{ca}} (N_{O_2}^{in} - N_{O_2}^{out} - N_{O_2}^r) \\ \frac{dP_{H_2O}}{dt} = \frac{RT}{V_a} (N_{H_2O}^{in} - N_{H_2O}^{out} + N_{H_2O}^p) \end{cases} \quad (13)$$

式中： R 是通用气体常数， $8.314\text{J/mol}\cdot\text{K}$ ； T 是工作温度； P_{H_2} 、 P_{O_2} 、 P_{H_2O} 分别是 H_2 、 O_2 、水蒸气的压力； $N_{H_2}^{in}$ 、 $N_{O_2}^{in}$ 、 $N_{H_2O}^{in}$ 分别为这 3 种气体输入的摩尔流量，而水蒸气是电池反应时在电池内部产生的； $N_{H_2}^{out}$ 、 $N_{O_2}^{out}$ 、 $N_{H_2O}^{out}$ 是这 3 种气体输出的摩尔流量； $N_{H_2}^r$ 、 $N_{O_2}^r$ 、 $N_{H_2O}^p$ 分别为这 3 种气体反应消耗或生成的摩尔流量； V_a 、 V_{ca} 分别为电池阳极、阴极的体积。

根据 FC 原理的电化学关系，得到消耗、生成的气体与电池堆电流关系为

$$N_{H_2}^r = 2N_{O_2}^r = N_{H_2O}^p = 2K_r I \quad (14)$$

式中： $K_r = N_0/4F$ ， N_0 为串联电池的数量； F 是法拉第常数， 96487C/mol ； I 为 FC 堆电流。

此外 3 种气体的输出流量可定义为

$$\begin{cases} N_{H_2}^{out} = K_{H_2} P_{H_2} \\ N_{O_2}^{out} = K_{O_2} P_{O_2} \\ N_{H_2O}^{out} = K_{H_2O} P_{H_2O} \end{cases} \quad (15)$$

式中 K_{H_2} 、 K_{O_2} 、 K_{H_2O} 是 H_2 、 O_2 和水蒸气的阂摩尔常数。

将式(14)(15)带入式(13)得到 H_2 、 O_2 和水蒸气的压力为

$$\begin{cases} P_{H_2}(t) = (N_{H_2}^{in} - 2K_r I)(1 - e^{-t/\tau_{H_2}}) / K_{H_2} + P_{H_2}(0)e^{-t/\tau_{H_2}} \\ P_{O_2}(t) = (N_{O_2}^{in} / r_{H-O} - K_r I)(1 - e^{-t/\tau_{O_2}}) / K_{O_2} + P_{O_2}(0)e^{-t/\tau_{O_2}} \\ P_{H_2O}(t) = 2K_r I(1 - e^{-t/\tau_{H_2O}}) / K_{H_2O} + P_{H_2O}(0)e^{-t/\tau_{H_2O}} \end{cases} \quad (16)$$

式中： τ_{H_2} 、 τ_{O_2} 、 τ_{H_2O} 分别是 H_2 、 O_2 和水蒸气的响应时间；且 $\tau_{H_2} = V_a / K_{H_2} RT$ 、 $\tau_{O_2} = V_{ca} / K_{O_2} RT$ 、 $\tau_{H_2O} = V_{ca} / K_{H_2O} RT$ ；从化学反应来看， r_{H-O} 的值一般为 2，为了能使 H_2 完全反应，其值一般小于 2，典型数值 $1 < r_{H-O} < 1.25$ 。

2.3.2 能斯特电压方程

SOFC 是一个氧浓差电池，其热力学电动势由能斯特方程给出

$$E = N_0 [E_0 + \frac{RT}{2F} \ln(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}}) + \ln P] \quad (17)$$

式中： E_0 为开路电池电压； P 为电池堆系统压力。

2.3.3 输出电压方程

由于 SOFC 工作温度非常高，需考虑到各种极化损失，一个能较好反映 SOFC 输出电压的经典半经验方程为^[13]

$$V_{FC} = E - V_{act} - V_{con} - V_{ohm} \quad (18)$$

式中： V_{act} 、 V_{con} 、 V_{ohm} 分别表示活性极化损失、浓度极化损失和欧姆极化损失的电势，其经典半经验表达式如下

$$V_{act} = a + b \lg i \quad (19)$$

$$V_{con} = -\frac{RT}{2F} \ln(1 - \frac{i}{i_L}) \quad (20)$$

$$V_{ohm} = 0.126 I e^{-2870(\frac{1}{1273} - \frac{1}{T})} \quad (21)$$

式中： a 、 b 分别为 Tafel 常数和 Tafel 斜率，一般 $a = 0.05$ 、 $b = 0.11$ ； i 、 i_L 分别为电池的电流密度和极限电流密度。

2.4 SOFC 建模

利用 MATLAB/Simulink 工具包建立了 SOFC 系统动态模型，如图 5 所示。

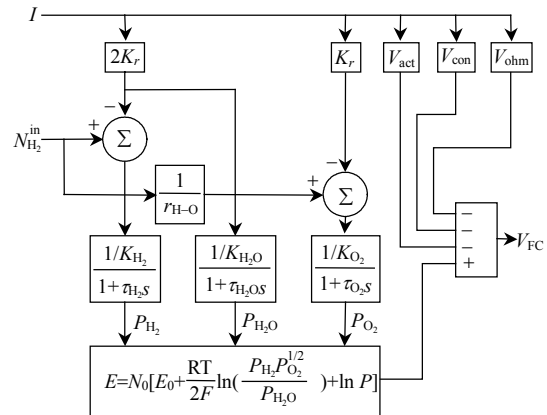


图 5 SOFC 系统动态模型

Fig. 5 SOFC system dynamic model

3 直流分布式电源逆变并网控制

随着目前大力开发可再生能源和保护环境的迫切需要，分布式电源与区域配电网并网运行趋势日益明显。PV 和 FC 作为 2 种典型的直流分布式电源，要与公用电网并联运行，必须经过逆变器和滤波器将直流电转化为工频交流电，并经过并网隔离变压器才能并入电网中 PCC，一种典型的直流分布式电源逆变并网示意图如图 6 所示。

如何选择适合中小容量分布式电源逆变并网运行控制方法，使其能够保持系统可接受的外特性

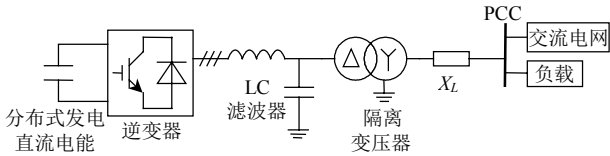


图 6 直流分布式电源逆变并网示意图

Fig. 6 Inverter-based parallel operation diagram of DG

是解决分布式电源应用的关键之一。从我国配电系统的实际情况考虑，中小型的分布式电源以恒功率拟负荷的外特性连接到 PCC 处，关系上类似负荷，但并不吸收功率，这样可尽量避免分布式电源直接参与馈线的电压调节。基于此，文献[14]设计的采用电流正弦 PWM 调节方法，双环串级比例积分 (proportional integral, PI) 控制的电压源逆变器 (voltage source inverter, VSI) 能较好地满足要求，其结构示意图如图 7 所示。

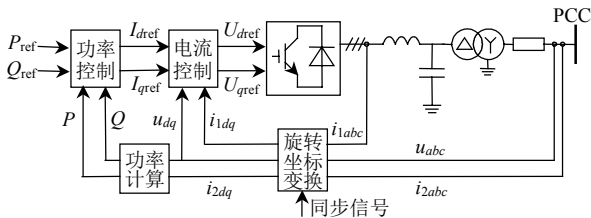


图 7 逆变并网控制器控制系统

Fig. 7 Control system of inverter-based parallel operation controller

基于 MATLAB/Simulink，采用文献[14]所设计的双环串级电流正弦 PWM 调节的 VSI 综合逆变控制器设计，构建了直流分布式电源发电系统的 DC/AC 逆变模块，针对光伏电池发电系统，根据实际日照强度和温度，配合 MPPT 控制和蓄电池控制，实现恒定功率输出；针对燃料电池发电系统，配合燃料输入摩尔流量的调节，实现恒定功率输出，因此即可实现光伏电池和燃料电池的直流型分布式电源恒功率控制的电压源拟负荷外特性。

4 PV 和 FC 的等效描述

4.1 PV 的等效描述

为准确反映各类分布式电源接入配电系统后对电力系统综合负荷特性产生的影响，需要进行大量的电力系统仿真计算，采用本文建立的 PV 和 FC 模型，虽然在精度上能满足要求，但无疑会增大计算难度和降低计算速度，因此需要研究能准确描述各类分布式发电设备外特性的等效模型，这样能在满足精度要求的前提下，大大降低计算难度、提高计算速度。

由本文所建 PV 的数学模型可知，在参考温度 ($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$) 和不同日照强度 G 下，PV 的电压-电流和功率-电压稳态曲线如图 8 所示。

由图 8 可知，PV 的电压-电流特性近似为一矩形，即低压段近似为恒流源，接近开路电压时近似为恒压源。经过 MPPT 和 DC/DC 变换控制之后，通过控制电压的方法，可将不可控的直流输入变为可控的直流输出，即输出电压基本恒定在设定值范围，输出电流受日照强度和温度影响，因此，可将考虑了 MPPT 和 DC/DC 变换控制之后的 PV 等效为电压源。

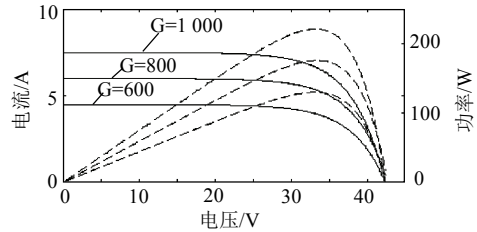


图 8 PV 模型的稳态特性

Fig. 8 Steady-state characteristics of the PV model

4.2 FC 的等效描述

可能影响燃料电池性能的一个重要运行变量是它的利用率 u ，它可以定义为

$$u = \frac{N_{H_2}^{in} - N_{H_2}^{out}}{N_{H_2}^{in}} = \frac{N_{H_2}^r}{N_{H_2}^{in}} = \frac{2K_r I}{N_{H_2}^{in}} \quad (22)$$

从式(22)可以得到

$$N_{H_2}^{in} = 2K_r I / u \quad (23)$$

研究表明，从经济性和电池效率分析，利用率一般在 0.7~0.9 这个范围内，而其稳态利用率一般为 0.8 左右^[15]。

由本文所建 FC 的数学模型可知，FC 的电压-电流和功率-电压稳态曲线如图 9 所示。由图 9 可知，FC 的电压-电流特性具有如下特征：电压随电流的增大而减小，随燃料利用率 u 的增大而减小，但当 u 一定时，随电流的增大，电压下降并不明显。经过 DC/DC 变换控制之后，可以将 FC 的输出电压恒定在设定值范围，输出电流受输入氢气的摩尔流量影响，氢气输入量越大，电流越大，发出的功率也越大，因此，可将考虑了 DC/DC 变换控制之后 FC 等效为电压源。

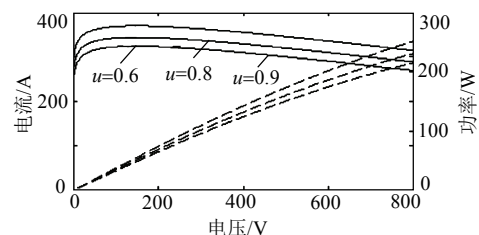


图 9 FC 模型的稳态特性

Fig. 9 Steady-state characteristics of the FC model

4.3 直流分布式电源逆变控制后的等效描述

PV 发电系统易受气候条件(日照和温度)的影响,通过 MPPT 和 DC/DC 变换控制虽能较好地控制其输出电压恒定,但输出电流受气候因素影响较大,从而输出功率也随气候条件而波动。为很好地保证其拟负荷外特性,本文增加蓄电池模块,来保证其输出功率恒定。当日照较强时,利用双向 DC/DC 变换控制,在保证恒定功率输出的基础上,将剩余电量储存到蓄电池中;当日照较弱时,利用双向 DC/DC 变换控制,使蓄电池处于放电状态,从而保证恒定的功率输出。

针对 FC 发电系统,通过 DC/DC 变换控制能较好地控制其输出电压恒定,同时其输出功率也不受气候因素影响,只与燃气输入量有关,根据 FC 制造工艺和额定参数,只需要恒定燃气输入量,即可保证其恒定的功率输出。

因此,上述 2 种典型的直流分布式电源,经过逆变并网控制之后,均可实现其恒功率控制的电压源的拟负荷外特性输出,即在电力系统仿真计算中,可以用恒功率控制的电压源来等效地描述。

5 实例仿真

5.1 仿真系统

选用如图 10 所示的 4 节点 5 MVA 配电馈线作为仿真算例,系统等值以及负荷数值已在图中标出,各节点负荷类型采用 60%感应电动机动态负荷并联 40%恒阻抗静态负荷。B3 节点作为 PCC,注入额定功率为 400 kW 的逆变型直流分布式电源。各模块参考参数如下:

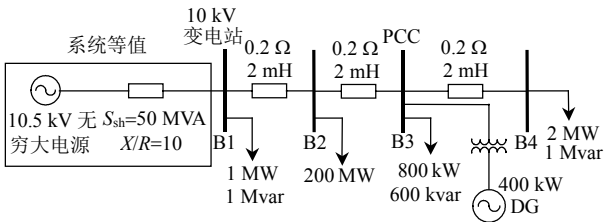


图 10 4 节点馈线算例的单线示意图

Fig. 10 Single line figure of four-node feeder

1) PV 发电系统。单个光伏电池以 STP220S-24/vb 型单晶硅电池为对象,在标准测试环境($G=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$)下其主要参数为 $I_{SCR}=7.48 \text{ A}$; $U_{oc}=42.4 \text{ V}$; 最大功率点下 $V_m=34 \text{ V}$, $I_m=6.47 \text{ A}$; $P_m=220 \text{ W}$; PV 阵列并联 70 组,每组串联 30 个。

2) FC 发电系统。采用文献[15]中 SOFC 参考参数,并联 2 组,每组额定功率 200 kW。

3) 逆变并网控制系统。逆变器输出额定线电压为 1 kV,直流侧电压为 3 kV,逆变器开关频率为

1.5 kHz; LC 滤波器参数为 1 mH, 70 μF ; 隔离变压器采用 Yd1 接线, 10 kV/1kV, 2.5 MVA, $r_T=1\%$, $x_T=6\%$; 连接到 PCC 的线路参数为 0.1 Ω , 1 mH。

5.2 仿真方法及结果

基于 MATLAB/Simulink 搭建上述仿真系统,在 PCC 处分别接入 PV 发电系统、FC 发电系统、恒功率控制的电压源进行电力系统稳态、暂态仿真,监测相关状态量进行比较分析。为检验恒功率控制的电压源对 PV 和 FC 发电系统的等效描述能力,可以选择一定扰动试验来完成,包括:系统电压变化、PCC 附近负荷扰动、分布式电源出力波动、馈线短路故障等。

下面以稳态运行情况下,系统电压受外部干扰下降 20%、持续 0.1 s 恢复为例,分别对 DG 出口、B1 母线处的各状态量进行比较分析,结果如图 11、12 所示。

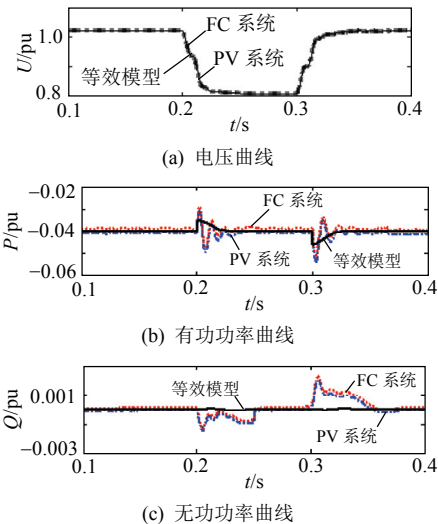


图 11 DG 出口电压、有功功率和无功功率
Fig. 11 Voltage, active and reactive power at DG

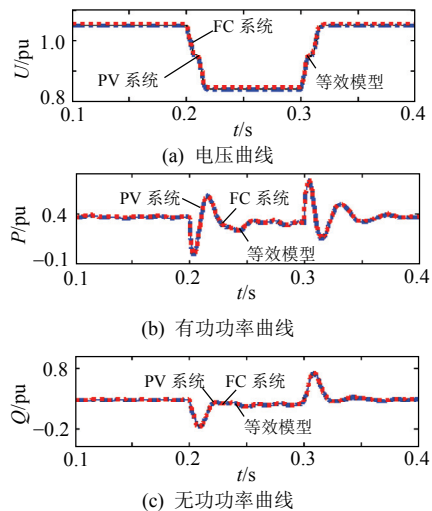


图 12 B1 电压、有功功率和无功功率
Fig. 12 Voltage, active and reactive power at B1

5.3 讨论

由图 11、12 的曲线拟合效果和一系列扰动试验结果分析,从 DG 出口来看,接入 PV 系统、FC 系统和等效模型对出口电压影响不大,有功和无功稍微有所差别,但整体稳态拟合效果和暂态趋势还是基本一致的;从 B1 节点来看,尽管接入的 DG 容量占总负荷容量接近 10%,但接入 PV 系统、FC 系统和等效模型对其节点电压、注入有功、无功几乎没有影响,因此,从综合负荷特性的角度,恒功率控制的电压源和 PV、FC 发电系统无论在稳态还是暂态过程,均能表现出一致的拟负荷外特性,即用恒功率控制的电压源能较好地等效描述 PV 和 FC 发电系统。

根据逆变型直流分布式电源的这种拟负荷外特性,当研究考虑 PV 和 FC 的配网侧综合负荷建模时,可将直流分布式电源看作一个功率消耗为负的广义静态恒功率负荷,因此考虑 PV、FC 的配网侧综合负荷可以采用如图 13 所示的广义综合负荷模型结构来描述。图中, P_{IM} 、 P_{ZIP} 、 P_{DG} 分别表示感应电动机负荷功率、静态负荷功率、分布式发电功率;将分布式电源出力和静态负荷合称为等效静态负荷,负荷功率用 P_{Seq} 表示;系统供给负荷为 P_{sys} 。上述各功率参考方向定义如图 13 所示。

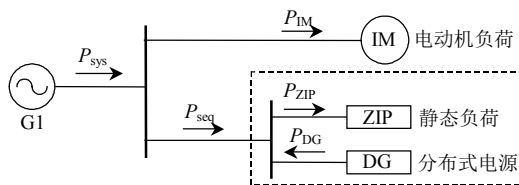


图 13 广义综合负荷模型结构

Fig. 13 Configuration of the generalized composite load model

影响综合负荷特性的一个重要运行变量是动态负荷所占比例 K_m , 它可以定义为

$$K_m = P_{IM} / P_{sys} = P_{IM} / (P_{IM} + P_{Seq}) \quad (24)$$

传统综合负荷模型中, K_m 的取值范围为[0,1], 但考虑了 PV 和 FC 等逆变型直流分布式电源的配网侧广义综合负荷模型, 其 K_m 取值范围根据实际运行方式分下列 3 种情况:

1) $P_{DG} < P_{ZIP}$ 时, 即分布式发电出力不足以供给静态负荷部分, 则有 $P_{Seq} > 0$ 、 $P_{sys} > 0$ 、 $0 \leq K_m < 1$ 。

2) $P_{ZIP} \leq P_{DG} < P_{ZIP} + P_{IM}$ 时, 即分布式发电出力足以供给静态负荷部分, 但不足以供给全部负荷, 则有 $P_{Seq} \leq 0$ 、 $P_{sys} > 0$ 、 $K_m \geq 1$ 。

3) $P_{DG} \geq P_{ZIP} + P_{IM}$, 即分布式发电出力足以供给全部负荷, 则有 $P_{Seq} < 0$ 、 $P_{sys} \geq 0$ 、 $K_m < 0$ 。

6 结论

1) 一系列的扰动实例仿真证明了本文提出的恒功率控制的电压源等效描述模型是能准确描述 PV 和 FC 并网特性的。

2) 在本文研究工作的基础上, 下一阶段研究重点将是不同影响因素(包括 PV 和 FC 的不同容量比例、不同地理位置、不同接入方、配电网本身的负荷构成和负荷水平、配电网运行方式和拓扑结构等)下, PV 和 FC 对配电网综合负荷特性的影响及其统计规律性。

参考文献

- [1] 梁有伟, 胡志坚, 陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 71-75.
Liang Youwei, Hu Zhijian, Chen Yunping. A survey of distributed generation and its application in power system[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 71-75(in Chinese).
- [2] 刘扬华, 吴政球, 涂有庆, 等. 分布式发电及其并网技术综述[J]. 电网技术, 2008, 32(15): 71-76.
Liu Yanghua, Wu Zhengqiu, Tu Youqing, et al. A survey on distributed generation and its networking technology[J]. Power System Technology, 2008, 32(15): 71-76(in Chinese).
- [3] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1-7.
Chen Shuyong, Song Shufang, Li Lanxin, et al. Survey on smart grid technology[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 1-7(in Chinese).
- [4] 李春华, 朱新坚, 胡万起, 等. 光伏/燃料电池联合发电系统的建模和性能分析[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 88-93.
Li Chunhua, Zhu Xinjian, Hu Wanqi, et al. Modeling and performance analysis of photovoltaic/fuel cell hybrid power generation systems[J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 88-93(in Chinese).
- [5] Stuart J C I, Anne S. 太阳能发电面临的挑战与机遇[J]. 电网技术, 2007, 31(20): 82-89.
Stuart J C I, Anne S. PV solar energy, challenges and opportunities[J]. Power System Technology, 2007, 31(20): 82-89.
- [6] 张颖颖, 曹广益, 朱新坚. 燃料电池: 有前途的分布式发电技术[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 57-61.
Zhang Yingying, Cao Guangyi, Zhu Xinjian. Fuel cell: a promising distributed generation technique[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 57-61(in Chinese).
- [7] 李炜, 朱新坚, 曹广益. 基于一种改进的 BP 神经网络光伏电池建模[J]. 计算机仿真, 2006, 23(7): 228-230, 290.
Li Wei, Zhu Xinjian, Cao Guangyi. Modeling of photovoltaic array based on improved BP neural networks identification[J]. Computer Simulation, 2006, 23(7): 228-230, 290(in Chinese).
- [8] 翁史烈, 翁一武, 苏明, 等. 熔融碳酸盐燃料电池动态特性的研

- 究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 168-172.
Weng Shilie, Weng Yiwu, Su Ming, et al. Study of molten carbonate fuel cell on thermodynamic properties[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 168-172(in Chinese).
- [9] 吴小娟, 朱新坚, 曹广益, 等. 固体氧化物燃料电池的数学模型及自适应神经模糊辨识模型的研究[J]. 电网技术, 2008, 32(1): 9-14.
Wu Xiaojuan, Zhu Xinjian, Cao Guangyi, et al. Modeling of solid oxide fuel cell based on mathematical theory and adaptive neural fuzzy inference system identification[J]. Power System Technology, 2008, 32(1): 9-14 (in Chinese).
- [10] Koutroulis E, Kalaitzakis K, Voulgaris N C. Development of a microcontroller-based photovoltaic maximum power point tracking control system[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2001, 16(1): 46-54.
- [11] 李炜, 朱新坚. 光伏系统最大功率点跟踪控制仿真模型[J]. 计算机仿真, 2006, 23(6): 239-243.
Li Wei, Zhu Xinjian. The maximum power point tracking control of a photovoltaic power system[J]. Computer Simulation, 2006, 23(6): 239-243(in Chinese).
- [12] 廖志凌, 阮新波. 一种独立光伏发电系统双向变换器的控制策略[J]. 电工技术学报, 2008, 23(1): 97-103.
Liao Zhiling, Ruan Xinbo. Control strategy for bi-directional DC/DC converter of a novel stand-alone photovoltaic power system [J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2008, 23(1): 97-103(in Chinese).
- [13] Murshed A M, Huang B, Nandakumar K. Control relevant modeling of planer solid oxide fuel cell[J]. Journal of Power Sources, 2007, 158(163): 830-845.
- [14] 王志群, 朱守真, 周双喜. 逆变型分布式电源控制系统的设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(24): 61-66.
Wang Zhiqun, Zhu Shouzhen, Zhou Shuangxi. Controller design for inverter-based distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(24): 61-66 (in Chinese).
- [15] 丁明, 严流进, 茆美琴, 等. 分布式发电中燃料电池的建模与控制[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 8-13.
Ding Ming, Yan Liuqing, Mao Meiqin, et al. Modeling and control of fuel cells in distribution generation system[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 8-13 (in Chinese).



钱军

收稿日期: 2010-07-07。

作者简介:

钱军(1982), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统分析和仿真建模、分布式发电和负荷建模;

李欣然(1957), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析和仿真建模、电压稳定和电压无功控制。

(责任编辑 褚晓杰)