

分布式发电微网系统暂态时域仿真方法研究 ——(三)算例实现与仿真验证

李 鹏¹,王成山¹,黄碧斌²,高 菲³,丁承第¹,于 浩¹

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072;2. 国家电网能源研究院,北京 100052;

3. 中国电力科学研究院,北京 100192)

摘要:为验证分布式发电系统暂态仿真算法的正确性和有效性,通过选取典型的分布式电源及相应的控制策略,实现了包括光伏发电单元、固体氧化物燃料电池发电单元、微型燃气轮机发电单元及蓄电池储能单元在内的各种分布式发电系统的建模与暂态仿真,考察了在欧盟典型低压微网系统结构下,微网从并网状态切换到孤岛状态时系统的暂态过程,详细比较了 TSDG 与 MATLAB/SimPowerSystems 的仿真结果。仿真结果表明 TSDG 与 MATLAB/SimPowerSystems 计算误差不超过 0.1%,具有良好的数值精度与数值稳定性。伪牛顿法对程序仿真计算速度具有较大幅度的提升。讨论了未来通过并行思想、多速率算法等方式提高程序计算性能的思路。

关键词:分布式发电;微网;暂态仿真;时域分析;光伏电池;燃料电池;微型燃气轮机;蓄电池

中图分类号: TM 711;TM 712.1⁺2

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.04.007

0 引言

微网技术有效地解决了多种分布式发电单元和储能单元并网运行问题^[1],并且作为一个具有能量管理和协调控制能力的自治系统,它对电力系统在继电保护、可靠性分析、配网规划和电能质量等多方面的影响已经成为分布式发电技术研究重点。利用准确有效的数字仿真工具对分布式发电微网系统进行暂态时域仿真是一种简单可靠的研究方式,并且数字仿真平台能够和实际的物理试验平台相结合构建混合仿真平台,具有极大的扩展性。

目前在中低压微网中,光伏发电、燃料电池发电、微型燃气轮机发电及蓄电池储能是常见的 4 种分布式发电技术。太阳能作为一种重要的可再生能源,具有资源丰富、易于获取、清洁排放等优点。当前,利用太阳能发电主要包括光热发电和光伏发电 2 种形式。作为一种重要的分布式发电形式,光伏发电目前已获得了广泛的应用。燃料电池是一种以氢为主要燃料、通过电化学反应将燃料中的化学能直接转化成电能的能量转换装置,它具有高效率、低污染、低噪声、可靠性高等优点。燃料电池种类繁多,具有较宽的功率输出范围^[2],可以面向包括便携式电源、电动汽车驱动及分布式发电等各个层面的应用需求。燃料电池作为分布式电源,常与其他种类的电

源及储能装置配合组成混合发电单元^[3]。微型燃气轮机可以使用多种气态或液态的化石燃料,通过高温高压蒸汽驱动电机旋转,从而实现化学能向电能的转换。与传统发电机组相比,微型燃气轮机具有体积小、可靠性高、有害气体排放低、安装维护方便等优点,同时发电产生的余热可用于供热或制冷,提高了一次能源的整体利用效率,是当前实现冷热电联供(CCHP)的主要形式^[4]。蓄电池储能单元^[5]可利用电化学反应进行快速充放电,在并网运行时与光伏发电单元及风力发电单元等间歇性电源相配合,降低分布式电源的功率输出波动;在孤岛运行状态下,蓄电池可以在短时间内快速调节微网系统的电压频率和功率平衡,保证微网系统的平稳过渡。

分布式发电微网系统暂态仿真不仅涵盖了传统电力系统电磁暂态仿真应用的各领域,同时也包括控制算法分析与控制器设计^[6-8]、短期的负荷跟踪特性、故障期间的系统动态特性^[9]与故障穿越特性^[10-11]、反孤岛保护^[12]等分布式发电系统特有的研究内容。当前,包括 MATLAB / SimPowerSystems、PSCAD 及 DigSILENT 在内的各种数字仿真程序广泛应用于分布式发电微网系统相关领域的研究。本文通过选取典型的分布式电源及相应的控制策略,实现了包括光伏发电单元、固体氧化物燃料电池(SOFC)发电单元、微型燃气轮机发电单元及蓄电池储能单元在内的各种分布式发电系统的建模与暂态仿真,考察了含上述 4 种分布式发电单元的欧盟典型低压微网系统运行状态切换时的暂态过程,详细比较了 TSDG 与 MATLAB/SimPowerSystems 的仿真结果,验证了分布式发电系统暂态仿真算法的正确性和有效性,并讨

收稿日期:2012-05-15;修回日期:2013-02-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51207100,51261130-473);国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2009-CB219700,2010CB234600)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51207100,51261130473) and the State Key Development Program for Basic Research of China(973 Program)(2009CB219700,2010CB234600)

论了未来提高程序计算性能的思路。

1 微网测试系统(欧盟微网结构)

本文采用欧盟在微网研究项目“Microgrids”提出的典型低压微网结构^[13](见图 1)。系统中可配置多种线路与负荷类型,以及多种形式的分布式电源,充分体现了微网结构与运行的复杂性,可在此基础上构建分布式电源暂态特性及含多个分布式电源的微网协调控制等方面研究的仿真平台,参数如下(阻抗单位为 Ω/km):变压器, 20 kV/0.4 kV, Dyn11, 50 Hz, 400 kV·A, $u_k\% = 4\%$, $r_k\% = 1\%$; 线型 1 ($4 \times 120 \text{ mm}^2 \text{ Al}$), $R_{\text{ph}} = 0.284$, $X_{\text{ph}} = 0.083$, $R_0 = 1.136$, $X_0 = 0.417$; 线型 2 ($4 \times 6 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$), $R_{\text{ph}} = 3.690$, $X_{\text{ph}} = 0.094$, $R_0 = 13.64$, $X_0 = 0.472$; 线型 3 ($3 \times 70 \text{ mm}^2 \text{ Al} + 54.6 \text{ mm}^2 \text{ AAAC}$), $R_{\text{ph}} = 0.497$, $X_{\text{ph}} = 0.086$, $R_{\text{neutral}} = 0.630$, $R_0 = 2.387$, $X_0 = 0.447$; 线型 4 ($3 \times 50 \text{ mm}^2 \text{ Al} + 35 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$), $R_{\text{ph}} = 0.822$, $X_{\text{ph}} = 0.077$, $R_{\text{neutral}} = 0.524$, $R_0 = 2.04$, $X_0 = 0.421$; 线型 5 ($4 \times 25 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$), $R_{\text{ph}} = 0.871$, $X_{\text{ph}} = 0.081$, $R_0 = 3.48$, $X_0 = 0.409$; 线型 6 ($4 \times 16 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$), $R_{\text{ph}} = 1.380$, $X_{\text{ph}} = 0.082$, $R_0 = 5.52$, $X_0 = 0.418$; 负荷 1, $P = 3.0/3.0/3.0 \text{ kW}$, $Q = 0.33/0.33/0.33 \text{ kvar}$; 负荷 2, $P = 3.0/3.0/3.0 \text{ kW}$, $Q = 0.33/0.33/0.33 \text{ kvar}$; 负荷 3, $P = 3.33/3.33/3.33 \text{ kW}$, $Q = 0/0/0 \text{ kvar}$; 负荷 4, $P = 3.33/3.33/3.33 \text{ kW}$, $Q = 2.066/2.066/2.066 \text{ kvar}$; 负荷 5, $P = 6.0/3.0/6.0 \text{ kW}$, $Q = 2.906/1.453/2.906 \text{ kvar}$ 。

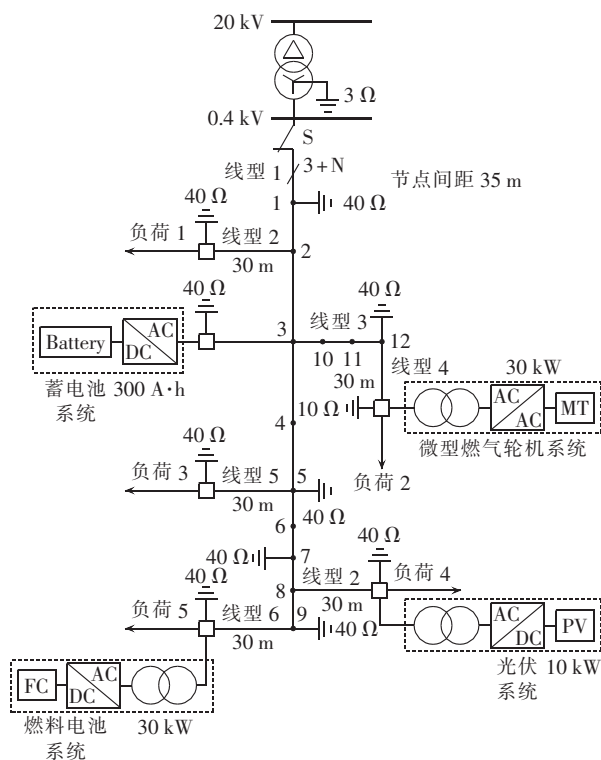


图 1 欧盟低压微网算例

Fig.1 Benchmark of European low-voltage microgrid

本文在上述低压微网系统的基础上,分别对光

伏发电单元、燃料电池发电单元、微型燃气轮机发电单元和蓄电池储能单元仿真建模,并将这 3 种分布式电源按图 1 所示位置分别接入微网系统中。其中,光伏发电单元容量为 10 kW,电源进行最大功率点跟踪(MPPT)控制,采用单级拓扑结构并网;燃料电池发电单元容量为 30 kW,电池模型选取适于暂态研究的详细模型,通过 Boost 升压电路和逆变器双级结构并网;微型燃气轮机发电单元容量为 30 kW,采用单轴形式,机端出口高频交流电经过整流器和逆变器进行交直变的变换;蓄电池单元容量设定为 300 A·h,采用下垂控制,并网运行时输出功率控制为零。各分布式发电单元电气系统和控制系统数学模型的建立由以下几节详细阐述。

2 光伏发电单元

2.1 单元结构

光伏发电单元由于受外界光照及温度等条件限制,其功率输出具有较强的间歇性与随机性,在实际应用中一般采用 MPPT 控制^[14],以实现最大的能量转化效率。因此功率输出无法自行调节,不能独立运行,通常需要与其他分布式电源或储能装置配合。图 2 给出了单级式光伏并网发电单元的结构示意图,其电气系统主要包括光伏阵列、直流电容器、逆变器、滤波器、线路及交流电网等几部分。

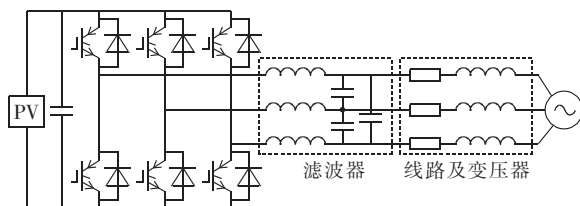


图 2 单级式光伏并网发电系统拓扑结构图

Fig.2 Configuration of single-stage grid-connected PV generation system

2.2 分布式电源模型

光伏电池是光伏发电单元中最基本的能量转换单元,不同种类的光伏电池可采用不同模型加以描述,本文微网中的光伏发电单元由常见的单晶硅光伏电池组成,相应采用单二极管等效电路模型^[15-16],它由 1 个光生电流源和 1 个非线性二极管并联组成,并考虑了电池的内部损耗,如图 3 所示。

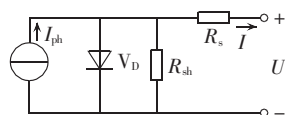


图 3 光伏电池的单二极管等效电路模型

Fig.3 Single-diode equivalent circuit model of PV cell

光伏模块的输出功率较小,一般将其串、并联后组成光伏阵列以提高输出电压及功率,此时通常认

为所有的光伏模块具有相同的特征参数,忽略连接电阻并假设它们具有理想的一致性^[17],由此可得光伏阵列的伏安关系满足式(1)。

$$I = N_P I_{ph} - N_P I_s \left[e^{q(U/N_s + IR_s/N_p)/(AkT)} - 1 \right] - \frac{N_P}{R_{sh}} \left(\frac{U}{N_s} + \frac{IR_s}{N_P} \right) \quad (1)$$

其中, I_{ph} 为光生电流源电流; I_s 为二极管饱和电流; q 为电子电量 ($1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$); k 为玻尔兹曼常数 ($1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$); T 为光伏电池工作的绝对温度值; A 为二极管特性拟合系数; R_s 和 R_{sh} 分别为光伏电池串联和并联电阻; N_s 和 N_p 分别为串联和并联的光伏模块数。

光生电流和二极饱和电流可由标准条件参考值计算得到:

$$I_{ph} = \frac{S}{S_{ref}} [I_{ph,ref} + C_T(T - T_{ref})] \quad (2)$$

$$I_s = I_{s,ref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 e^{qE_g(1/T_{ref} - 1/T)/(Ak)} \quad (3)$$

光伏电池参数如下:标准条件下光照强度 $S_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$;标准条件下电池工作温度 $T_{ref} = 298 \text{ K}$;标准条件下的光生电流 $I_{ph,ref} = 3.35 \text{ A}$;禁带宽度 $E_g = 1.237 \text{ eV}$;电池的串联内阻 $R_s = 0.312 \Omega$;二极管特性拟合系数 $A = 54$;温度系数 $C_T = 0.065\%$;单个光伏模块包括的电池个数 $m = 36$;串联的光伏模块个数 $N_s = 20$;并联的光伏模块个数 $N_p = 9$ 。

2.3 控制策略

2.3.1 MPPT 算法

对应于不同的外部条件(光照强度和温度),光伏阵列可运行在式(1)所示的不同的伏安特性曲线,曲线上各运行点功率输出各不相同。MPPT 是指根据光伏电池的输特性,通过控制保证其工作在最大功率输出状态,以最大限度地实现能量转化。目前,用于实现 MPPT 控制的算法很多^[14],其中扰动观测法(P&O)因其算法简单、所需变量较少、易于实现等优点而应用广泛。本文采用扰动观测法作为光伏阵列的 MPPT 算法,其基本原理可参考文献[18],详细的算法流程见图 4。

2.3.2 逆变器控制

光伏阵列低压直流输出需经逆变后才能接入交流电网。为获得较好的动态响应特性,对逆变器采用双环控制策略。外环控制包括基于 MPPT 算法的直流电压控制和无功功率控制两部分。内环采用基于前馈电压补偿的电流控制^[19],其中前馈补偿改善了系统的控制效果,其结构如图 5 所示,详细参数如下:逆变器电压外环参数 $K_{d1} = 0.5, K_{d1} = 5$;逆变器无功功率外环参数 $K_{q1} = 0.01, K_{q1} = 0.5$;逆变器内环参数 $K_{d2} = K_{q2} = 5, K_{d2} = K_{q2} = 100$ 。

3 燃料电池发电单元

3.1 单元结构

根据低压微网中燃料电池单元容量需求,选取

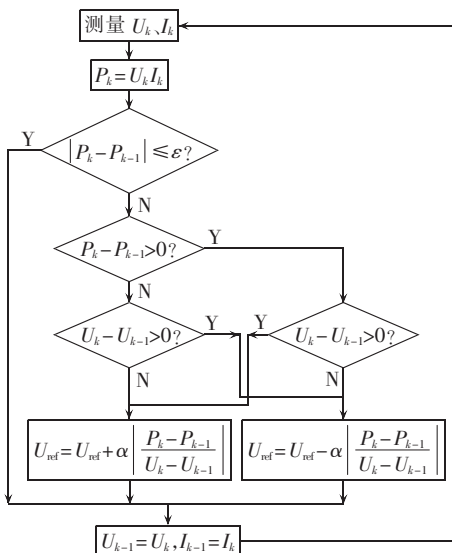


图 4 变步长扰动观测法算法流程

Fig.4 Flowchart of variable step-size P & O algorithm

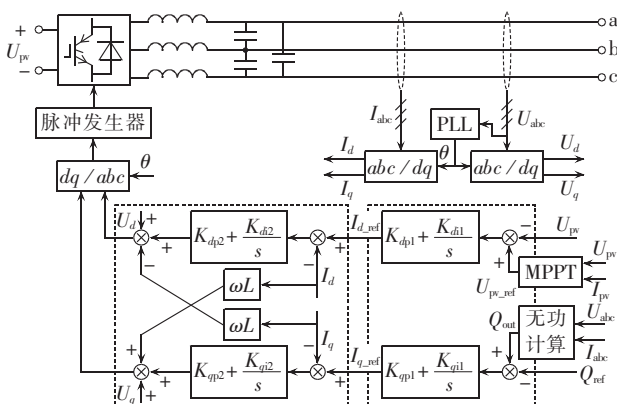


图 5 并网逆变器控制

Fig.5 Control of grid-connected inverter

SOFC 作为 30 kW 燃料电池发电单元电池的物理模型。微网算例中双级 SOFC 发电单元包括燃料电池堆、直流电容、升压斩波电路、三相逆变器、LC 滤波器、线路以及负荷等,其结构如图 6 所示。

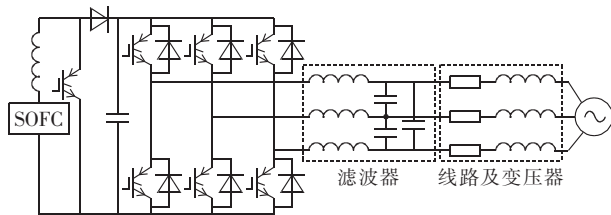


图 6 双级式 SOFC 并网发电系统结构

Fig.6 Configuration of double-stage grid-connected SOFC generation system

3.2 分布式电源模型

对于 SOFC,本文采用文献[20]介绍的计及内部气体分压力变化的暂态模型,其结构如图 7 所示,它由量测环节、燃料平衡控制系统、电化学反应及电气部分等组成。由于燃料电池运行温度变化较为缓慢,在仿真时间不是很长的情况下,通常假定燃料电

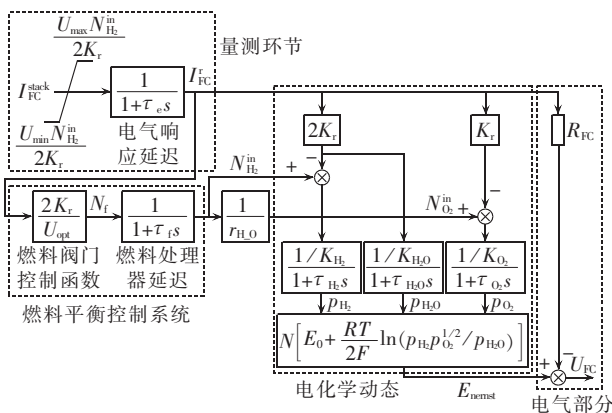


图 7 燃料电池的动态模型

Fig.7 Dynamic model of fuel cell

池的运行温度保持恒定^[21],详细参数如下:燃料电池堆绝对温度 $T=1\,273\,\text{K}$,法拉第常数 $F=96\,485\,\text{C/mol}$,气体常数 $R=8.314\,\text{J/(K}\cdot\text{mol)}$,燃料电池个数 $N=500$,理想开路电压 $E_0=1.18\,\text{V}$,最大燃料利用率 $U_{\max}=0.9$,最小燃料利用率 $U_{\min}=0.8$,最佳燃料利用率 $U_{opt}=0.85$,氢气阀门摩尔常数 $K_{H_2}=8.43\times 10^{-4}\,\text{kmol/(s}\cdot\text{atm)}$,水蒸气阀门摩尔常数 $K_{H_2O}=2.81\times 10^{-4}\,\text{kmol/(s}\cdot\text{atm)}$,氧气阀门摩尔常数 $K_{O_2}=2.52\times 10^{-3}\,\text{kmol/(s}\cdot\text{atm)}$,氢气流响应时间 $\tau_{H_2}=26.1\,\text{s}$,水蒸气流响应时间 $\tau_{H_2O}=78.3\,\text{s}$,氧气流响应时间 $\tau_{O_2}=2.91\,\text{s}$,单个电池欧姆电阻 $r=3.2813\times 10^{-4}\,\Omega$,电气响应延迟 $\tau_e=0.8\,\text{s}$,燃料处理器延迟 $\tau_f=5\,\text{s}$ 。

3.3 控制策略

微网算例中燃料电池发电单元升压斩波电路采用双环控制策略^[22],如图 8 所示。其中,外环控制采用斩波电路出口直流电压控制,内环采用燃料电池出口电流控制。通过斩波电路的升压作用提高直流电压以满足逆变器要求,使得在较宽的输入电压范围内都能够有稳定的输出电压,并且有效地抑制了电流纹波,详细的控制参数如下:Boost 电路外环参数 $K_{p1}=50, K_{i1}=2$;Boost 电路内环参数 $K_{p2}=20, K_{i2}=2$ 。

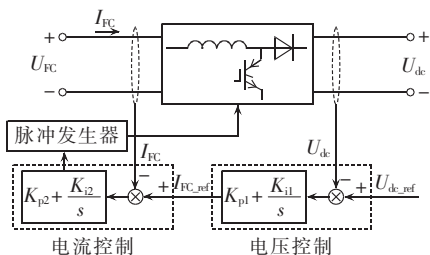


图 8 升压斩波电路控制系统结构图

Fig.8 Control system of Boost chopping circuit

在本文的微网测试算例中,燃料电池发电单元采用恒功率控制^[23]作为并网逆变器的控制策略,它通过对逆变器出口电气量的坐标转换实现有功功率

和无功功率的解耦控制。采用双环结构,功率外环根据控制指令输出恒定功率,电流内环则进行快速的动态调节,结构如图 9 所示,详细的控制参数如下:逆变器外环参数 $K_{dp1}=K_{qp1}=0.2, K_{d1}=K_{q11}=25$;逆变器内环参数 $K_{dp2}=K_{qp2}=2.5, K_{d2}=K_{q12}=250$ 。

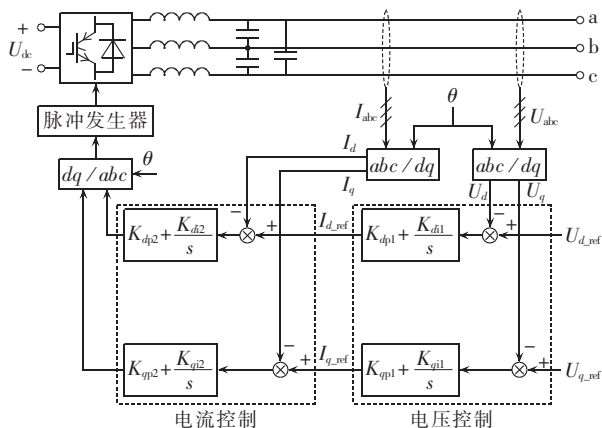


图 9 逆变器控制系统结构图

Fig.9 Control system of inverter

4 微型燃气轮机发电单元

4.1 系统结构

微型燃气轮机系统能够实现多种能量转换,是 CCHP 的主要实现形式,本文微网测试系统侧重于其发电单元的建模仿真。单轴形式的微型燃气轮机发电系统中压气机、燃气涡轮与发电机同轴高速旋转的特点决定了电机出口为高频交流电,必须通过整流和逆变后才能并网运行。图 10 给出了微型燃气轮机系统并网拓扑图^[24],其中包括燃气轮机、永磁发电机、整流器、直流电容器、逆变器、滤波器、线路及交流电网等几部分。

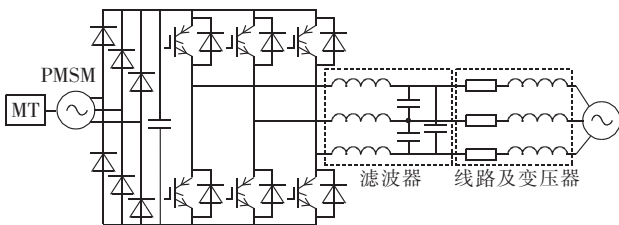


图 10 单轴形式微型燃气轮机系统结构

Fig.10 Configuration of microturbine generation system

4.2 分布式电源模型

微型燃气轮机发电单元包括作为原动机的微燃机和起能量转换作用的永磁同步电机两部分^[24-25]。微燃机决定了整个单元向外输送的功率大小,由速度控制、温度控制、燃料系统和能量转换系统(压缩机-燃烧室-涡轮机)组成。

永磁同步发电机用高能永磁材料取代直流励磁绕组,降低了铜损和转动惯量,提高了能量密度,更利于高速旋转的要求。本文在转子旋转坐标系下进

行电机内部建模,结合转子运动方程进行坐标变换,和三相网络进行接口。电机整个求解过程在控制系统中完成,对外等效为三相电流源。这两部分在之前的文章中均作过详细说明,此处不再赘述,详细参数如下:速度控制增益 $W=25.0$,速度控制超前时间常数 $X=0.4$ s,速度控制滞后时间常数 $Y=0.5$ s,控制模式 $Z=1$,辐射屏蔽比例系数 $K_4=0.8$,辐射屏蔽比例系数 $K_5=0.2$,辐射屏蔽时间常数 $\tau_3=15.0$ s,热电偶时间常数 $\tau_4=2.5$ s,温度控制器积分时间常数 $\tau_i=450$ s,温度控制比例系数 $T_5=3.3$,设定的控制温度 $T_c=950^\circ\text{F}$,延迟环节比例系数 $K_3=0.77$,燃料限制器时间常数 $\tau=0$ s,阀门定位器参数 $a=1$, $b=0.05$, $c=1$,燃料调节器的时间常数 $\tau_f=0.04$ s,阀门定位器和燃料调节器的反馈系数 $K_f=0$,空载条件下保持额定转速的燃料流量系数 $K_6=0.23$,燃烧室延迟时间常数 $E_{CR}=0.01$ s,燃气涡轮和排气系统的延迟时间常数 $E_{TD}=0.04$ s,压气机排气时间常数 $\tau_{ci}=0.2$ s,排气口温度函数 $f_1=950-700(1-W_n)+550(1-\omega)$,转矩输出函数 $f_2=-0.276+1.2W_n+0.5(1-\omega)$,永磁同步发电机额定容量 $S_{\text{rate}}=30\text{ kV}\cdot\text{A}$,永磁同步发电机额定频率 $f_{\text{rate}}=1600\text{ Hz}$,发电机定子绕组 $R_s=0.25\ \Omega$,发电机同步电感 $L_d=L_q=1.71875\times 10^{-4}\text{ H}$,永磁体磁通量 $\lambda=0.0543\text{ Wb}$,极对数 $p=1$,发电机惯性常数 $J=0.005\text{ kg}\cdot\text{m}^2$,发电机摩擦系数 $D=0\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$ 。

4.3 控制策略

微网测试算例中 MT 并网发电单元逆变器和燃料电池发电单元一样均采用双环恒功率控制,具体的控制框图如图 9 所示,此处不再赘述,详细控制参数如下:逆变器外环参数 $K_{d1}=K_{q1}=0.1$, $K_{d1}=K_{q1}=5$;逆变器内环参数 $K_{d2}=K_{q2}=1$, $K_{d2}=K_{q2}=20$ 。

5 蓄电池储能单元

5.1 系统结构和分布式电源模型

在该低压微网中配置一个容量为 $300\text{ A}\cdot\text{h}$ 的蓄电池储能单元。该算例着重研究在下垂控制方式下,蓄电池在微网运行状态切换时对微网内部负荷的持续供电能力。因此在该仿真系统中,对蓄电池进行简化建模,采用理想直流电压源直接经过逆变器并网的形式,具体结构如图 11 所示。

5.2 控制策略

蓄电池逆变器采用基于功率解耦的 P - f 和 Q - U 下垂控制,在三相坐标系下形成了三环控制结构^[26]:外环为下垂计算环节,根据功率参考值和实际功率输出计算频率和电压幅值参考值;中间环为电压环,对三相瞬时电压进行比例调节,生成三相电流参考值;内环为电流环,对瞬时电流进行比例调节,输出逆变器调制信号。控制系统结构如图 12 所示,详细参

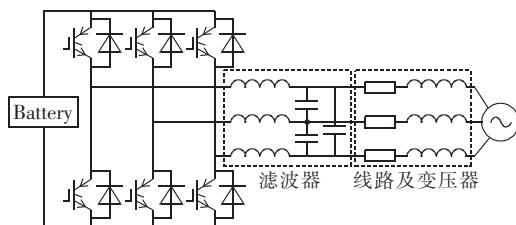


图 11 蓄电池储能系统结构

Fig.11 Configuration of battery system

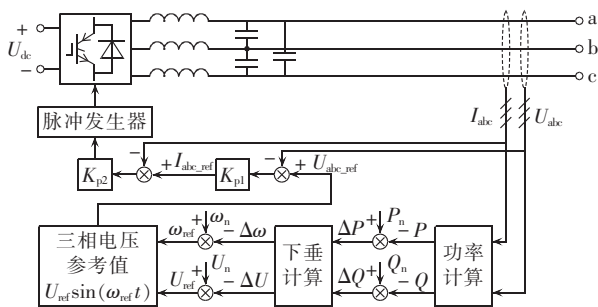


图 12 逆变器控制系统结构图

Fig.12 Control system of inverter

数如下:有功功率下垂系数为 0.003 Hz/kW ,无功功率下垂系数为 0.1 V/kvar ,逆变器电压环参数 $K_{p1}=10$,逆变器电流环参数 $K_{p2}=10$ 。

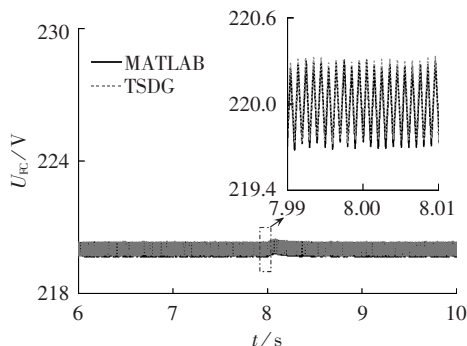
6 仿真测试结果

测试算例在典型低压微网系统中实现了各分布式发电单元仿真建模,其并网结构与控制方式与上文保持一致,各分布式电源及控制器参数如前所述。微网系统中,燃料电池和微型燃气轮机的有功输出分别控制在 30 kW 和 15 kW ,无功功率控制在 0 kvar ,光伏系统采用 MPPT 控制,无功功率也同样控制在 0 kvar ,蓄电池在并网运行时不输出功率,孤岛运行时进行下垂控制。考虑并网运行的微网系统 8 s 时在微网系统由并网运行转入孤岛运行,仿真的总时间为 10 s 。对 TSDG 与 MATLAB/SimPowerSystems 的仿真结果进行了详细的比较,如图 13 所示,其中 MATLAB/SimPowerSystems 采用了变步长的 ODE23t 算法,同时为了加快程序的计算速度,这里采用了加速器 (Accelerator) 模式,各程序的仿真步长均为 $2.5\ \mu\text{s}$,程序设置每 200 个步长 (即 $500\ \mu\text{s}$) 输出一次结果。

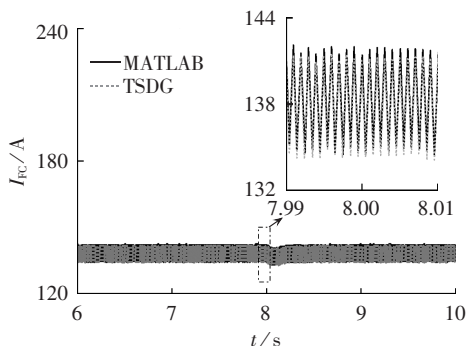
从图 13 的仿真结果可以看出,整个微网系统在 7 s 左右达到系统的稳态运行点,此时燃料电池发电单元及微型燃气轮机发电单元分别实现了 30 kW 和 15 kW 的恒功率控制,光伏发电单元在 MPPT 控制下也实现了 10 kW 的最大功率输出,蓄电池不输出功率。当系统在 8 s 联络开关断开,进入孤岛运行时,蓄电池成为调节电压和频率的主控电源,维持微网内的功率平衡。微网在转入孤岛运行状态后,在蓄电

池下垂调节下,系统频率略微降低,仍能维持系统在失去外部电网支撑时的正常运行。从图中可看出,对上述含多种分布式电源的复杂微网系统,即使在系统结构改变的情况下,由 TSDG 仿真得到的微网内各分布式电源内部与外部的仿真结果均与 MATLAB/

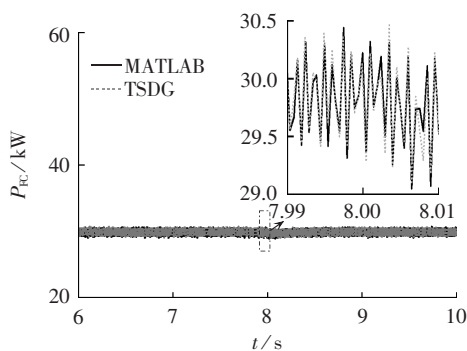
SimPowerSystems 保持较好的一致。图 14 给出了光伏电池输出电流 2 个仿真结果的误差曲线,误差均控制在 0.1% 内。该算例全面地验证了本文提出的暂态仿真方法的有效性,与仿真程序设计的正确性,为更为快速、有效的仿真方法的研究奠定了良好的基础。



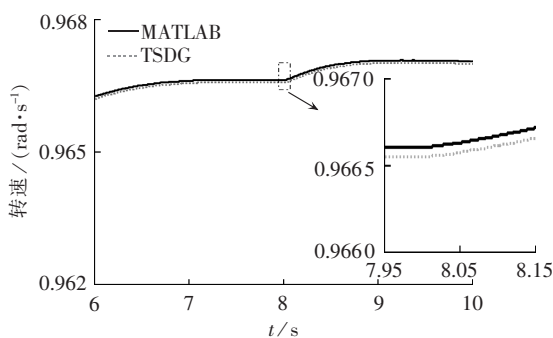
(a) 燃料电池输出电压



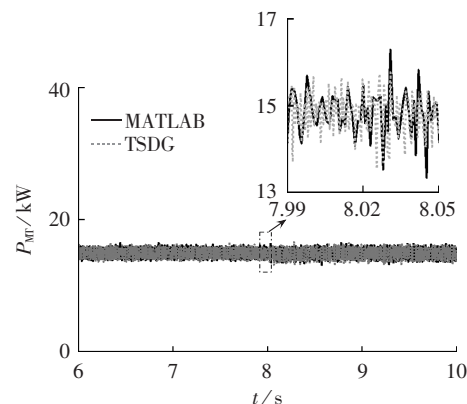
(b) 燃料电池输出电流



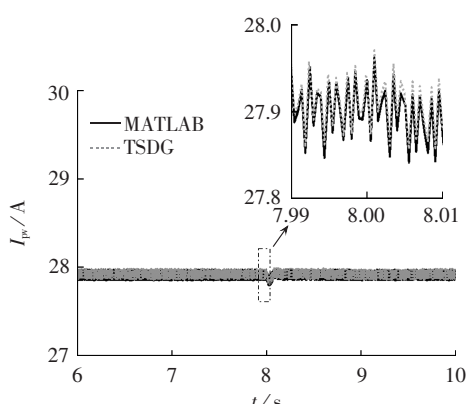
(c) 燃料电池发电系统有功输出



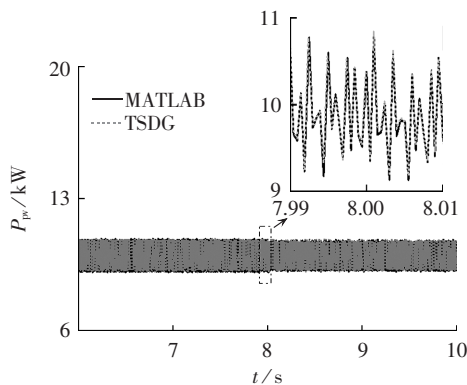
(d) 微燃机系统的电机转速



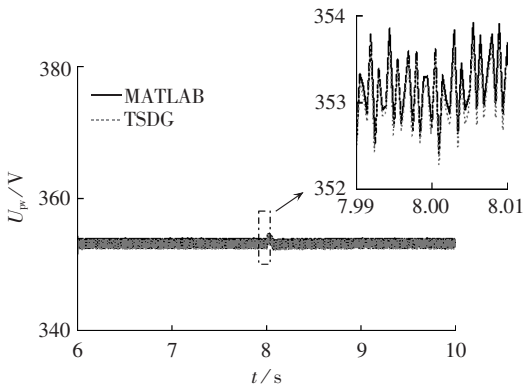
(e) 微燃机发电系统有功输出



(f) 光伏阵列输出电流



(g) 光伏系统有功输出



(h) 光伏系统输出电压

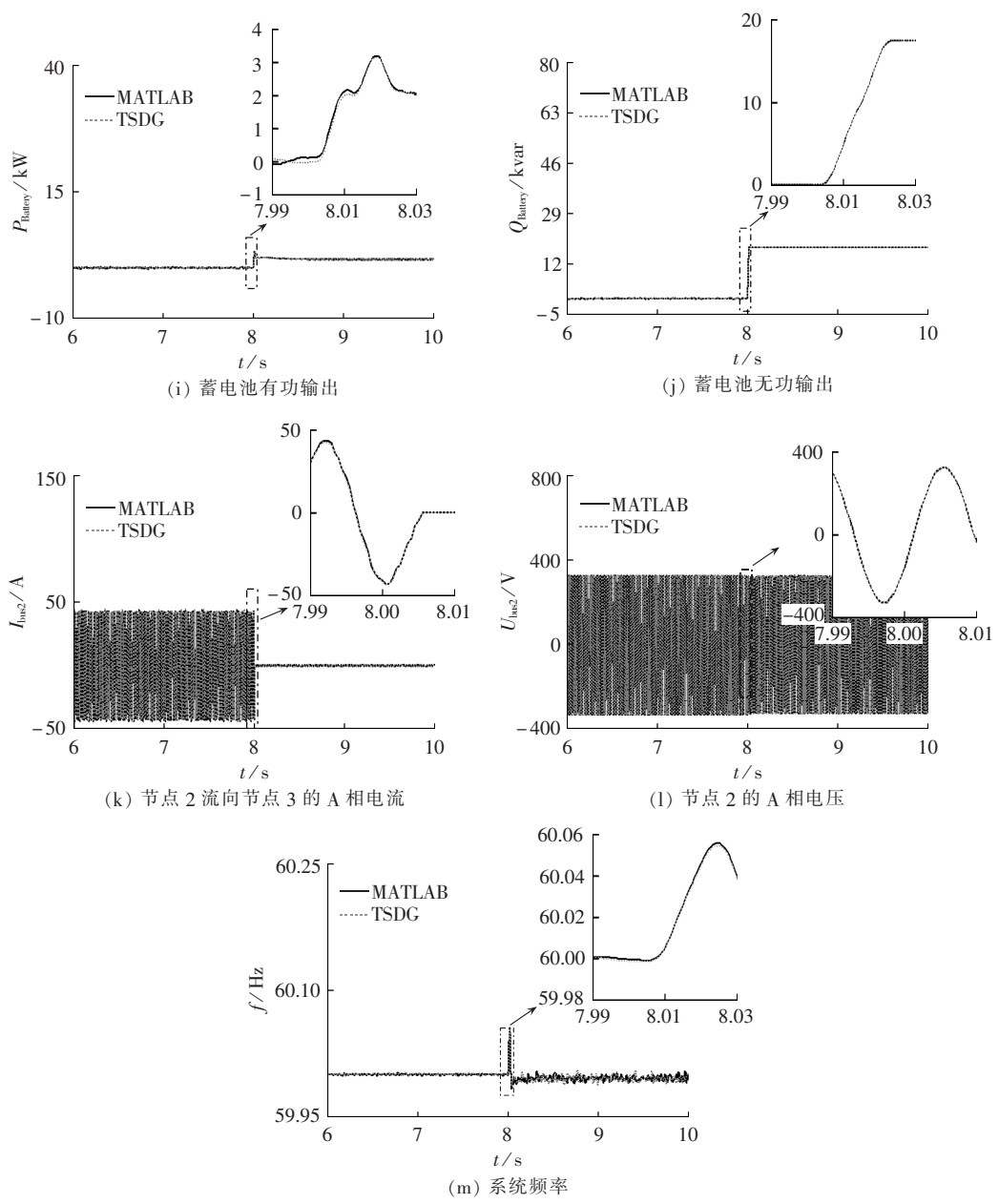


图 13 TSDG 和 MATLAB/SimPowerSystems 仿真结果比较

Fig.13 Comparison of simulative results between TSDG and MATLAB/SimPowerSystems

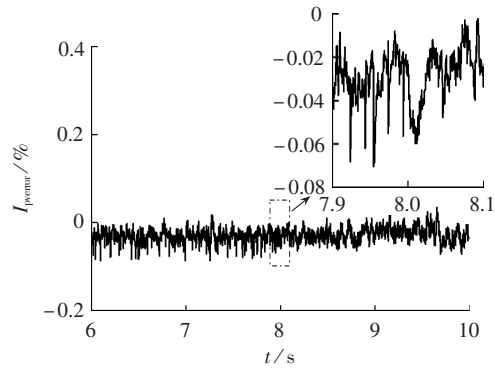


图 14 光伏电池输出电流误差曲线

Fig.14 Error curve of PV output current

为了分析伪牛顿法对仿真速度的影响,仍采用如图 1 所示的欧盟低压微网算例进行仿真性能测试,

但考虑仅含光伏一种分布式电源时的情况。对算例的仿真时间进行了测试。测试硬件平台配置为 Intel Core2 Q8400 2.66GHz CPU,2GB RAM 的 PC 机,操作系统为 Windows 7,仿真步长为 2.5 μs,仿真时间为 10 s,测试结果见表 1, N_j 为雅可比矩阵更新间隔, N_T 为更新雅可比矩阵时的迭代次数, N_V 为不更新雅可比矩阵时的迭代次数。可以看出在该算例中,当 $N_j=2$ 时, N_T 大幅降低,控制系统仿真时间缩短 13.17%。继续增大 N_j 时,虽然减小了 N_T ,但是由于雅可比矩阵的不真实性使得 N_V 大幅增加,控制系统仿真时间反而增加。图 15 是以真实牛顿法为基准的误差曲线,可以看出燃料电池输出电压伪牛顿法计算结果的误差控制在 0.1% 以内,验证了伪牛顿法的计算精度。因此,合适的更新间隔能够在减小矩阵更新的基础

表 1 仿真时间分析
Tab.1 Analysis of simulation time

N_j	N_T	N_V	时间/s
1	8 160 126	0	423.042
2	4 160 102	4 000 162	367.316
4	2 774 129	8 117 581	376.996
6	2 116 381	10 044 364	414.360
8	1 442 279	9 475 675	382.006

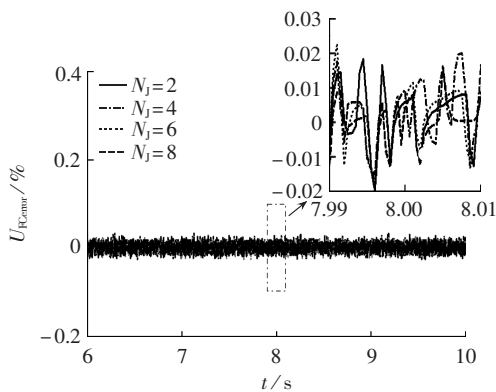


图 15 伪牛顿法误差曲线

Fig.15 Error curve of pseudo Newton method

上实现总迭代次数的最优化,获得最大的计算效率。

7 结语

利用准确高效的数字仿真工具模拟各类分布式发电单元的暂态过程,是进行分布式发电储能单元及含微网的大电网深层机理分析的基础。本文选取自主开发的 TSDG 与商业软件 MATLAB/SimPower-Systems,对含多种分布式发电单元的低压微网系统在运行状态改变时进行了快动态过程仿真和结果比较,验证了 TSDG 在各种场景下的稳定性和准确性。和商业软件相比,TSDG 已经具有足够的数值精度完成包含强非线性分布式电源、高频电力电子开关元件和多种控制器的分布式发电单元仿真要求。TSDG 通过控制系统的伪牛顿算法,能够在保证计算精度的基础上提高计算速度,增强了基于迭代计算的控制系统的建模能力,更加适用于分布式发电单元多样性的特点。

与传统电力系统相比,分布式发电单元的元素种类更丰富,数量也更多,这对暂态仿真软件的计算速度提出了更大的挑战。既可以通过高效的稀疏技术提高单一系统计算速度,也可以采用系统间并行计算来减小等待时间,充分利用计算资源。另外,考虑到分布式发电单元的建模特性,利用分布式电源及控制器的解耦特性,可以在系统内实现并行计算;利用系统装置多时间尺度的特点,可通过对快慢动态的划分进行多速率的仿真研究,进一步提高仿真速度。动态相量法选择占主导优势的频率进行相域分析,突破了准稳态的限制,同时具有对电力电子装置建模

能力,也可作为微网快速暂态仿真和分析的工具。

参考文献:

[1] 王成山,李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化,2010,34(2):10-14,23.
WANG Chengshan,LI Peng. Development and challenges of distributed generation,the micro-grid and smart distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(2):10-14,23.

[2] MARTIN J I S,ZAMORA I,MARTIN J J S,et al. Hybrid fuel cells technologies for electrical microgrids[J]. Electric Power Systems Research,2010,80(9):993-1005.

[3] ONAR O C,UZUNOGLU M,ALAM M S. Dynamic modeling,design and simulation of a wind/fuel cell/ultra-capacitor-based hybrid power generation system[J]. Journal of Power Sources,2006,161(1):707-722.

[4] SAHA A K,CHOWDHURY S,CHOWDHURY S P,et al. Modeling and performance analysis of a microturbine as a distributed energy resource[J]. IEEE Trans on Energy Conversion,2009,24(2):529-538.

[5] FAKHAM H,DI Lu,FRANCOIS B. Power control design of a battery charger in a hybrid active PV generator for load-following applications[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics,2011,58(1):85-94.

[6] KARIMI H,DAVISON E J,IRAVANI R. Multivariable servomechanism controller for autonomous operation of a distributed generation unit:design and performance evaluation[J]. IEEE Trans on Power Systems,2010,25(2):853-865.

[7] 王鹤,李国庆. 含多种分布式电源的微电网控制策略[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):19-23.
WANG He,LI Guoqing. Control strategy of microgrid with different DG types[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):19-23.

[8] 焦阳,宋强,刘文华. 基于改进 MPPT 算法的光伏并网系统控制策略[J]. 电力自动化设备,2010,30(12):92-96.
JIAO Yang,SONG Qiang,LIU Wenhua. Control strategy of grid-connected photovoltaic generation system based on modified MPPT method[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(12):92-96.

[9] STEWART E M,TUMILTY R,FLETCHER J,et al. Analysis of a distributed grid-connected fuel cell during fault conditions[J]. IEEE Trans on Power Systems,2010,25(1):497-505.

[10] RAMTHARAN G,ARULAMPALAM A,EKANAYAKE J B,et al. Fault ride through of fully rated converter wind turbines with AC and DC transmission[J]. IET Renewable Power Generation,2009,3(4):426-438.

[11] 朱颖,李建林,赵斌. 双馈型风力发电系统低电压穿越策略仿真[J]. 电力自动化设备,2010,30(6):20-24.
ZHU Ying,LI Jianlin,ZHAO Bin. Simulation of LVRT strategy for DFIG wind power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(6):20-24.

[12] JOHN V,YE Z,KOLWALKAR A,et al. Investigation of anti-islanding protection of power converter based distributed generators using frequency domain analysis[J]. IEEE Trans on Power Electronics,2004,19(5):1177-1183.

[13] PAPATHANASSIOU S,HATZIARGYRIOU N,STRUNZ K. A benchmark low voltage microgrid network[C]//CIGRE Symposium.

- Athens, Greece; [s.n.], 2005:1-5.
- [14] ESRAM T, CHAPMAN P L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(2):439-499.
- [15] 汉斯 S 劳申巴赫. 太阳能电池阵设计手册[M]. 张金熹, 廖春发, 傅德棣, 等, 译. 北京: 宇航出版社, 1987:42-45.
- [16] GOW J A, MANNING C D. Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies[J]. IEE Proceedings—Electric Power Applications, 1999, 146(2):193-200.
- [17] MOLINA M G, MERCADO P E. Modeling and control of grid-connected photovoltaic energy conversion system used as a dispersed generator[C]//Proceedings of the 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Bogota, Colombia; [s.n.], 2008:1-8.
- [18] 刘邦银, 段善旭, 刘飞, 等. 基于改进扰动观察法的光伏阵列最大功率点跟踪[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6):91-94.
- LIU Bangyin, DUAN Shanxu, LIU Fei, et al. Photovoltaic array maximum power point tracking based on improved perturbation and observation method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6):91-94.
- [19] BLAABJERG F, TEODORESCU R, LISERRE M, et al. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2006, 53(5):1398-1409.
- [20] ZHU Y, TOMSOVIC K. Development of models for analyzing the load-following performance of micro turbines and fuel cells[J]. Electric Power Systems Research, 2002, 62(1):1-11.
- [21] 王成山, 黄碧斌, 李鹏, 等. 典型燃料电池三种仿真模型的适应性分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(22):103-108.
- WANG Chengshan, HUANG Bibin, LI Peng, et al. Adaptability analysis of three typical fuel cell simulation models[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(22):103-108.
- [22] ERIC M F, IAN A H. Dynamic of a microgrid supply by solid oxide fuel cells[C]//Bulk Power System Dynamics and Control. iREP Symposium. Charleston, USA; [s.n.], 2007:1-10.
- [23] YE Z, WALLING R, MILLER N, et al. Reliable, low-cost distributed generator/utility system interconnect[R]. New York, USA: National Renewable Energy Laboratory, 2006.
- [24] GAONKAR D N, PILLAI G N, PATEL R N. Dynamic performance of microturbine generation system connected to a grid[J]. Electric Power Components and Systems, 2008, 36:1031-1047.
- [25] GUDA S R, WANG C, NEHRIR M H. A Simulink-based microturbine model for distributed generation studies[C]//Proceedings of the 37th Annual North American. Ames, USA; [s.n.], 2005:269-274.
- [26] YUNWEI L, VILATHGAMUWA D M, POH C L. Design, analysis, and real-time testing of a controller for multibus microgrid system[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19(5):1195-1204.

作者简介:

李鹏(1981-), 男, 天津人, 讲师, 博士, 研究方向为电力系统电磁暂态仿真与分布式发电技术(E-mail: lip@tju.edu.cn);

王成山(1962-), 男, 天津人, 长江学者特聘教授, 主要从事电力系统安全性分析、城市电网规划和配电系统自动化、分布式发电等方面的研究(E-mail: cswang@tju.edu.cn)。

Methodology of transient simulation in time domain for DG and microgrid(3): case study and validation

LI Peng¹, WANG Chengshan¹, HUANG Bibin², GAO Fei³, DING Chengdi¹, YU Hao¹

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. State Grid Energy Research Institute, Beijing 100052, China;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Typical DGs and corresponding control strategies are selected for validating the correctness and effectiveness of transient simulation algorithm for DG system. Different DG systems are modeled and simulated, including PV, SOFC, microturbine and battery. The transients from grid-connected mode to islanded mode are investigated for typical European low-voltage microgrid and the simulative results are compared in detail between TSDG and MATLAB/SimPowerSystems, which shows the maximum relative error is less than 0.1%, proving the high numerical accuracy and numerical stability of TSDG. The application of pseudo Newton method enhances the calculation speed. The concepts of parallel processing and multi-rate algorithm to improve the calculation performance in future work are discussed.

Key words: distributed power generation; microgrid; transient simulation; time domain analysis; photovoltaic cells; fuel cells; microturbine; electric batteries