

分布式发电微网系统暂态时域仿真方法研究 ——(二)建模、设计与实现

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: 通过对分布式发电微网系统各组成部分的详细分析,介绍了基于一般应用场景下的暂态仿真建模需求,特别强调了各种分布式电源的建模方式,在此基础上采用面向对象思想设计并实现了分布式发电微网系统暂态仿真程序,应用分层设计明确了计算资源、仿真计算与高级应用间的相互关系,通过对对象和接口的详细设计降低了程序的耦合,提高了对象的内聚性和算法的复用性。分布式发电微网系统暂态仿真程序提供了系统底层的建模与计算能力,同时具有良好的可扩展性,可以满足各种应用场景下的仿真计算需求。

关键词: 分布式发电;微网;暂态仿真;时域;建模;面向对象设计;接口

中图分类号: TM 711;TM 712.1+2

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.03.003

0 引言

对分布式发电微网系统暂态问题的研究需要根据不同的研究目的对系统进行建模,在此基础上,获取元件的模型参数,采用准确、快速的数值方法仿真计算得到所需结果。在此过程中,元件模型参数的获取通常较为困难,需要和现场物理试验的结果相互校正;对于元件建模,由于暂态过程的时间尺度特性,元件在不同的频率范围内需采用不同的模型加以描述^[1-2],如在低频范围内(0.1~3 000 Hz)线路模型可用集中参数表示,而在高频范围内则需要采用分布参数线路模型,有时还需要计及元件的频率相关特性;对于仿真计算,则更多地体现在处理各种复杂问题的能力和数值求解的精度与数值稳定性方面,强调程序的建模与仿真能力。

分布式发电微网系统暂态仿真侧重于分布式发电单元、混合发电单元以及微网中各种快速变化的暂态过程的详细仿真,同时兼具含分布式电源及(或)微网的大电网的仿真能力,特别强调仿真结果的准确性和完整性,因此在系统层面采用详细的元件模型对包括电网、电力电子装置、分布式电源及各种控制器进行建模,结合电力系统电磁暂态仿真与电路仿真的基本理论与方法,可以捕捉频率范围从几百 kHz 到工频之间系统中的电气量和非电气量的动态过程。

本文基于一般的暂态分析建模需求,从模型实现角度介绍了分布式发电单元中各部分元件的暂态仿真建模方法,根据模型的建模需求描述了暂态仿真程序的框架设计思路,并详细介绍了暂态仿真程序的对象与接口设计。

1 分布式发电系统暂态仿真建模

从结构上看,一个完整的分布式发电单元主要包括分布式电源、电力电子变流器、滤波器、控制器以及电网和负荷,如图 1 所示。从程序实现上看,各类元件需要在电气及控制系统中分别建模求解。

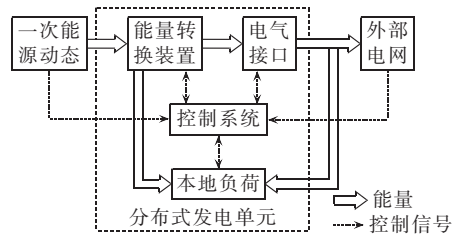


图 1 分布式发电单元组成示意图

Fig.1 Schematic diagram of DG unit

1.1 分布式电源建模

分布式电源是分布式发电单元的重要组成部分,对不同类型的分布式电源,其动态模型差异较大;一些分布式电源模型以静态特性为主,如光伏电池^[3-5]、燃料电池^[6];另一些则以动态特性为主,如风机^[7]、微型燃气轮机^[8-9]。其共性在于具有较强的非线性特性,其中大部分属于连续的非线性特性。针对于各种分布式电源模型的实现,可以通过内置于电气系统的完整模型提供给用户,也可以通过控制系统的基本元件由用户自定义完成。对于完整的内置模型建模,一方面由于目前的各种分布式电源模型尚未成熟,很多种类的分布式电源模型还在不断发展

收稿日期:2012-05-15;修回日期:2013-01-23

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)

之中,内置模型不利于模型的更新与扩展,降低了程序的灵活性;另一方面,在电气系统中各种非线性元件的求解主要基于预测校正法和补偿法,前者的数值稳定性较差,而后者则必须用分布参数线路分隔多个非线性元件^[10]。通过上述分析,本文采用控制系统的基本元件对各种分布式电源进行自定义建模。很多分布式电源的数学模型是以传递函数形式表示的,因此自定义的建模方式更易于模型的实现,如图 2 所示的单轴形式的微型燃气轮机模型。此外,由于控制系统采用基于牛顿迭代的联立求解方法,比预测校正法的数值稳定性更好。

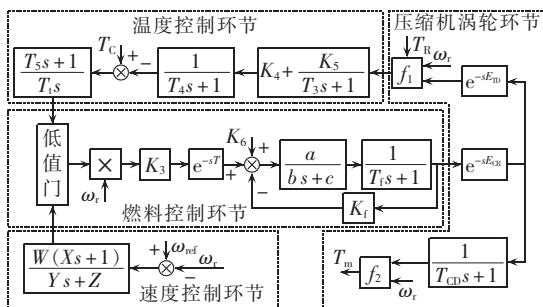


图 2 单轴形式的微型燃气轮机模型

Fig.2 Model of microturbine with single-shaft

利用控制系统元件对分布式电源建模时,电气系统中测量元件(电压表、电流表等)得到的电气量作为控制系统的输入,而将控制系统的输出以受控源(受控电压源、受控电流源等)的形式模拟分布式电源在电气系统中的外特性。图 3 给出了包含永磁同步电机模型的微型燃气轮机发电单元原动部分的建模示意图,其中 PLL 为锁相环^[11],PMSM 为基于传递函数的永磁同步电机模型,MT 为图 2 给出的微型燃气轮机模型, $[T(\theta)]$ 和 $[T(\theta)]^{-1}$ 分别为派克(Park)变换和反变换。其他类型的分布式电源(光伏电池、燃料电池、蓄电池等)的建模方法与此类似,这里不再赘述。

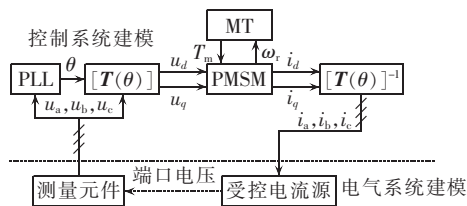


图 3 微型燃气轮机原动部分建模示意图

Fig.3 Modeling of prime mover part of microturbine

在分布式发电单元中,相对于机械传动过程、热力学动态以及化学和电化学反应而言,单元中电场与磁场的相互作用通常具有相对较小的时间常数,根据经验可认为单元中机械变量、热力学变量等反映慢动态过程的参数来不及发生变化,因此可针对

不同的研究目的对分布式电源模型进行适当化简,提高仿真程序的计算速度。如在燃料电池发电单元中,由于内部气体分压力的时间常数较大^[12],在暂态仿真建模时可近似认为它们为常值。

1.2 电力电子装置建模

除少数的分布式电源可通过同步或异步电机直接并网外,大多数类型的分布式电源需要通过电力电子装置与工频交流电网(或负荷)接口^[13],用以解决不同电压等级、不同频率以及交直流系统间的能量传递问题。当前,各种形式的整流器、逆变器及斩波电路等在分布式发电单元中均获得了广泛的应用。

电力电子装置通常由电力电子开关组成。暂态仿真建模时,一般需要计及电力电子装置详细的动态过程以便进行谐波分析等系统级分析。详细模型是利用基本的元件通过拓扑连接实现对电力电子电路的建模,部分商业软件则通过内部封装向用户提供典型的电力电子装置模型。在面向系统级仿真时,包括二极管、晶闸管、IGBT 等在内的各种电力电子元件可采用开关模型或双电阻模型表示。在低频场景下的应用中,如果不需要考虑电力电子装置输出的谐波成分,可基于状态空间平均模型对电力电子装置进行化简^[14]。

1.3 控制器建模

分布式发电单元的控制从功能上可分为 3 个层面,它包括分布式电源的控制、电力电子装置自身的控制以及网络层面的电压与频率调节。从功能实现角度而言,这些控制功能多是通过电力电子装置的控制实现的。光伏发电单元中的最大功率点跟踪 MPPT(Maximum Power Point Tracking)就是一种典型的分布式电源控制;电力电子装置的控制主要是根据不同的控制目的采用不同的控制方法,如比例积分控制、滞环控制等,通过单环或双环的控制结构以达到所需的暂态和稳态控制效果;对于网络层面的控制,则根据电网运行的需要对分布式电源运行方式进行调节,可在并网逆变器处采用恒功率控制、 U/f 控制或下垂控制等控制策略^[15]实现分布式电源和电网的交互。

对分布式发电单元中的各种控制器建模宜采用基本控制元件的组合来实现并在控制系统中计算求解。分布式发电单元的控制模型中常含有较多不连续的非线性环节,也称硬非线性(hard nonlinearity)环节,如比较环节、选择环节等。此时,描述元件输入/输出关系的特性方程会随着输入(输出)量的变化而不同,计算求解时需要检测上述环节的控制逻辑并在元件特性变化时重新形成雅可比矩阵,这同电气系统中的开关模型在本质上是是一致的,在应用伪牛顿法求解控制系统时需要特别注意。图 4 为基于伪牛顿法在一个步长内控制系统求解的基本流程。

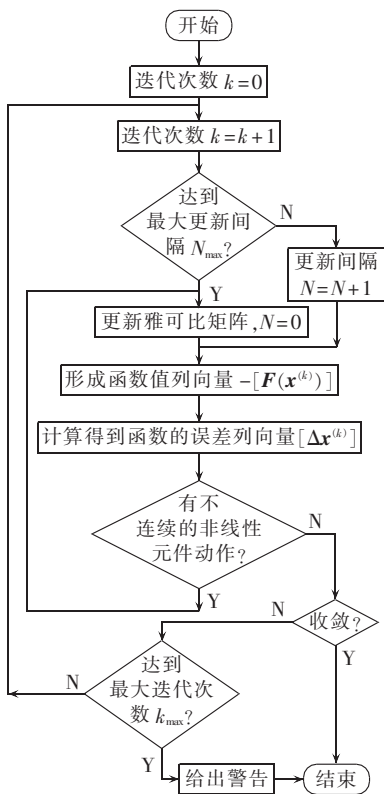


图 4 基于伪牛顿法的控制系统求解流程
Fig.4 Flowchart of control system solution based on pseudo Newton method

1.4 网络及负荷建模

在电网侧,分布式发电单元需要对各种常见的电气元件进行建模,包括线路、变压器、滤波器及负荷等。分布式电源在运行时以接入中低压配网为主,需要考虑配电系统中参数不对称、负载不平衡甚至是接地方式的影响。本文的暂态建模仿真方法能够完全满足配电系统三相详细建模的需求,同时也具有特殊情况下单相建模的能力,能够充分反映不同网络结构、不同接地方式与不同负载水平下对分布式发电单元动态过程的影响。在一般情况下,由于配电线路的供电范围较短,采用集中参数表示的 PI 型等效电路或串联阻抗模型是合适的^[10,16],其电气参数可由线路的几何参数计算得到^[17]。在分布式发电单元中,除了作为馈线处的配电变压器实现电压调整功能外,一些情况下分布式电源的并网变压器也用以抑制注入系统的谐波,因此需要着重考虑变压器接线方式的影响。对系统中负荷的建模与传统电磁暂态仿真的负荷模型是一致的,可以采用串联阻抗和(或)异步电机模拟。对于线性阻抗支路、变压器及电机等常规电气元件的建模方法在文献[10,18]中已有介绍,此处不再赘述。

2 总体架构设计

基于前述暂态仿真算法与分布式发电单元暂态仿真的建模需求,本文采用面向对象思想,以 C++ 语

言实现了分布式发电微网系统暂态仿真程序 TSDG (Transient Simulator for Distributed Generation and microgrid)。从技术层面看,分布式发电微网系统暂态仿真程序可分为 3 个部分,如图 5 所示,包括核心计算资源、基础仿真计算及高级功能需求。

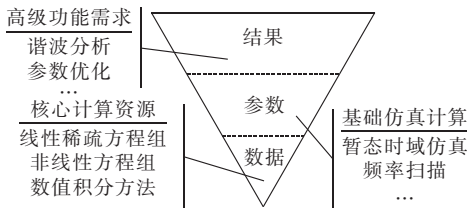


图 5 暂态仿真程序层次结构
Fig.5 Hierarchical architecture of transient simulation program

2.1 计算资源层

位于最底层的是程序的核心计算资源,它具有线性稀疏方程组求解、非线性方程组求解、线性插值、特征值计算及各种数值积分等暂态仿真程序所需的多种基本数学问题的计算求解能力。部分简单的功能可根据计算需求编程实现,复杂的功能可借助现有成熟可靠的商业软件包来实现,如本文采用开源免费的 sparse 库^[19]实现对线性稀疏方程组的求解。计算资源层与它上层的仿真计算层进行接口,用以处理仿真计算层的各种计算要求,并将计算结果的数据返回给仿真计算层。

2.2 仿真计算层

仿真计算层主要完成各种基本的仿真计算功能,包括稳态计算、暂态仿真、频率扫描等,其核心是暂态仿真功能,一个完整的暂态时域仿真流程如图 6 所示,它由 4 个部分组成。

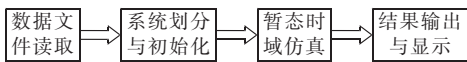


图 6 暂态时域仿真的基本步骤
Fig.6 Basic steps of transient simulation in time domain

- a. 读取数据文件。它包括仿真参数和元件参数两部分,前者应提供仿真步长、仿真时间、系统缺省频率等参数,后者应包括元件的基本信息(元件类型与元件名称)、拓扑连接关系(始末节点号)、元件基本参数、数据输出控制参数 4 个部分。
- b. 系统划分与初始化。由于控制系统与电气系统的元件特征不同,应在初始化前加以识别;此外,在采用控制系统元件对分布式电源及其控制器建模时,不同的分布式电源及其控制器之间是自然解耦的,也应通过拓扑连接关系加以识别。而对于初始化过程,应分为 2 步进行:首先,根据读取的数据文件完成模型参数的初始化、元件等效电导的计算及相关准备工作;其次,由稳态平衡点信息对模型中的

电气量进行初始化,如历史量的赋值等。

c. 暂态时域仿真。它涉及元件模型与系统解算 2 个层面,主要是对前文介绍的暂态仿真算法的实现。从系统层面看,它包括电气系统与控制系统的交替求解。电气系统解算侧重于电力电子开关模型的动作逻辑,控制系统解算则侧重于各种非线性特性的精确求解。对于元件的功能设计将在下面的详细设计中加以介绍。

d. 结果输出与显示。它可以根据不同的数据格式提供灵活和可扩展的数据输出并显示。

仿真计算层通过对计算资源的调用完成仿真计算功能,并将仿真结果提供给在它之上的高级分析功能层。

2.3 高级分析功能层

高级分析功能层位于整个程序架构的最顶端,它主要根据仿真计算的结果进行各种高级应用分析,如谐波分析、参数优化等。高级分析功能层可以通过接口调用仿真计算层的仿真功能,也可以直接调用计算资源层的各种计算资源,完成不同需求的计算功能,如快速傅里叶变换等。这部分的功能实现不是本文的重点。

总体而言,相对较少的计算资源可以完成丰富的仿真计算功能,从而实现不同目的的各种类型的应用。从图 5 中可以看到,越往下其需求就越是相同或相似。协作和耦合是从较高层到较低层进行的,要避免从底层到高层的耦合。

3 详细设计

根据前面介绍的暂态仿真功能需求,可以从元件(Element)、算例(Case)及解算器(Solver)3 个层面对模型和算法进行抽象,如图 7 所示。

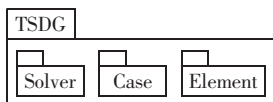


图 7 TSDG 的系统设计
Fig.7 System design of TSDG

3.1 对象设计

对于元件建模,文献[20]提出了基于支路的建模设计思想,它适用于电气系统的元件建模,但对控制元件则不适用。本文通过对元件模型的抽象,设计了元件基类,考虑到电气系统与控制系统元件的不同特征,分别派生出电气元件基类与控制元件基类,在此基础上对各种电气元件与控制元件进行建模。图 8 给出了 TSDG 中对象之间的相互关系。

从图 8 中可以看出,元件通过继承可以具有电气元件或控制元件的基本属性,在此基础上实现不同元件的行为特征。它们通过聚合关系构成了电气

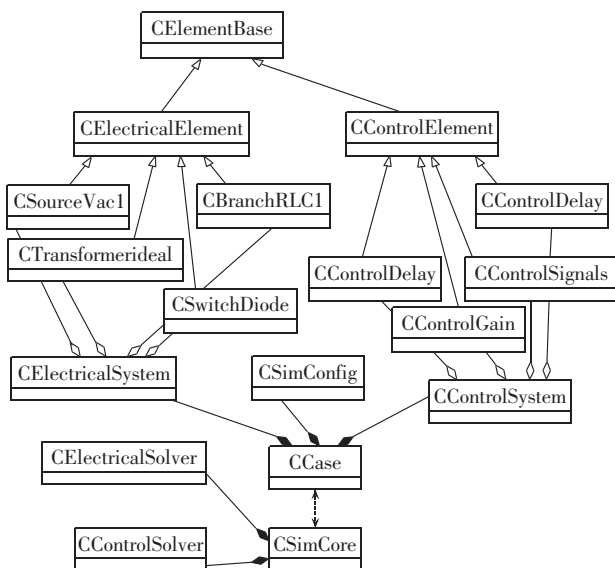


图 8 TSDG 面向对象建模
Fig.8 Object-oriented modeling of TSDG

系统类与控制系统类,对不同属性的元件分别进行管理;此外,电气系统类(CElectricalSystem)、控制系统类(CControlSystem)及仿真信息类(CSimConfig)通过组合实现算例类(CCase)。模型与仿真算法类(CSolver)通过算例类进行接口。

3.2 接口设计

对象通过接口与外部进行交互,接口提供了类的外部视图,隐藏了它的结构和内部行为。暂态仿真程序设计时,电气元件和控制元件在系统层面上各自具有很多相同的行为特征,可以通过接口设计实现对象的多态性,从而简化程序设计。以电气系统为例,通过在电气系统类中对所有电气元件的遍历可以实现系统层面的各种功能调用,图 9 给出了电气元件基类、电气系统类与电气算法类的一部分接口设计。在电气元件基类的声明中可将部分成员函数置为纯虚函数,要求派生的电气元件必须给出这些成员函数的实现,主要是考虑到各元件的上述实现必不相同。非纯虚的成员函数则没有这个限制,如有的元件模型(电阻、开关等)不参与注入电流源列向量的形成,因此,可不必给出其成员函数 formlaug() 的实现。

此外,在一些情况下,由第三方提供的程序(库)

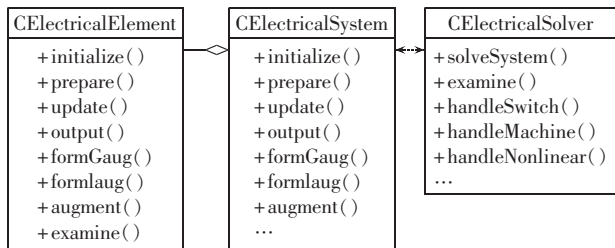


图 9 类接口设计
Fig.9 Interface design of classes

也需要通过接口设计封装不同的软件实现,为程序提供清晰、统一的接口,如TSDG中采用的sparse库原本是基于C语言实现的,使用时需要重新进行接口的设计与封装。

4 结语

基于详细建模的电路仿真在电子电路系统中获得了广泛的应用(SPICE类程序);而传统的基于电路仿真方法的电磁暂态仿真程序(EMTP类程序)在超高压输电系统的分析、设计领域同样也获得了十分广泛的应用。当前,基于电路与电磁暂态仿真框架的分布式发电单元暂态仿真将在中低压的配电系统层面发挥十分重要的作用。本文通过对分布式发电单元各部分的结构分析,给出了一般应用场景下的对暂态仿真的建模需求。需要特别强调的是分布式发电微网系统暂态仿真程序提供了系统底层的建模与计算能力,具有良好的可扩展性,在此基础上可面向控制与保护装置建模、过电压与绝缘配合等其他方面的应用。在程序设计方面,采用面向对象思想通过分层设计实现了对对象关系分离、高层应用与低层服务分离、特定应用与一般性计算分离,减少了程序间的耦合和依赖性,增加了对象的内聚性,提高了算法的复用性和可维护性,并且使各个层面的功能与接口更加清晰。对于对象和接口设计,文章着重于介绍程序的设计思想,而对暂态仿真算法的实现方式和实现技术仅提供一个基本的实现思路,供读者参考。

参考文献:

- [1] MARTINEZ-VELASCO J A. Power system transients: parameter determination[M]. Boca Raton, USA: CRC Press, 2009: 2-6.
- [2] RUHLE O. NETOMAC theory book[M]. Berlin, Germany: PTD SE PT SW-dn0040/Ru, 2005: 4-6.
- [3] 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, Columbia: [s.n.], 2008: 1-8.
- [4] 周德佳, 赵争鸣, 吴理博, 等. 基于仿真模型的太阳能光伏电池阵列特性的分析[J]. 清华大学学报, 2007, 47(7): 1109-1112, 1117. ZHOU Dejia, ZHAO Zhengming, WU Libo, et al. Analysis characteristics of photovoltaic arrays using simulation[J]. Journal of Tsinghua University, 2007, 47(7): 1109-1112, 1117.
- [5] 栗秋华, 周林, 刘强, 等. 光伏并网发电系统最大功率跟踪新算法及其仿真[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(7): 21-25. LI Qiuhua, ZHOU Lin, LIU Qiang, et al. Simulative research of MPPT for photovoltaic power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(7): 21-25.
- [6] 方如举, 张原敏. 燃料电池并联供电系统的建模和控制[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(1): 75-78.
- FANG Ruju, ZHANG Yuanmin. Modeling and control of power supply system with parallel fuel cells[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(1): 75-78.
- [7] 孙国霞, 李啸骢, 蔡义明. 大型变速恒频风电系统的建模与仿真[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(10): 69-73. SUN Guoxia, LI Xiaocong, CAI Yiming. Modeling and simulation of variable-speed wind generator system with large capacity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(10): 69-73.
- [8] GAONKAR D N, PATEL R N. Modeling and simulation of microturbine based distributed generation system[C]//Proceedings of the 2006 IEEE Power India Conference. New Delhi, India: [s.n.], 2006: 256-260.
- [9] GAONKAR D N, PILLAI G N, PATEL R N. Seamless transfer of microturbine generation system operation between grid-connected and islanding modes[J]. Electric Power Components and Systems, 2009, 37(2): 174-188.
- [10] DOMMEL H W. 电力系统电磁暂态计算理论[M]. 李永庄, 林集明, 曾昭华, 译. 北京: 水利电力出版社, 1991: 251-257.
- [11] 黎小林, 黄莹, 谢施君, 等. 基于PSCAD/EMTDC的锁相环建模与性能分析[J]. 南方电网技术, 2008, 2(4): 42-46. LI Xiaolin, HUANG Ying, XIE Shijun, et al. Modeling and analysis of PLL based on PSCAD/EMTDC[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(4): 42-46.
- [12] MOHR M, FRANKE W T, WITTIG B, et al. Converter systems for fuel cells in the medium power range—a comparative study[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2010, 57(6): 2024-2032.
- [13] BLAABJERG F, CHEN Z, KJAER S B. Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19(5): 1184-1194.
- [14] WANG C. Modeling and control of hybrid wind/photovoltaic/fuel cell distributed generation systems[D]. Bozeman, USA: Montana State University, 2006.
- [15] 肖朝霞. 微网控制及运行特性分析[D]. 天津: 天津大学, 2008. XIAO Zhaoxia. Control and operation characteristic analysis of a microgrid[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [16] KUNDUR P. 电力系统稳定与控制[M]. 周孝信, 宋永华, 李兴源, 等, 译. 北京: 中国电力出版社, 2002: 138-139.
- [17] KERSTING W H. Distribution system modeling and analysis[M]. Boca Raton, USA: CRC Press, 2002: 77-125.
- [18] WATSON N, ARRILLAGA J. Power systems electromagnetic transients simulation[M]. London, UK: The Institution of Electrical Engineers, 2003: 67-71, 159-191.
- [19] KUNDERT K S. Sparse13—a sparse linear equation solver[EB/OL]. [2012-02-23]. <http://www.netlib.org/sparse/>.
- [20] NODA T. Object oriented design of a transient analysis program[C]//Proceedings of the 2007 International Conference on Power Systems Transients. Lyon, France: [s.n.], 2007: 1-6.

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)。

(下转第32页 continued on page 32)

Object-oriented reconfiguration of shipboard power network using multi-objective grid evolutionary algorithm

JIANG Yanjun^{1,2}, JIANG Jianguo¹, ZHANG Yuhua¹

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. School of Information Science and Technology, Zhejiang Shuren University, Hangzhou 310015, China)

Abstract: With the consideration of out-of-service loads, network active power loss, line load distribution imbalance and switch operation times, a reconfiguration model of shipboard power network is built. An object-oriented intelligent reconfiguration approach based on the multi-objective grid evolutionary algorithm is proposed for shipboard power network, which takes the grid as a carrier, carries out the selection, crossover and mutation in the neighborhood range and adopts the elitist strategy. Without affecting the global optimality of solution, its execution time is greatly reduced. A public base platform is formed by extracting the common attributes and operations from different Pareto-based reconfiguration algorithms. The calculation method of hypervolume metric is improved to realize the fair comparison among different algorithms. Case analysis shows that, the proposed approach is better than NSGA-II and SPEA2 in the tendency and distribution degree of obtained solution set, as well as the calculation time.

Key words: network reconfiguration; multi-objective grid evolutionary algorithm; Pareto optimality; hypervolume; shipboard power network; evolutionary algorithms

(上接第 19 页 continued from page 19)

Methodology of transient simulation in time domain for DG and microgrid(2): modeling, design and implementation

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: The components of DG and microgrid are analyzed in detail and the requirements of modeling for transient simulation in general applications are introduced. The modeling method for various DG units is emphasized, based on which, the object-oriented concept is adopted in the design and implementation of the transient simulation program for DG and microgrid. The hierarchical design is applied to clarify the relationship among computation resource, simulation calculation and advanced application. The detailed design of objects and interfaces reduces the program coupling and enhances as well the cohesiveness of objects and the reusability of algorithms. The program supports the capabilities of modeling and computation at the circuit and element level, which can be easily extended to different simulation scenarios.

Key words: distributed power generation; microgrid; transient simulation; time domain; model buildings; object-oriented design; interface