

PSCAD/EMTDC-MATLAB 联合仿真技术 在 SVC 控制系统仿真建模中的应用

邹宁,方存洋,刘育鑫,王小红,朱振飞
(南瑞集团国电南瑞科技股份有限公司,江苏南京 210003)

摘要:基于 MATLAB/Simulink 与 PSCAD/EMTDC 接口元件,提出了一种应用 PSCAD/EMTDC-MATLAB 联合仿真技术搭建详细静止无功补偿器(SVC)控制系统仿真模型的方法,其中控制系统的核心部件电压/无功功率调节器模型采用实际 SVC 控制装置算法。对控制系统模型在 SVC 动模试验系统的 PSCAD/EMTDC 模型中进行了仿真计算。仿真数据与实际 SVC 控制装置动模试验录波文件的比较结果表明:控制模型的补偿特性和动态响应性能与实际装置基本一致,证明了仿真建模方法的可行性和仿真模型的正确性。

关键词:PSCAD/EMTDC;MATLAB/Simulink;接口元件;SVC 控制系统;联合仿真

中图分类号:TM769

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2012)05-0040-05

静止无功补偿器(SVC)是较早获得实际应用的柔性/灵活交流输电(FACTS)设备,尤其在钢铁、冶金、化工、电力牵引等领域得到广泛使用,用以改善用户端电能质量,包括治理谐波、提高功率因数、抑制电压波动和闪变等。在大容量 SVC 系统设计阶段,通常需要根据实际工程交流系统及负荷工况,应用系统仿真来校核设计方案的有效性。控制系统是 SVC 的核心部件,其仿真模型是否准确将直接影响 SVC 系统补偿性能和动态响应特性的验证效果。因此有必要研究如何搭建完善并贴近实际 SVC 控制装置的控制系统的仿真模型。PSCAD/EMTDC 是目前比较权威的电力系统电磁暂态仿真软件,由于其包含丰富的电力电子元件模型,在高压直流输电和 FACTS 系统仿真中也得到了普遍应用,但其自带的控制元件相对单一,且参数设置不灵活,不能满足 SVC 控制系统建模需要。矩阵实验室(MATLAB)是美国 MathWorks 公司出品的商业数学软件,主要包括 MATLAB 和 Simulink 两大部分,具有强大的数据处理能力,且内含灵活多样的功能函数和元件库,广泛应用于控制算法的仿真研究中。PSCAD/EMTDC 提供了与 MATLAB/Simulink 仿真模型的接口功能,用户可开发基于 MATLAB/Simulink 的自定义模型,通过接口元件将其与 PSCAD/EMTDC 模型进行连接,使得仿真过程灵活方便,并可充分发挥 2 种仿真软件的优势。文献 [1]、[2] 分别介绍了 MATLAB/Simulink 与 PSCAD/EMTDC 的接口实现方法。基于 MATLAB/Simulink 与 PSCAD/EMTDC 接口元件,文中设计了 SVC 详细控制系统仿真模型,并将其应用至 SVC 动模试验系统的 PSCAD/EMTDC 模型中。

1 MATLAB/Simulink 与 EMTDC 接口原理

EMTDC 是 PSCAD/EMTDC 仿真软件的计算核心,其主程序基于 Fortran 语言开发,由系统动态程序模块(System Dynamics)和电力网络求解模块(Network Solution)两部分组成, System Dynamics 包括数字仿真动态子程序(DSDYN)和数字仿真输出子程序(DSOUT), DSDYN 用于添加控制动态代码, DSOUT 输出经过 Network Solution 模块计算后的变量。EMTDC 主程序结构如图 1 所示。

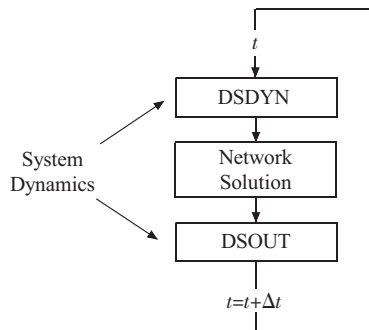


图 1 EMTDC 主程序结构

EMTDC 具有良好的开放性,目前可与 Fortran、C 和 MATLAB 3 种语言编写的代码或程序进行接口。用户将自定义代码添加至 EMTDC 有 2 种方法^[3]:

(1) 直接嵌入。在自定义元件的 PSCAD 脚本定义中编写元件功能的 Fortran 代码,用户代码作为 DSDYN 或 DSOUT 子程序的一部分直接嵌入至 EMTDC 主程序中。

(2) 间接调用。在自定义元件的 PSCAD 脚本定义中添加对外部子程序的调用声明,由 DSDYN 或 DSOUT 子程序对其进行调用,自定义元件的核心功能在外部子程序中实现。

MATLAB/Simulink 与 PSCAD/EMTDC 接口采用间接调用方式。EMTDC 库文件中提供了与 MATLAB/Simulink 的接口子程序 MLAB_INT 和 SIMULINK_INT, 可分别用于调用基于 MATLAB 语言开发的 M 文件和 Simulink 模型 (MDL 文件), 接口程序入口参数包括 M 文件或 MDL 文件的名称及保存路径、输入变量格式定义。通过在接口元件的 PSCAD 脚本定义中添加对接子程序的调用声明, EMTDC 将在每个执行周期由 DSDYN 调用接口子程序, 启动 MATLAB 运行相应的自定义仿真程序, 并将其运算结果通过接口元件返回至 EMTDC。MATLAB/Simulink 与 PSCAD/EMTDC 接口元件内部结构如图 2 所示。

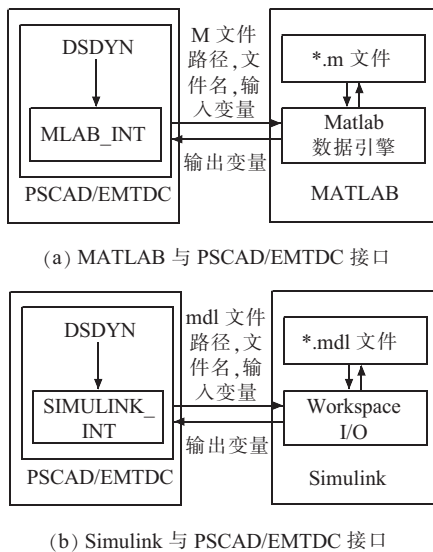


图 2 MATLAB/Simulink 与 PSCAD/EMTDC 接口元件内部结构

2 SVC 控制系统

2.1 SVC 控制系统构成

晶闸管控制电抗器+固定补偿滤波器组 (TCR+FC) 是目前在实际工程中应用最多的 SVC 组合形式, 其控制系统主要由无功功率调节器 (或电压调节器)、TCR 触发控制系统、同步系统、附加控制与保护系统构成^[4]。TCR+FC 型 SVC 应用于用户端的典型控制系统结构如图 3 所示。

2.2 无功功率调节器

无功功率调节器是用户端 SVC 控制系统的核心部件, 其作用是通过处理测量所得到的系统变量产生与需要补偿的无功功率成比例的等效电纳 BTCR 信号, 实现对 TCR 输出功率的连续控制, 进而达到各种系统控制目标。无功功率调节器包括开环控制和闭环控制 2 种基本控制模式。

(1) 开环控制。开环控制模式是用瞬时无功功

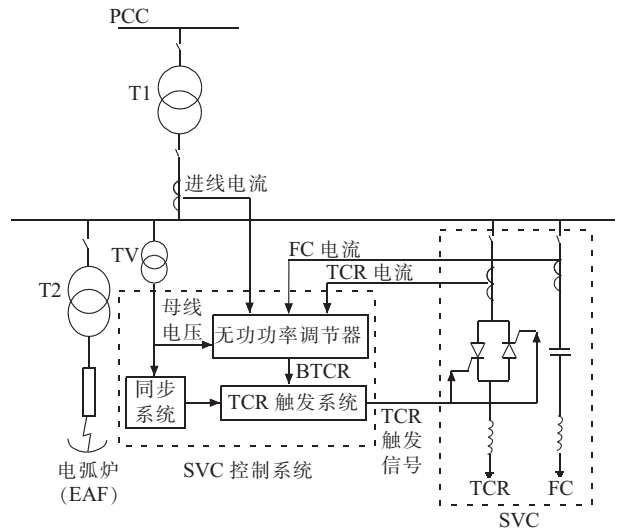


图 3 TCR+FC 型 SVC 及其控制系统结构

率算法^[5,6]实时计算负荷所需的无功功率, 直接对 TCR 补偿电纳 BPCR 进行计算, 并将计算结果经过限幅等环节送到 TCR 触发控制系统中, 用于产生 TCR 触发信号。开环控制具有响应迅速的优点, 经过精心设计的开环控制器的典型响应时间为 4~7 ms。在负荷三相不平衡时, 开环控制可采用不对称控制算法加以补偿: 通过检测负荷中的负序有功分量及负序无功分量, 对非正序基波分量进行补偿, 并采用分相计算补偿电纳大小的方法输出三相补偿电纳。因此开环控制非常适合电弧炉这类冲击性负荷要求利用 SVC 快速补偿无功动态变化及不平衡运行工况的应用场合。

(2) 闭环控制。其工作原理是根据不同的系统控制目标, 将测量得到的控制变量与参考信号进行比较, 得到的误差信号根据一定的控制规律, 如比例积分控制器计算得到 TCR 输出电纳 BPCR, 并将其送至 TCR 触发控制系统中, 使控制变量与参考信号的误差逐步调整至可以接受的范围。闭环控制的参考信号通常为系统母线电压或系统无功功率。

开环控制响应速度快, 但对于控制系统参数变化所引起的控制偏差没有校正能力, 因此在实际工程中通常采用开环控制和闭环控制相结合的方法, 可以兼顾响应速度和控制精度, 达到最优补偿效果。

2.3 TCR 触发控制系统

触发控制系统接收电压调节器输出的电纳参考信号, 产生适合于 TCR 阀组控制的触发指令, 通过触发脉冲发生单元 (CPG) 将触发指令转换成控制脉冲, 送至阀组控制单元 (VCU) 中。

2.4 同步系统

同步系统的主要功能是产生与系统电压基频分量同步的参考脉冲, 作为触发脉冲单元产生 TCR 触发脉冲的基准信号。目前 SVC 控制系统中常用的是

基于数字锁相环(PLL)的同步系统,PLL不仅可以实现与交流电网同步,而且尽可能地减少交流电网扰动对 SVC 控制系统的影响。

2.5 附加控制与保护系统

在基本无功功率调节器中还可添加一些特殊的控制和保护功能,以提高 SVC 控制器的性能。在实际工程中比较常用的附加控制与保护功能包括:TCR 过电流限制功能、TCR 平衡控制功能、机电振荡阻尼功能等。

3 SVC 控制系统建模

3.1 建模方法

PSCAD/EMTDC 的元件库中提供了锁相环 PLL 元件和可控电力电子器件控制脉冲触发元件,可直接用于实现 SVC 控制系统中同步系统和 TCR 触发控制系统的仿真模型。

无功功率调节器作为 SVC 控制系统的核心,决定着 SVC 补偿性能和动态响应特性。为使得仿真模型的输出特性尽可能接近实际控制系统的动作性能,无功功率调节器模型采用国电南瑞 NES-5601 型 SVC 主控装置的调节器算法。由于控制器中包含了空间矢量坐标变换及多种数字滤波器,直接利用 PSCAD/EMTDC 的控制元件库搭建模型具有局限性,不能满足建模需要。而 MATLAB/Simulink 提供了相对灵活多样的控制算法实现方式。

采用 PSCAD/EMTDC 与 MATLAB/Simulink 联合仿真的方法建立 SVC 控制系统详细模型,即先应用 MATLAB/Simulink 搭建无功功率调节器模型,再利用 MATLAB/Simulink 与 PSCAD/EMTDC 的接口元件将调节器模型与同步系统及 TCR 脉冲触发系统的 PSCAD/EMTDC 仿真模型建立连接,形成完整的 SVC 控制系统仿真模型;控制模型仿真步长与 SVC 控制装置算法执行周期一致。

3.2 调节器模型的 MATLAB/Simulink 与 EMTDC 接口元件

根据 NES-5601 型 SVC 主控装置调节器的主要控制功能及算法,分别利用 MATLAB 和 Simulink 搭建了开环控制、电压闭环控制(电网侧用)、无功闭环控制的模型,并设计了模型与 PSCAD/EMTDC 的接口元件。

3.2.1 开环控制接口元件

开环控制接口元件的图形界面如图 4 所示。图中 Openctrl 为开环控制器的 MATLAB 或 Simulink 模型名称,Input 为输入接口变量,接入 PSCAD/EMTDC 模型中母线三相电压和负荷三相电流,若使用 Simulink 模型,输入变量中需增加当前采样时间。

B_OPEN_PH 为输出接口变量,为开环控制模型返回的三相计算电纳 B_{pha} 、 B_{phb} 、 B_{phc} 。



图 4 开环控制接口元件

3.2.2 电压闭环接口元件

电压闭环控制接口元件的图形界面如图 5 所示。图中 UClosetrl 为电压闭环控制器的 MATLAB 或 Simulink 模型名称,Input 为输入接口变量,接入 PSCAD/EMTDC 模型中母线三相电压和 TCR 阀组三角侧电流,若使用 Simulink 模型,输入变量中需增加当前采样时间。B_CLOSEU 为输出接口变量,为电压闭环控制模型返回的计算电纳 B_{closeu} 。

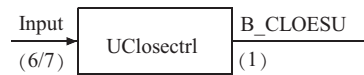


图 5 电压闭环控制接口元件

3.2.3 无功闭环接口元件

无功闭环控制接口元件的图形界面如图 6 所示。图中 QClosetrl 为无功闭环控制器的 MATLAB 或 Simulink 模型名称,Input 为输入接口变量,接入 PSCAD/EMTDC 模型中母线三相电压和进线三相电流,若使用 Simulink 模型,输入变量中需增加当前采样时间。B_CLOSEQ 为输出接口变量,为无功闭环控制模型返回的计算电纳 B_{closeQ} 。

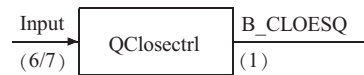


图 6 无功闭环控制接口元件

3.3 SVC 控制系统 PSCAD/EMTDC 模型

SVC 控制系统 PSCAD/EMTDC 模型的图形界面如图 7 所示。

仿真模型中设置了 3 个控制模式切换开关 OPEN_mode、CLOSE_mode、UCLOSE_mode,可以灵活模拟开环控制、闭环控制及电压/无功控制模式切换功能。调节器根据不同的控制模式选择对应的 MATLAB 或 Simulink 控制算法模型的输出变量,将计算电纳信号(B_{tra})经过补偿电纳与触发角转换环节($B_{tr-Alpha}$)计算得到 TCR 触发角,并且经过触发角限幅环节 Limit,输入至 TCR 脉冲触发环节,产生 TCR 两组正反向并联晶闸管的触发信号。TCR 脉冲触发环节的基准信号来自 PLL 锁相环。

4 仿真计算与模型校验

文中根据 SVC 动模试验系统搭建了 PSCAD/EMTDC 仿真模型,并将上述 SVC 控制系统模型接

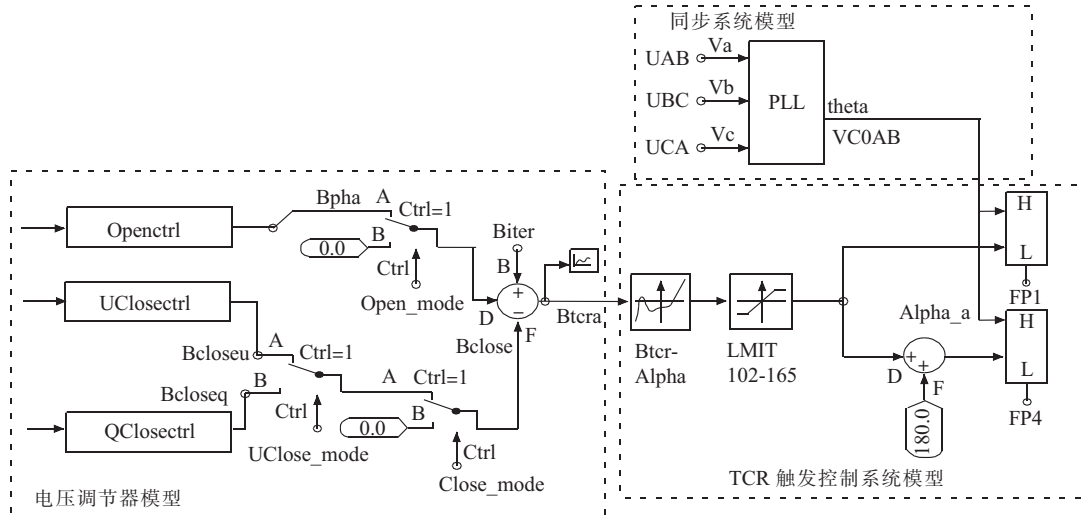


图 7 SVC 控制系统 PSCAD/EMTDC 仿真模型

入一次系统模型中,对 SVC 控制系统模型进行了校验。SVC 动模试验一次系统由 TCR 阀组、4 组 FC 和 1 组电感负载组成,经过变比为 380 V/1 000 V 的联络变压器接至 380 V 用户侧母线。TCR 与 FC 的补偿容量均为 30 kVar。SVC 动模试验系统单线图如图 8 所示。

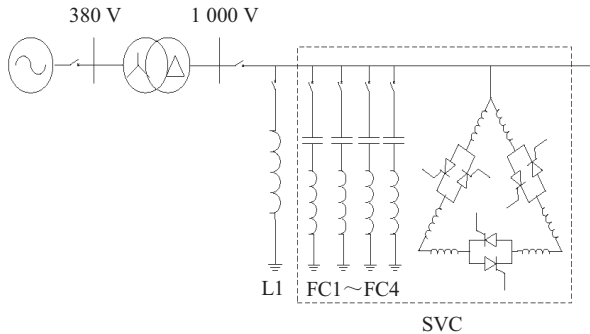


图 8 SVC 动模试验系统单线图

根据 NES-5601 型 SVC 主控装置的动模试验条件对 SVC 控制系统模型进行了仿真计算。投入 2 组 FC,SVC 控制模式设置为无功功率闭环控制投入,系统无功功率参考值在仿真时间为 2.0 s 时由 0.3 pu 阶跃变化至 0,无功闭环控制 PI 调节器的比例系数 K_p 设置为 0.7,积分常数 K_i 设置为 0.3。SVC 控制系统模型的仿真结果如图 9 所示。

通过 PSCAD / EMTDC 的 COMTRADE / RTP Recorder 元件将 SVC 控制系统模型仿真结果转化为标准 COMTRADE 格式文件,与 NES-5601 型 SVC 主控装置动模试验录波数据进行比较,如图 10 所示。可见,SVC 控制系统模型的动态特性与 SVC 主控装置基本一致,无功功率参考值发生阶跃变化后,SVC 控制系统在 18 ms 左右后达到稳定状态,触发角由 110° 变化为 122° ,系统无功功率能达到控制目标。

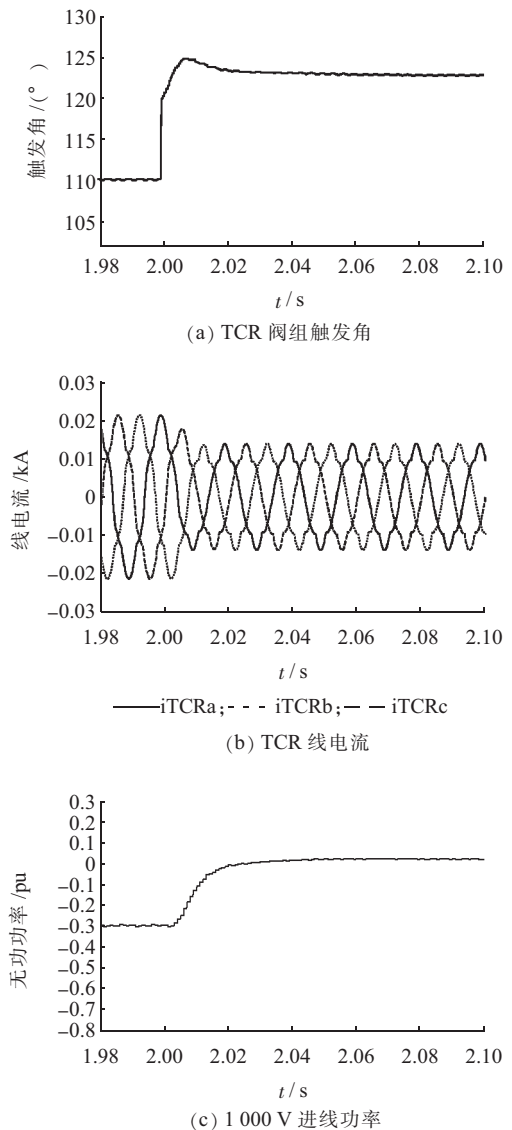
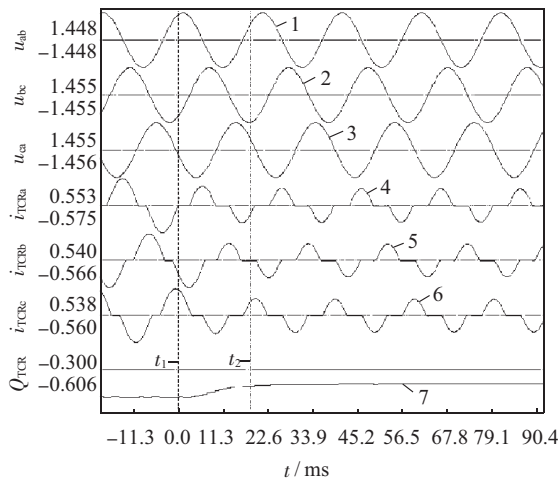


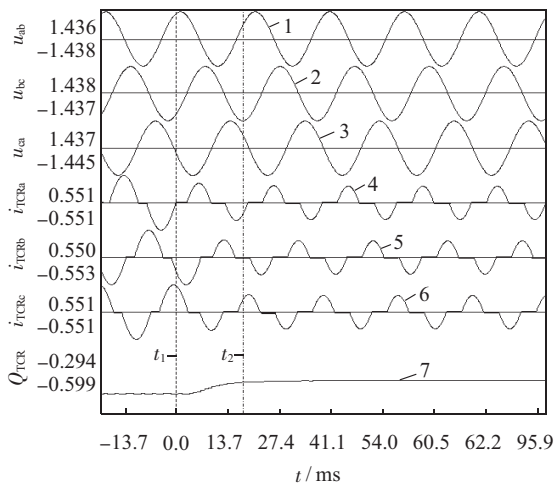
图 9 SVC 控制系统模型仿真结果

5 结束语

利用 MATLAB / Simulink 与 PSCAD / EMTDC



(a) SVC 主控装置录波



(b) SVC 控制系统模型仿真波形

1 为 1 000V 母线 AB 相电压;2 为 1 000V 母线 BC 相电压;
3 为 1 000V 母线 CA 相电压;4 为 TCR 三角侧 A 相电流;5
为 TCR 三角侧 B 相电流;6. 为 TCR 三角侧 C 相电流;7 为
TCR 无功功率

图 10 SVC 控制系统模型仿真数据与 SVC 主控装置
动模试验录波数据比较

接口元件,提出了一种搭建详细 SVC 控制系统模型

的方法。此建模方法可发挥 2 种仿真软件的特点与优势,并可根据实际 SVC 主控装置搭建完善复杂的控制算法模型。在 SVC 动模试验系统模型中的仿真计算结果验证了此建模方法的可行性以及所搭建的控制系统模型的正确性。使用此控制模型校核实际 SVC 工程设计方案,将能更准确地反应实际 SVC 控制装置的动作和补偿性能。此建模方法对研究 SVC 和其他 FACTS 装置的新型控制算法也具有实用价值。

参考文献:

- [1] 杨健维,麦瑞坤,何正友. PSCAD/EMTDC 与 Matlab 接口研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(11): 83-87.
- [2] 乐丽琴,杨小品. PSCAD 与 Simulink 接口的工程实现[J]. 工业控制计算机, 2009, 22(2): 33-34.
- [3] 刘永浩,蔡泽祥,李爱民. PSCAD/EMTDC 自定义建模及在直流线路保护仿真中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 119-124.
- [4] MATHURRM, VARMA R K. 基于晶闸管的柔性交流输电控制装置[M]. 徐政,译.北京:机械工业出版社, 2005.
- [5] 谢小荣,姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理和应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.
- [6] 石新春,齐涛,郑庆红,等. 基于瞬时无功功率理论的 SVC 设计和实现[J]. 电力电子技术, 2008, 42(5): 12-13, 47.

作者简介:

- 邹宁(1977),女,江苏无锡人,工程师,从事 FACTS 技术及其控制保护系统的仿真应用工作;
方存洋(1968),男,安徽寿县人,工程师,从事 FACTS 技术研究及其控制保护系统的研发工作;
刘育鑫(1982),男,黑龙江东宁县人,工程师,从事 FACTS 技术研究及其控制保护系统的研发工作;
王小红(1973),女,安徽怀远人,高级工程师,从事新能源发电及电力电子在电力系统中的应用工作;
朱振飞(1958),男,江苏启东人,高级工程师,从事电力系统及自动化与电力电子的应用工作。

Application of PSCAD / EMTDC-MATLAB Co-simulation Technology in SVC Control System Simulation Modeling

ZOU Ning, FANG Cun-yang, LIU Yu-xin, WANG Xiao-hong, ZHU Zhen-fei
(NARI Technology Development Co.Ltd., Nanjing 210003,China)

Abstract: A method of detailed static var compensator (SVC) control system simulation model built by PSCAD/EMTDC-MATLAB co-simulation technology is proposed based on the interface components of MATLAB/Simulink and PSCAD/EMTDC. The effective SVC control device algorithm is used by the voltage/reactive power control model of the core component of control system. The control system model is simulated in PSCAD/EMTDC model of SVC dynamic model test system. The compare between Simulation data and the wave recording file of actual SVC control device dynamic simulation test shows that compensation characteristics and dynamic response performance of control model are the same as those of the actual device. The feasibility of simulation modeling methods and the correctness of the simulation model are proved.

Key words: PSCAD/EMTDC; MATLAB/Simulink; interface components; SVC control system; co-simulation