

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.08.011

基于短路发电机的容量试验回路的配置参数计算方法

赵庆斌¹, 黄 实¹, 张 菁², 者永祥¹

(1. 西安高压电器研究院股份有限公司, 西安 710077; 2. 西安交通大学, 西安 710049)

摘要: 仿真计算广泛用于获取容量试验参数以反推试验回路设备的配置参数。长久以来试验电源模型均采用理想电源,回路设备参数设置、仿真执行、仿真结果读取均采用人工方式。文中提出采用PSCAD/EMTDC 8阶发电机模型仿真短路发电机在试验时特殊的机电和电磁暂态过程,并通过自动生成Fortran编译文件和通过曲率计算TRV包络线的方法,实现了仿真过程的全自动化,大幅提高了回路配置参数计算的准确性和效率,节约了回路配置参数的计算和调试时间。

关键词: 短路发电机; 自动仿真; 容量试验; 回路配置参数

Parameter Calculation Method for High Power Test Circuit Based on Short-circuit Generator

ZHAO Qingbin¹, HUANG Shi¹, ZHANG Jing², ZHE Yongxiang¹

(1. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 3. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Simulation calculation is widely used to obtain short-circuit test parameters in order to inversely derive the configuration parameters of the test circuit equipment. For a long time, the test power supply is represented by an ideal power source model, while the parameter setting of the circuit equipment, simulation execution, and reading of simulation results have been done manually. In this paper, the use of PSCAD/EMTDC 8th order generator model is proposed to simulate the special electromechanical and electromagnetic transient process of a short circuit generator during testing. By automatically generating Fortran complied files and calculating the TRV envelope through curvature, the full automation of the simulation process is achieved, which significantly improves the accuracy and efficiency of calculating the circuit configuration parameters and reduces the time required for calculation and debugging of these parameters.

Key words: short circuit generator; automatic simulation; high power test; circuit configuration parameter

0 引言

大容量的高压短路试验(也称容量试验)通常采用合成回路,见图1。该回路包含两个部分:低电压大电流部分(虚线AB左侧,通常采用短路发电机为电源,也称电流源)和高电压小电流部分(虚线AB右侧,通常采用以充电电容器为电源的振荡回路,也称电压源)。两个电源和回路相互独立,试验回路配置参数可分开计算和调试。

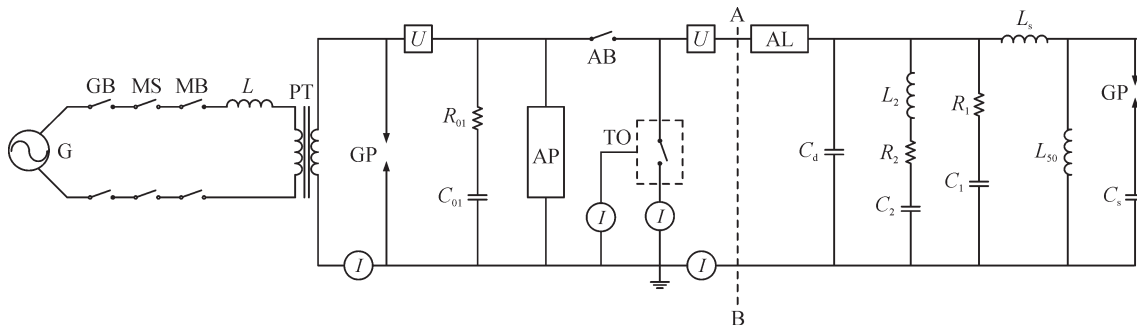
试验回路配置参数(简称回路参数)计算的目标,是在给定试验标准约束下确定回路参数向量为

$$\mathbf{x}_0 = [L_i, R_i, C_i, U_{CS}, \dots]^T \quad (1)$$

使系统响应

$$\mathbf{y}_0(t) = \begin{bmatrix} i(t) \\ u_{\text{TRV}}(t) \end{bmatrix} = f(\mathbf{x}_0, t) \quad (2)$$

式(2)满足标准对短路电流和暂态回复电压(TRV)参数(简称试验参数)的要求。该问题本质上是一个由暂态响应约束驱动的多参数非线性反求问题。长期以来,由于缺少合适的短路发电机模型以及便捷的计算方法,主要依赖人工求解,耗时长、精度差,调试时间较长。



G—短路发电机；GB—保护开关；MS—合闸开关；MB—操作开关；AB—辅助开关；TO—试品；PT—变压器；R—电阻；L—电抗器；C—电容；U—电压测量；I—电流测量；GP—间隙；AP—延弧回路；AL—人工链路。

图1 短路合成试验回路

Fig. 1 Synthetic test loop for high power test

1 已有方法及存在的问题

目前容量试验参数计算有两种方法,即基于理想电源的解析法和基于数值仿真的精细建模法。

1)采用理想电源、理论公式或通用模型进行计算^[1-5]。这种方法无法准确反映短路发电机短路试验时的复杂过程,实际短路时

$$\begin{cases} x''_d = x''_d(t) \\ \psi = \psi(t) \\ \omega_r = \omega_r(t) \\ E_f = E_f(t) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: x''_d 为发电机d轴超瞬变电抗; ψ 为磁链; ω_r 为转子角速度; E_f 为励磁电势。系统更接近如下状态方程形式

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \\ \mathbf{y} = \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: $\mathbf{x}$ 为系统状态变量向量,主要包括定子与转子磁链、阻尼绕组电流及转子转速等; $\mathbf{u}$ 为系统输入变量,包括励磁控制量及拖动转矩等; $\mathbf{y}$ 为系统输出量,对应短路电流及TRV响应; $\mathbf{F}(\cdot)$ 、 $\mathbf{G}(\cdot)$ 分别为系统的状态方程和输出方程,其形式由短路发电机本体、电磁参数及控制系统共同决定。因此,实际短路电流不严格满足文[1-5]所述简单的指数衰减形式,此方法的计算准确度不高。

2)采用场路耦合的时步有限元法求解^[6-8],计算发电机本体的机械、热以及电气暂态过程,涉及多方程求解以及多种参数的设置,专业性较强、计算过程复杂、开发周期长,通常用于发电机设计和制造,无法直接与回路元件相连,仍需对回路电气元件如 L 、 R_{01} 、 C_{01} 等进行建模,基于短路试验场景应用开发工作量较大,且由于无法图形化建模,欠缺灵活性。

综上,参数计算还需在通用电源解析模型物理约束意义的基础上,进一步引入方便且能够反映短

路发电机真实暂态过程的高保真模型。目前常见的发电机模型均基于派克方程,根据转子绕组数量分为2~6阶,其中4阶以下忽略了阻尼绕组,6阶则忽略了磁链衰减和转速^[9]。对于短路发电机,阻尼绕组、磁链衰减、转子转速对短路电流的影响不能忽略^[9-11]在容量试验工况下,上述因素对短路电流具有显著影响,传统模型难以全面反映短路发电机的实际暂态响应。

在计算流程方面,现有方法多依赖人工完成参数设置、仿真运行及结果比对,效率较低且易引入人为误差。虽有文献通过数据转换实现PSCAD模型的自动生成和参数修改,如基于XML语言规则编制文本文件^[12-14]、ini文件^[15]、PMS文件^[16]、模型转换^[17-18]以及FORTRAN自定义建模^[19-21]等,但均基于修改或编辑PSCAD模型文件,存在模型解析、规则转换和坐标映射等多个环节,仍需启动PSCAD进行编译。文[22]虽然提供了借助Windows API来抓取窗口句柄自动运行仿真程序的方式,但仍需逐次输入运行参数。PSCAD自动化运行库虽可实现部分自动化,但仍依赖图形界面,在参数迭代计算场景下效率受限。此外,TRV参数提取通常依赖人工或逐点计算方法,存在计算效率低和收敛性不足等问题,难以满足自动化计算需求。

综上,现有方法在模型精度与计算效率方面均存在不足:一方面,理想电源模型难以反映真实暂态特性,而精细数值方法工程应用复杂;另一方面,计算流程自动化程度不足,难以支撑参数高效迭代求解。因此,有必要建立高保真短路发电机模型,并构建自动化计算方法,以提高容量试验回路参数计算的准确性与效率。

2 短路发电机高阶模型

短路发电机本体、励磁系统以及拖动系统在设

算。结果表明,仿真电流幅值及相位与实际短路波形基本一致。进一步对短路后 60~120 ms 区间内电流有效值进行分段统计,分别选取 60~80、80~100、100~120 ms 3 个时间段,将仿真结果与实际值进行对比,结果见图 4。

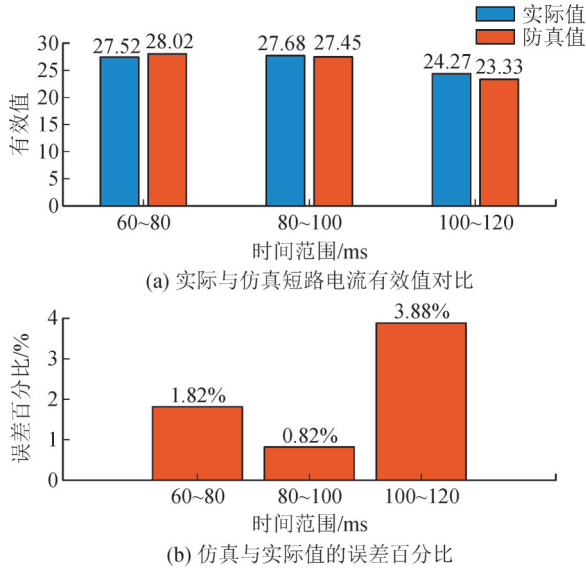


图 4 60~120 ms 内仿真与实际波形有效值及误差

Fig. 4 RMS values and errors of simulated and actual waveforms within 60~120 ms

3 基于自编译的自动计算

为实现容量试验回路参数的高效求解,需仿真计算建立回路参数与试验结果之间的映射关系。采用 PSCAD/EMTDC 对电磁暂态微分方程进行时步离散与数值积分,从而实现系统动态过程的求解,其基本形式可表示为

$$x_{k+1} = x_k + \Delta t \cdot F(x_k, u_k) \quad (5)$$

式(5)中: x 为系统状态变量; u 为输入量; Δt 为仿真步长。

在此基础上,将回路参数计算问题进一步转化为参数空间上的迭代搜索过程,即

$$p^{(n+1)} = p^{(n)} + \Delta p \quad (6)$$

式(6)中: p 为回路参数向量; Δp 由当前计算结果与标准值之间的偏差决定。因此,回路参数计算本质上是一个基于电磁暂态数值求解的自动参数搜索过程,可通过修改模型参数重复仿真计算,实现回路参数的收敛求解。

PSCAD/EMTDC 软件中 PSCAD 主要用于人机交互、模型建立和仿真环境如计算步长等参数的设置,而由 EMTDC 负责具体的电磁暂态计算^[30]。其计算流程见图 5。

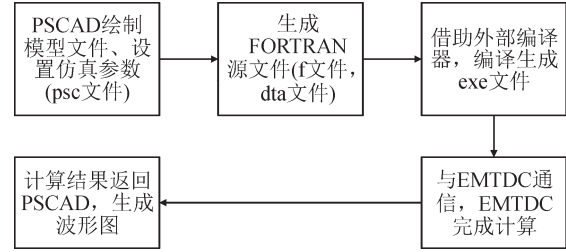


图 5 PSCAD/EMTDC 计算流程

Fig. 5 The process of PSCAD/EMTDC simulation

尽管 4.6.2 以上版本的 PSCAD 提供了基于 Python 运行的自动化运行库(mhrc-automation),可实现仿真启动和模型参数传递,但仍依赖 PSCAD 运行环境,在参数反复修改与多次仿真场景下资源占用较高,运行效率受限。为提高参数搜索效率,提出基于自编译的自动仿真方法。

3.1 模型自动生成和参数自动修改

1)编写 FORTRAN 源文件。为实现模型定义与参数控制,编写 FORTRAN 源文件 f 文件和 dta 文件,定义 PSCAD 内置模型、电气节点索引、控制信号以及内部变量。以图 1 右侧振荡回路为例,在 f 文件中定义开关状态变量 Sp、Gp 以及电压 u 和电流 i 等实数变量,并给出相应控制逻辑;在 dta 文件中, VOLTAGES 段定义电压节点编号及初始值, BRANCHES 段定义各节点间电气元件类型及参数。可通过修改 f 文件调整内置模型如发电机励磁系统参数,通过修改 dta 文件中 BRANCHES 段对应支路及参数来改变回路拓扑结构以及基础元件参数。

2)自动编译。调用 FORTRAN 编译器完成上述 f 和 dta 文件的编译。使用 mak 文件指定编译器链接库的路径、连接器的连接方法、运行目录以及规则。通过调用 Windows API 或批处理 bat 文件设置编译器运行库的路径以及环境变量,使用 make-f 指令完成 f 和 dta 文件的编译和链接,从而实现自动编译。由于编译仅与编译器和编译环境有关,不涉及仿真模型,因而 bat 和 mak 文件内容相对固定,首次编译成功后无需再修改。整个编译过程仅需对 f 或 dta 文件固定区域的内容进行局部修改,无需启动 PSCAD,占用资源少,运行效率高。

上述过程等价于将回路拓扑结构与参数向量映射为数值计算方程,即构建函数

$$M : p \rightarrow \text{EMTDC 计算方程} \quad (7)$$

式(7)通过对 p 的修改,实现对系统状态方程的间接调整,从而驱动仿真结果变化。

3.2 EMTDC 自动计算

EMTDC 计算过程可视为在给定参数 p 下,对系统状态方程的数值求解过程,其输出结果构成函数

$$y=f(p) \quad (8)$$

EMTDC 在计算过程中需输入运行方式和计算精度,因而前述编译生成的 exe 文件需实现与其通信。进程通信有共享内存、消息管道以及文件通道 3 种常见方式。在此借助文件通道实现与 EMTDC 的进程通信。使用 map 文件实现地址映射,设置计算规模,仿真精度、输出节点映射和记录通道的信息,txt 文件设置运行方式和结果输出文件 out 文件的名称,借助 WindowsAPI 或者批处理 bat 文件自动调用 EMTDC 完成仿真计算。

3.3 试验参数获取和比对

使用文件读写程序读取 out 文件,即可分别获得仿真结果短路电流 $i(t)$ 和 $u_{TRV}(t)$ 。对于电流参数,可通过一阶差分获取局部极值以确定电流峰值,并结合二分法确定电流零点,进而根据文[31-32]方法计算各项试验电流参数。对于 TRV 参数,特别是四参数 TRV,由于存在 3 种类型(见图 6),获取第 4 条包络线(切线 AB)相对复杂,常用的方法有:①人工法;②多项式拟合法^[33];③旋转坐标法或角平分线法^[34];④拐点法^[35]。人工读取和拟合法精度有限,且耗时较长。方法③只适用于图 6(a)型曲线,对于图 6(b)、(c)型曲线,无法实现收敛。方法④逐点计算 TRV 波形上离散点处的切线表达式和截距,计算量大,收敛较慢。由于四参数 TRV 波形曲线形式相对单一,且包络线切点通常位于曲率极值附近,因此,TRV 参数提取问题可转化为对函数 $u(t)$ 的特征点识别问题,即在离散数据中寻找满足式(8)的曲率极值点,从而实现包络线切点的快速定位。

$$\frac{d\kappa}{dt} = 0 \quad (9)$$

根据曲率公式

$$\kappa = \frac{\ddot{y}}{(1+\dot{y}^2)^{3/2}} \quad (10)$$

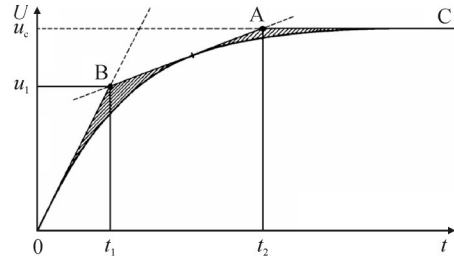
式(9)-(10)中: κ 为曲率; $\ddot{y}$ 为电压 u 对时间 t 的二阶微分; $\dot{y}$ 为电压 u 对时间 t 一阶微分。

PSCAD 计算结果为等步长,因而可使用差分替代微分快速获取 TRV 曲线拐点或曲率极值,将曲线按照曲率极值分段并在指定分段内计算曲率极值点,相比方案④收敛快,效率高。

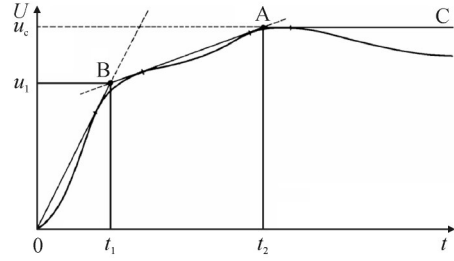
根据中心差分公式

$$\begin{cases} \dot{y} \approx \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2h} \\ \ddot{y} \approx \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{h^2} \end{cases} \quad (11)$$

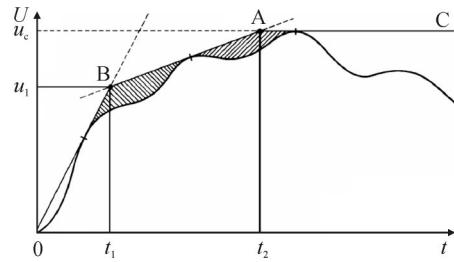
式(11)中: y_i 为第 i 个离散点的电压; h 为 U 的仿真步长。由此,曲率极值计算可以简化为



(a) 存在多条线段同TRV曲线切于两点



(b) 只存在一条线段同TRV曲线切于两点



(c) 不存在线段同TRV曲线切于多于一点但不相交

图6 四参数表示的 TRV 曲线及其包络线

Fig. 6 Four-parameter TRV curves and their envelopes

$$\kappa \approx \frac{(y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}))}{[4h^2 + (y_{i+1} - y_{i-1})^2]^{3/2}/2h} \quad (12)$$

实际应用中,由于 h 的取值通常在区间 $(1 \times 10^{-9}, 10 \times 10^{-9})$,而电压 y 的变化步长 $y_{i+1} - y_i$ 通常大于 1,因此 $4h^2$ 远小于 $(y_{i+1} - y_{i-1})^2$,曲率计算可进一步简化为

$$\kappa \approx \frac{(y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1})/h^2}{(y_{i+1} - y_{i-1})^3} \quad (13)$$

将上述计算得到的试验参数与标准值进行比较,当结果在设定的允许偏差范围内,即完成了回路设备参数的计算。否则根据比较结果结合调节算法,通过修改 f 和 dta 文件对仿真模型中元件参数以及电容器 C_s 充电电压进行修改,重复上述过程直至仿真结果在设定规定偏差范围内。

当 1 000 kV/80 kA 断路器试验方式 T100s 采用图 1 回路时,各方案求解设备参数的效率对比见表 1。

表1 各方案仿真求解效率对比

Table 1 Comparison of efficiency among various schemes

方法	人工调整法	PSCAD 运行库	文中方案
耗时/min	32.0	8.6	1.5

4 结语

文中针对容量试验回路参数计算中模型精度不足及自动化程度不高的问题,建立了基于PSCAD/EMTDC的8阶短路发电机模型,能够较准确地反映短路发电机在试验工况下的机电及电磁暂态特性。在此基础上,提出了基于自编译的自动仿真计算方法,通过自动生成与修改FORTRAN源文件,实现了模型构建、参数更新及EMTDC调用的自动化,并构建了基于文件通道的仿真运行机制。同时,提出基于局部曲率极值的TRV参数提取方法,提高了特征点识别效率。算例结果表明,在保证计算精度的前提下,文中方法能够显著提高容量试验回路参数的求解效率,具有较好的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 李志军,杨梅,刘艳萍,等. MATLAB在同步发电机仿真中的初始化问题[J]. 大电机技术,2003(6):62-66.
Li Zhijun, Yang Mei, Liu Yanping, et al. Research in several aspects of synchronous machine simulation based on MATLAB[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2003(6):62-66.
- [2] 汪海波,万德春,洪深. 大容量冲击发电机短路电流衰减特性研究[J]. 江苏电机工程,2013,32(5):26-29.
Wang Haibo, Wan Dechun, Hong Shen. A research on the short circuit current attenuation characteristic of short circuit generator with large capacity[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2013, 32(5): 26-29.
- [3] 刘龙,舒景东. 基于Simulink的同步发电机短路仿真分析[J]. 电脑与电信,2017(7):62-65.
Liu Long, Shu Jingdong. Simulation analysis on the short circuit of synchronous motor based on Simulink[J]. Computer & Telecommunication, 2017(7):62-65.
- [4] 马凯悦,王建全. 大型同步发电机三相短路下的短路冲击电流研究[J]. 能源工程,2020(4):88-93.
Ma Kaiyue, Wang Jianquan. Research on the short-circuit impulse current of three-phase short-circuit in large synchronous generator[J]. Energy Engineering, 2020(4):88-93.
- [5] 梁纲,赵继敏,钟后鸿. 典型短路故障下的同步发电机运行仿真[J]. 电机技术,2018(4):5-7.
Liang Gang, Zhao Jimin, Zhong Houhong. Simulation on synchronous generation operation under typical short-circuit faults[J]. Electrical Machinery Technology, 2018(4):5-7.
- [6] 黄浩,胡刚,张建涛,等. 大型短路试验发电机运行性能仿真[J]. 大电机技术,2021(2):32-37.
Huang Hao, Hu Gang, Zhang Jiantao, et al. Operation performance simulation of large short circuit test generator[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2021(2):32-37.
- [7] 李金香,孙玉田,蒋宝刚. 超高压发电机短路特性和参数计算[J]. 大电机技术,2008(6):1-4.
Li Jinxiang, Sun Yutian, Jiang Baogang. Short-circuit characteristics and parameters calculation for a powerformer[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2008(6):1-4.
- [8] 李峰,刘晓芳,王红宇,等. 基于时步有限元的同步发电机三相突然短路仿真分析[J]. 现代电力,2010,27(6):7-11.
Li Feng, Liu Xiaofang, Wang Hongyu, et al. Simulation on three-phase sudden short circuit of turbo-generator based on time-stepping finite element method[J]. Modern Electric Power, 2010, 27(6):7-11.
- [9] 杨定乾,陈赞,张敏. 阻尼绕组对同步发电机三相短路电流的影响[J]. 黑龙江电力,2015,37(3):216-221.
Yang Dingqian, Chen Yun, Zhang Min. Influence of damper winding on synchronous generator three-phase short-circuit current[J]. Heilongjiang Electric Power, 2015, 37(3):216-221.
- [10] 许国瑞,刘晓芳,罗应立,等. 不同功率同步电机瞬态时间常数的对比研究[J]. 大电机技术,2014(1):1-5.
Xu Guorui, Liu Xiaofang, Luo Yingli, et al. Study on the transient time constant of the synchronous generator with different capacity[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2014(1):1-5.
- [11] 司马莉萍,丁涛,尹航. PSCAD的发电机准同期并列综合实验设计[J]. 实验室研究与探索,2024,43(4):164-168.
Sima Liping, Ding Tao, Yin Hang. Comprehensive experiment design of generator quasi-synchronizing parallel based on PSCAD[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2024, 43(4):164-168.
- [12] 姜映辉. 基于PSCAD的架空馈线自动化系统仿真分析平台研究[D]. 淄博:山东理工大学,2014.
Jiang Yinghui. Research on simulation analysis platform for overhead feedline automation system based on PSCAD[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2014.
- [13] 孙健,唐恒海,周作春,等. 基于图形化系统的机电暂态模型到电磁暂态模型的自动生成方案研究[J]. 电气应用,2013(s1):564-568.
Sun Jian, Tang Henghai, Zhou Zuochun, et al. Research on automatic generation scheme of electromechanical transient model to electromagnetic transient model based on graphic system[J]. Electrotechnical Application, 2013(s1):564-568.
- [14] 黎知行,钟俊. 核电厂控制逻辑自动仿真技术研发[J]. 自动化技术与应用,2020,39(4):149-153.
Li Zhiheng, Zhong Jun. Research and development of control logic automatic simulation technology for nuclear plant[J]. Techniques of Automation and Applications, 2020, 39(4):149-153.
- [15] 国网江西省电力有限公司萍乡供电分公司,国家电网有限公司. 一种PSCAD模型元件参数自动设置方法:CN114077787A[P].2022-02-22.
State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd. Pingxiang Power Supply Branch, State Grid Corporation of China. An automatic parameters setting method for PSCAD model component: CN114077787A[P]. 2022-02-22.
- [16] 国网福建省电力有限公司电力科学研究院. 一种基于PMS的PSCAD区域电网电磁暂态仿真模型自动生成方法:CN202111442587.8[P].2022-03-18.
Electric Power Research Institute of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd. An automatic generation method for regional power grid electromagnetic transient simulation model based on PSCAD Based on PMS: CN202111442587.8[P]. 2022-03-18.

- [17] 曹斌, 原帅, 王琪, 等. PSD-BPA至PSCAD电网模型自动转换技术研究[J]. 内蒙古电力技术, 2020, 38(4): 1-8.
Cao Bin, Yuan Shuai, Wang Qi, et al. Research on automatic conversion technique of power grid model from PSD-BPA to PSCAD[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2020, 38(4): 1-8.
- [18] 张民, 贺仁睦, 许津津, 等. 图论在BPA模型向PSCAD模型自动转换中的应用[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 163-169.
Zhang Min, He Renmu, Xu Jinjin, et al. Application of graph theory in approach for automatically converting BPA models into PSCAD/EMTDC models[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 163-169.
- [19] 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.
Liu Yonghao, Cai Zexiang, Li Aimin. The user-defined model of PSCAD/EMTDC and its application in simulation of HVDC transmission line protection[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 119-124.
- [20] 考禹霖. 基于PSCAD/EMTDC的光伏阵列建模与仿真[J]. 能源与节能, 2017(7): 95-98.
Kao Yulin. Modeling and simulation of photovoltaic array based on PSCAD/EMTDC[J]. Energy and Conservation, 2017(7): 95-98.
- [21] 蔡云峰, 徐洋, 潘琪. 基于自定义模型的变压器纵差动保护PSCAD仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 118-122.
Cai Yunfeng, Xu Yang, Pan Qi. PSCAD simulation of transformer longitudinal differential protection based on custom model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 118-122.
- [22] 苏盛, 曾祥君, 穆大庆. 基于ATP的电磁暂态自动仿真程序[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(2): 145-148.
Su Sheng, Zeng Xiangjun, Mu Daqing. Automated electromagnetic transient simulation using ATP[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(2): 145-148.
- [23] 张海峰, 黄实, 赵庆斌, 等. 短路发电机的强励系统[J]. 高压电器, 2014, 50(8): 32-35.
Zhang Haifeng, Huang Shi, Zhao Qingbin, et al. Force-excitation system of short circuit generator[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(8): 32-35.
- [24] 乐健, 胡仁喜. PSCAD X4电路设计与仿真从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
Yue Jian, Hu Renxi. From beginner to master: PSCAD X4 circuit design and simulation[M]. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [25] 陶大军, 周杰, 李桂芬, 等. 兆瓦级高速永磁同步发电机的设计与优化[J]. 大电机技术, 2025(4): 9-16.
Tao Dajun, Zhou Jie, Li Guifen, et al. Design and optimization of megawatt high-speed permanent magnet synchronous generator[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2025(4): 9-16.
- [26] 杜超凡, 张蕾, 孙崧强, 等. I & I自适应的STATCOM与发电机励磁鲁棒协调控制[J]. 西安工程大学学报, 2020, 34(5): 42-48.
Du Chaofan, Zhang Lei, Sun Songqiang, et al. I & I adaptive based robust coordinated control for STATCOM and generator excitation[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2020, 34(5): 42-48.
- [27] 张志恒, 花为, 杨永涛, 等. MW级静态密封低温区定子励磁超导风力发电机设计与多物理场分析[J]. 大电机技术, 2025(5): 1-8.
Tao Dajun, Xi Chengtong, Jiang Hongyu, et al. Comparative analysis of the operating performance of new FeCo-based and NdFeB permanent magnet motors in high temperature condition[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2025(5): 1-8.
- [28] 黄杨森, 张丹, 刘云平, 等. 基于最小二乘法优化的汽轮发电机转子绕组匝间短路诊断方法[J]. 大电机技术, 2025(5): 53-57.
Huang Yangsen, Zhang Dan, Liu Yunping, et al. A fault diagnosis method of turbo-generator inter-turn short circuit based on least squares optimization[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2025(5): 53-57.
- [29] 韩明琦, 党幼云, 王湘涛, 等. 航空发电机交流畸变的测量与实现[J]. 西安工程大学学报, 2016, 30(4): 458-463.
Han Mingqi, Dang Youyun, Wang Xiangtao, et al. Measurement and realization of AC distortion of aviation generator[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2016, 30(4): 458-463.
- [30] 姜子元, 刘朴, 王培人, 等. 断路器试验方式T100a中最长燃弧时间试验分析[J]. 高压电器, 2023, 59(4): 192-198.
Jiang Ziyuan, Liu Pu, Wang Peiren, et al. Analysis of maximum arcing time test in test-duty T100a of circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 192-198.
- [31] 赵庆斌, 黄实, 阎对丰, 等. 高压选相断路器T100a试验电流和瞬态恢复电压的计算[J]. 高压电器, 2024, 60(3): 80-86.
Zhao Qingbin, Huang Shi, Yan Duifeng, et al. Calculation of short-circuit current and transient recovery voltage for circuit-breakers intended for controlled switching during T100a test[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(3): 80-86.
- [32] 西安高压电器研究院股份有限公司. 容量试验回路的仿真方法、装置、电子设备及存储介质: CN116522696B[P]. 2023-09-05.
Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd. Simulation method, device, electronic equipment and storage medium of high power short-circuit test circuit simulation: CN116522696B[P]. 2023-09-05.
- [33] 周小猛, 林志力, 刘成许, 等. 使用逐次逼近法计算瞬态恢复电压波形的包络线[J]. 高压电器, 2018, 54(4): 159-163.
Zhou Xiaomeng, Lin Zhili, Liu Chengxu, et al. Calculation of the envelope of transient recovery voltage waveform by successive approximation method[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(4): 159-163.
- [34] 宁磊, 淡淑恒. 瞬态恢复电压波形的包络线计算方法[J]. 高压电器, 2016, 52(10): 27-31.
Ning Lei, Dan Shuheng. Envelope calculation method of transient recovery voltage waveform[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(10): 27-31.
- [35] 班建, 高享想, 黄实, 等. 基于坐标系转换的TRV波形包络线与标准值参数计算方法研究[J]. 高压电器, 2018, 54(2): 46-49.
Ban Jian, Gao Xiangxiang, Huang Shi, et al. Study on the calculation method of TRV waveform envelope and standard value parameter based on coordinate system conversion[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(2): 46-49.

赵庆斌(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事高压电器检测方法和标准研究(通信作者)(E-mail: zhaoqingbin@xihari.com)。