

# 基于PSCAD/EMTDC的1000 kV特高压变压器仿真

李建生

(国网江苏省电力公司电力科学研究院,江苏南京211103)

**摘要:**特高压变压器是电网核心设备之一,其电磁暂态仿真模型是继电保护研究的基础。通过分析1000 kV特高压变压器运行基本原理,充分考虑主体变和调补变绕组连接特点,建立了基于PSCAD/EMTDC的主体变和调补变联合仿真模型,并对其正常运行、空载合闸和出口短路故障进行了仿真分析。

**关键词:**特高压变压器;PSCAD/EMTDC;非线性;空载合闸  
**中图分类号:**TM77 **文献标志码:**A

**文章编号:**1009-0665(2016)06-0018-04

为解决我国能源、负荷分布不均及环境污染问题,国家电网公司从2009年开始大力发展特高压电网,目前已建成±800 kV锦苏、1000 kV淮上南环工程等,大大缓解了上海、江苏等地区能源压力,同时增加了清洁能源比重、提高了煤炭资源利用效率<sup>[1,2]</sup>。作为电网安全稳定运行的第一道防线,保护控制至关重要,其研究的基础是准确的仿真模型<sup>[3,4]</sup>。目前,为研究1000 kV特高压变压器保护控制策略,文献[5]以单相分体500 kV自耦变压器模型为基础,利用整体变压器基本技术参数,通过设置4个绕组,模拟变压器内部短路故障;同样的文献[6]也建立单相分体500 kV自耦变压器模型基础上,根据变压器回路平衡方程和励磁电感,对变压器内部故障进行识别。由于500 kV自耦变压器采用中压线端调压方式,通过改变中压绕组的匝数对电压进行调节,调压过程中对高压侧和低压侧电压变化影响很小;而对于1000 kV特高压变压器,由于绝缘问题,采用中性点调压方式,这就需要引入调压变和补偿变减少高压及中压侧电压波动。由于1000 kV特高压变压器与500 kV变压器结构差异,文献[4,5]中建立的变压器模型未考虑主体变、调压变和补偿变的非线性特征,适用于仿真主体变正常运行状态、故障后稳定运行状态,难以准确仿真暂态过程。此外,主体变和调补变各个绕组电压、电流情况也无法直接反映。

为准确模拟1000 kV特高压变压器运行情况,通过分析主体变和调压补偿变结构特征、连接方式,基于PSCAD/EMTDC软件建立主体变和调补变联合仿真模型,并进行了正常运行、空载合闸和出口处短路状态仿真。

## 1 特高压变压器基本原理

(1) 特高压变压器基本结构。1000 kV特高压变压器由主体变和调压补偿变组成,主体变与调压补偿

变利用架空分裂导线连接,如图1所示。主体变压器采用双柱或三柱并联结构,高压、中压、低压绕组均为并联;调压补偿变压器内设置调压变压器和补偿变压器,调压开关放置在调压补偿变压器油箱内。

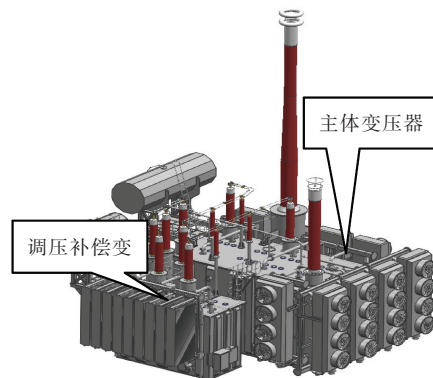
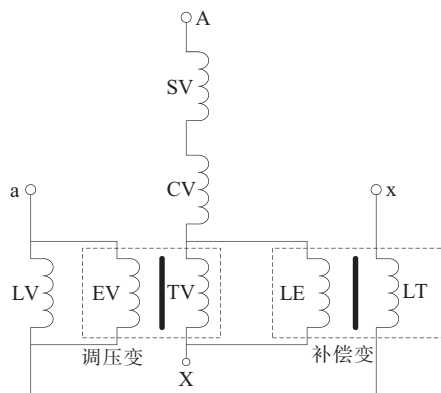
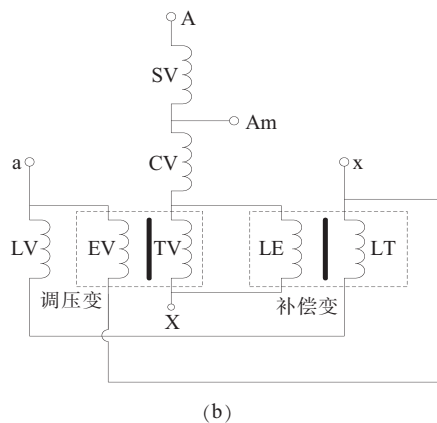


图1 特高压变压器示意图

由于特高压变压器中压侧为500 kV,若采用500 kV线端调压,绝缘水平相对较高,调压开关和调压绕组绝缘结构复杂,而且目前尚无可用的调压开关。因此现阶段特高压变压器均采用中性点变磁通调压方式,通过设置单独的调压变压器减少主体变压器电压波动、提高设备运行的安全性。主体变和调补变之间主要有2种连接方式,如图2所示。图2(a)中调压变励磁绕组与主体变低压绕组并联,图2(b)中调压变励磁绕组与整体变低压绕组并联。



(a)



SV—串联绕组;CV—公共绕组;LV—低压绕组;EV—调压励磁绕组;TV—调压绕组;LE—补偿励磁绕组;LT—补偿绕组

图 2 特高压变压器端子连接示意图

对于主体变,其铁心常采用四柱或五柱结构,对应的 SV, CV, LV 绕组分别由 2 个或 3 个绕组并联得到,并联的绕组匝数、容量完全相同。

(2) 特高压变压器电磁耦合矩阵方程。根据图 2 (a), 可得到 2 种不同接线方式下特高压变压器的电磁耦合矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} N_{SV}+N_{CV} & N_{TV} & 0 \\ N_{LV} & -N_{EV} & 0 \\ 0 & N_{TV} & -N_{LE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1050/\sqrt{3} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} U_{AX} \\ U_{AmX} \\ U_{ax} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{SV}+N_{CV} & N_{TV} & 0 \\ N_{CV} & N_{TV} & 0 \\ N_{LV} & 0 & -N_{LT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(1,2)中; $e_1, e_2, e_3$  分别为绕组 SV, EV, LE 中每匝电势; $N_{SV}, N_{CV}, N_{TV}, N_{LV}, N_{EV}, N_{LT}, N_{LE}$  分别为对应下标绕组的匝数; $U_{AX}, U_{AmX}, U_{ax}$  分别为特高压变压器高、中、低压侧电压。

同理,得到图 2(b)接线方式下电磁耦合矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} N_{SV}+N_{CV} & N_{TV} & 0 \\ N_{LV} & -N_{EV} & -N_{LT} \\ 0 & N_{TV} & -N_{LE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1050/\sqrt{3} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} U_{AX} \\ U_{AmX} \\ U_{ax} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{SV}+N_{CV} & N_{TV} & 0 \\ N_{CV} & N_{TV} & 0 \\ N_{LV} & 0 & -N_{LT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(1—4)知,任一绕组运行状态变化都直接影响特高压变压器整体运行,而现有仿真模型无法仿真任一绕组的电磁耦合情况,也未考虑主体变、调压变和补偿变的非线性特征差异。

## 2 特高压变压器 PSCAD/EMTDC 模型

### 2.1 数学模型

主体变绕组连接示意图如图 3 所示。

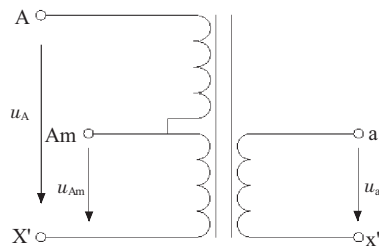


图 3 主体变绕组连接示意图

图 3 中,其高压、中压、低压绕组在同一铁心,磁通分布相同,考虑铁心的非线性特征,得主体变的方程:

$$\begin{cases} u_{AX} = (N_{SV} + N_{CV}) \frac{d\varphi_1}{dt} \\ u_{AmX} = N_{CV} \frac{d\varphi_1}{dt} \\ u_{ax} = (N_{SV} + N_{CV}) \frac{d\varphi_1}{dt} \\ \varphi_1 = f_1(i_{m1}) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: $u_{AX}, u_{AmX}, u_{ax}$  分别为高、中、低压绕组电压; $i_A, i_{Am}, i_a$  分别为高、中、低压侧电流; $i_{m1}$  为励磁电流, $\varphi_1$  为磁通, $\varphi_1$  与  $i_{m1}$  之间为非线性函数关系,由铁磁材料决定,如图 4 所示。

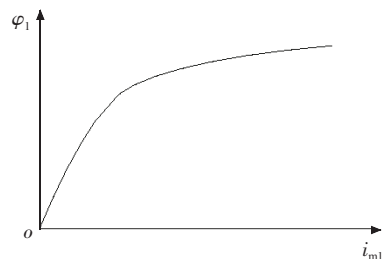


图 4 铁磁材料基本磁化曲线

同理,可获得调压变、补偿变电磁暂态数学模型。调压变、补偿变均为非自耦双绕组变压器,励磁电流分别为  $i_{m2}, i_{m3}$ , 铁心内磁通分别为  $\varphi_2, \varphi_3$ 。

$$\begin{cases} u_{EV} = N_{EV} \frac{d\varphi_2}{dt} \\ u_{TV} = N_{TV} \frac{d\varphi_2}{dt} \\ \varphi_2 = f_2(i_{m2}) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} u_{LE} = N_{LE} \frac{d\varphi_3}{dt} \\ u_{LT} = N_{LT} \frac{d\varphi_3}{dt} \\ \varphi_3 = f_3(i_{m3}) \end{cases} \quad (7)$$

### 2.2 PSCAD/EMTDC 模型

特高压变压器采用单相分体结构,其主体变可利用 PSCAD/EMTDC 模型库中 1-phase 3-winding auto transformer 模拟,调压变和补偿变利用 1-phase 2-winding transformer 模拟,基本参数如表 1—3 所示。

表 1 主体变基本参数

参数	数值
额定容量 / MV·A	1000
额定电压 / kV	606/303/110
额定频率 / Hz	50
高 - 低漏电感 / p.u.	0.62
高 - 中漏电感 / p.u.	0.18
中 - 低漏电感 / p.u.	0.40
空载损耗 / p.u.	0.001 605

表 2 调压变基本参数

参数	数值
额定容量 / MV·A	52.7
额定电压 / kV	110/30.311
额定频率 / Hz	50
高 - 低漏电感 / p.u.	0.109
空载损耗 / p.u.	0.001 5
负载损耗 / p.u.	0.065

表 3 补偿变基本参数

参数	数值
额定容量 / MV·A	17.6
额定电压 / kV	30.311/5.503
额定频率 / Hz	50
高 - 低漏电感 / p.u.	0.096 7
空载损耗 / p.u.	0.001 6
负载损耗 / p.u.	0.005

为模拟变压器非线性特征,需要填写变压器的饱和属性,主要参数包括空心电感系数、饱和点位置、励磁电流等,如表 4 所示。

表 4 铁心非线性参数

参数	数值
空心电感系数 / p.u.	0.2
膝部点 / p.u.	1.17
额定励磁电流 / %	0.4

分别建立主体变、调压变和补偿变的 PSCAD 模型,并按实际进行连接,即建立完成整体变的模型。

### 3 仿真分析

某 1000 kV 特高压站主变技术参数如表 5 所示。

假设特高压变压器 500 kV, 110 kV 侧接有功负荷, 1000 kV 侧进行供电, 通过控制图 5 中开关动作仿真特高压变压器正常运行、空载合闸和出口短路情况, 如图 5 所示。图 5 中,  $K_A, K_{Am}, K_a$  分别为 1000 kV, 500 kV 和 110 kV 侧三相开关,  $P_1+jQ_1, P_2+jQ_2$  分别为 500 kV, 110 kV 侧负荷,  $K_{abc}, K_g$  分别为低压侧故障设置开关。

#### 3.1 正常运行

闭合开关  $K_A, K_{Am}$  和  $K_a$ , 仿真特高压变压器正常

表 5 1000 kV 变压器主要技术参数

变压器	项目	主要技术参数
	产品型号	ODFPS—1000000/1000
主体变	额定容量 / MV·A	1000/1000/334
	电压组合 / kV	1050/ $\sqrt{3}$ / $\sqrt{3}$ /(525/ $\sqrt{3}$ ±4 × 1.25%) / 110
	额定电流 / A	1 649.57/3 299.14/3 036.3
调压变	额定容量 / MV·A	52.7
	额定电压 / kV	110/30.311
补偿变	额定容量 / MV·A	17.6
	额定电压 / kV	30.311/5.503

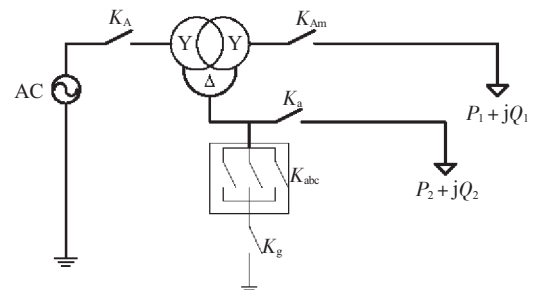


图 5 特高压变压器运行模拟示意图

运行情况。A 相电压、电流仿真波形如图 6 所示。由于负荷均设置为有功负荷,且该负荷下变压器运行在铁心磁化曲线线性段,电压、电流相位相同,波形均为正弦波。图中,  $U_A, U_{Am}, U_{ag}$  分别为 A 相变压器 1000 kV 侧、500 kV 侧、110 kV 侧相电压;  $I_A, I_{Am}, I_{ag}$  分别为 1000 kV 侧、500 kV 侧、110 kV 侧相电流。

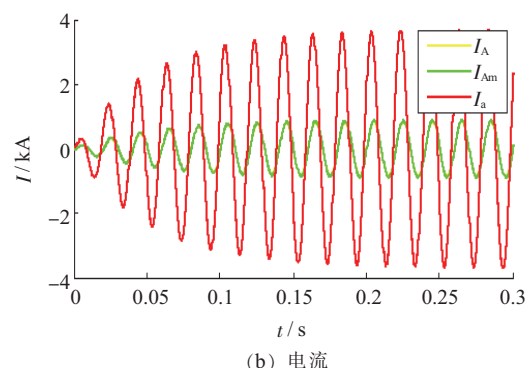
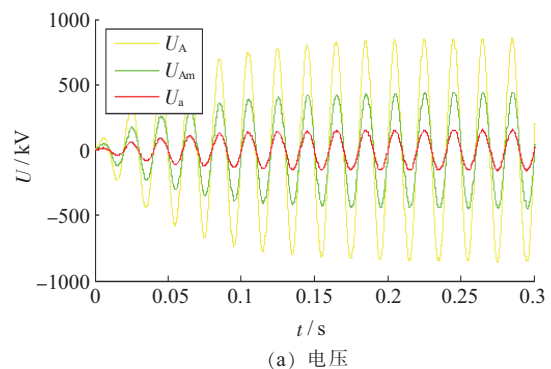


图 6 A 相电压及电流仿真波形

#### 3.2 空载合闸

断开所有开关,分别设置特高压变压器 1000 kV

侧开关  $K_A$  闭合时间为 0.1 s, 0.108 s, 仿真变压器空载合闸情况。

(1) 0.10 s 开关闭合。1000 kV 侧相电流仿真曲线如图 7 所示。A 相电流最大, 高达 2500 A, 大大超过额定电流值, 其次为 C 相, 最小的为 B 相。由于铁心的非线性特征, 三相电流均出现间断特征。

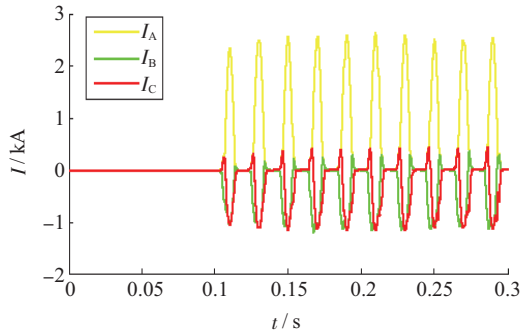


图 7 三相电流

(2) 0.108 s 开关闭合。开关 0.108 s 合闸时 1000 kV 侧相电流仿真曲线如图 8 所示。B 相电流最大, 高达 2500 A, 其次为 A 相, 最小的为 C 相, 三相电流均存在间断。

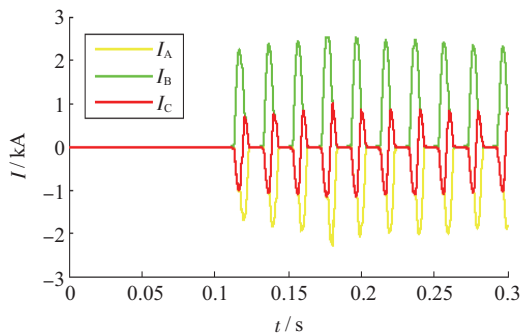
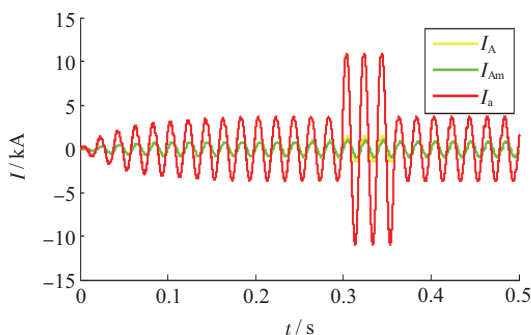


图 8 三相电流

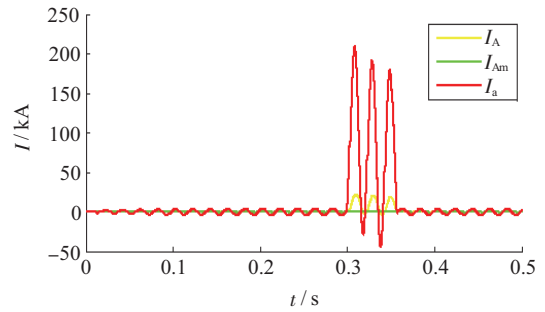
变压器空载合闸产生的励磁涌流与合闸时间有关, 且励磁涌流会产生较强的电动力, 在瓦斯继电器选型时应该注意。

### 3.3 出口短路故障

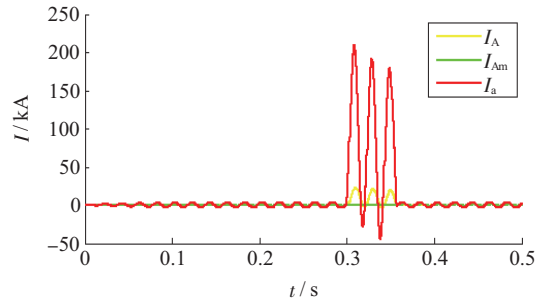
假设 1000 kV 变压器运行过程中, 低压侧发生单相、相间及三相金属性短路故障, 利用模型仿真其电压、电流变化情况。0.03 s 时变压器低压侧不同短路故障形式下的电流仿真波形如图 9 所示。



(a) A 相短路接地故障



(b) AB 相间短路



(c) 三相接地短路

图 9 1000 kV 低压侧短路故障

变压器外部发生短路故障, 将产生大短路电流, 易造成绕组变形, 进一步损坏绝缘导致故障。因此在特高压电网规划时, 要充分考虑变压器抗短路能力, 并采取一定的措施避免大短路电流产生。

## 4 结束语

在分析 1000 kV 特高压变压器结构及绕组连接特点基础上, 建立了整体变 PSCAD/EMTDC 模型, 能够对变压器正常运行、空载合闸和出口短路故障进行模拟。该模型充分考虑了主体变、调压变、补偿变的差异, 不仅能够准确模拟整体变的非线性特征, 而且能够对反映各个绕组电气信息, 为进一步研究变压器内部故障和相应的控制保护策略奠定了基础。

### 参考文献:

- [1] 舒印彪, 刘泽洪, 袁 骏, 等. 2005 年国家电网公司特高压输电论证工作综述[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 1-12.
- [2] 刘振亚. 中国特高压交流输电技术创新[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 1-8.
- [3] 邓茂军, 孙振文, 马和科, 等. 1000 kV 特高压变压器保护方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(10): 168-173.
- [4] 袁宇波, 李 鹏, 黄浩声. 变压器差动保护误动原因分析及对策综述[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(6): 8-12.
- [5] 曾麟钧, 林湘宁, 黄景光, 等. 特高压自耦变压器的建模和电磁暂态仿真[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 91-97.
- [6] 邓祥力, 王传启, 张 哲. 基于回路平衡方程和励磁电感的特高压变压器保护[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 147-154.

### 作者简介:

李建生(1986), 男, 山东青州人, 工程师, 从事线圈类电力设备状态评估研究工作。

由表 3—6 可知,特高压变压器快速试验系统可有效测量变压器变比、绕组直流电阻、绝缘电阻、绕组连同套管的电容量及介损值  $\tan\delta\%$  等参量,测量结果与出厂试验结果偏差较小满足工程需求。

### 3.3 试验效率比较

在劳动强度方面,传统测试方法需要多人配合,搬运沉重的介质损耗测试仪、变压器绝缘电阻测试仪、有载调压开关测试仪、变压器直流电阻测试仪、相关测试引线等,总质量约 30 kg。采用特高压快速试验系统,集成试验仪器,一键操作即可完成试验,试验效率对比情况如表 7 所示。

表 7 试验效率对比情况

比较内容	传统试验方法	快速试验方法
测试时间/h	10	3
测试人员/个	4	2

## 4 结束语

本文通过分析特高压变压器结构和交接性试验的接线特点,基于可控智能切换线原理,集成变压器例行试验项目,研究了适应于 1000 kV 特高压变压器现场试验的快速试验方法,设计了一次性接线,智能化测量,判断及分析的特高压变压器快速试验系统,能够一键式操作完成了不同的电气试验项目,避免了频繁的试验设备更换、试验接线变更,现场试验结果表明通过快速试验方法可节约 2/3 试验时间,缩减 1/2 试验人

员,试验成果已在多个 1000 kV 变电站成功应用,可有效提高试验效率。

### 参考文献:

- [1] 宋大维,孙鹏远,李延彬.基于 RS-485 总线的配电变压器智能试验台[J].变压器,2004,41(5):6-10.
- [2] 陈天翔,王寅仲.电气试验[M].北京:中国电力出版社,2005:19-33.
- [3] 孙秋芹,周志成,赵科,等.变压器综合试验系统的设计与实现[J].江苏电机工程,2014,33(3):56-58.
- [4] 罗青林,谢德馨,钟俊涛.特高压 1000 kV 变压器绝缘研究[J].变压器,2010,47(1):1-4.
- [5] 孙多.1000 kV 变压器调压方式选择及运行维护[J].中国电力,2010,43(7):29-33.
- [6] 甘强,吉亚民,陈轩.一起 220 kV 变压器局部放电试验异常情况分析[J].江苏电机工程,2013,32(3):10-12.
- [7] GB/T 50832—2013 1000 kV 系统电气装置安装工程电气设备交接试验标准[S].

### 作者简介:

于 淼(1990),女,黑龙江五常人,硕士研究生,从事变压器试验工作;

朱孟周(1982),男,山东临沂人,工程师,从事变压器试验工作;

陈光(1986),男,山东曲阜人,工程师,从事输变电系统启动调试,过电压检测分析及配网专业管理工作;

周志成(1977),男,湖南株洲人,高级工程师,从事高电压与绝缘技术专业工作;

何泽家(1979),男,湖北红安人,高级工程师,从事电力系统人力资源管理相关工作。

## Design of 1000 kV UHV Transformer Rapid Testing System

YU Miao, ZHU Mengzhou, CHEN Guang, ZHOU Zhicheng, HE Zejia

(State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** With the continuous development of power industry, 1000 kV UHV transformer is more and more widely used. To meet the extra high-voltage electrical equipment field testing requirements, according to the testing items, testing methods and criteria in the Standard for acceptance testing of 1000 kV electric equipment in engineering, the structure and wiring characteristics of UHV transformer are analyzed and the 1000 kV UHV transformer rapid testing method based on controlled switching is studied. Then, the testing system, with one-time connection and intelligent measurement, analysis and judgment ability, is designed. The testing system avoids the problems of multiple-time connection, time consuming and low efficiency.

**Key words:** UHV transformer; rapid testing; one-time connection; controllable smart switch

(上接第 21 页)

## Simulation of 1000 kV Transformers Based on PSCAD/EMTDC

LI Jiansheng

(State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** The ultra-high voltage transformer is one of the key equipment, and its electromagnetic transient simulation model is the basis for relay protection research. Through analyzing the principle of 1000 kV UHV transformers, and considering the winding connection characteristics, a main part and voltage regulation and compensation part integrated model is established in PSCAD/EMTDC. The simulations and analyses on normal operation, no-load switching and short circuit condition are implemented.

**Key words:** ultra-high voltage transformer; PSCAD/EMTDC; nonlinear; no-load switching