基于实际工程的变压器改进 J-A 模型研究

杨汾艳1,余超耘1,刘正富1,徐雨哲2,徐 政2

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院,广东 广州 510080;2. 浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027)

摘要:为了能够深入开展励磁涌流对直流输电系统影响的机理性研究,提出了一种基于 PSCAD/EMTDC 仿真 软件的考虑磁滞特性的变压器模型建模方法,该建模方法采用改进 J-A 模型来描述变压器磁滞特性,具有物 理意义清晰、参数较少等优势。介绍了常用的变压器电磁仿真模型建模方法,并给出了所提建模方法的详细 步骤和算法设计。在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上建立了牛从直流输电系统的仿真模型,并结合牛从直流的 实际录波波形进行了参数辨识,最终利用 PSCAD 复现了牛从直流乙线换流变压器空充过程中甲线直流电流 的录波波形,验证了所建模型的合理性和有效性。

0 引言

2014年,牛寨一从化±500 kV 同塔双回直流输 电工程(下文简称为牛从直流)多次发生因乙线牛 寨侧换流变压器空充引起甲线降功率运行的事件。 这几起事件发生的主要过程为:牛从直流从单回运 行模式向双回运行模式切换时,乙线牛寨侧换流站 由备用状态切换至闭锁状态,对换流变压器进行空 充,引起励磁涌流,从而导致甲线直流线路从化侧 50 Hz 保护动作,发出功率回降指令。

励磁涌流产生的机理为:在合闸空充瞬间,换流 变压器外加电压发生大幅度变化,而铁芯内的磁通 不能突变,会引入一个非周期分量,这个非周期分量 将与磁通的周期分量相叠加,引起变压器铁芯严重 饱和,从而导致磁场强度H迅速上升,在换流变压器 网侧引起较大的励磁涌流^[1-3]。励磁涌流将会在交 流侧系统电压中引入各次谐波,进而引起运行中的 直流线路上的直流电压和直流电流波动,严重影响 直流输电系统的正常运行。

因此,为了能够针对励磁涌流引起的一系列问题进行仿真研究并提出相应的应对措施,需要对变压器铁芯励磁特性进行完整的数学描述和精确的建模。目前国内普遍使用的西门子、南瑞的基于 PSCAD/EMTDC的高压直流工程仿真平台中的换流变压器都使用了 PSCAD/EMTDC 中的经典变压器 模型,它的铁芯磁化曲线是一条仅考虑了饱和特性的单值曲线,并没有考虑铁芯的磁滞特性。因此,在 PSCAD/EMTDC 中自定义一个考虑铁芯磁滞特性的 变压器模型,对于研究励磁涌流对直流输电系统的

收稿日期:2017-07-07;修回日期:2018-01-16

基金项目:广东电网有限责任公司科技项目(GDKJQQ2015-2039)

Project supported by the Project of Guangdong Power Grid Co., Ltd.(GDKJQQ20152039)

影响具有重大意义。

国内外已有多种对变压器铁芯励磁特性进行精确建模的方法。文献[4]提出了一种使用查找插值法来近似模拟电力系统中变压器的磁滞回线的方法。文献[5]介绍了一种基于 Preisach 理论的变压器铁芯模型建模方法,基于铁磁材料是由偶极子组成的事实,将变压器铁芯的励磁特性用 2 个统计分布参数表征,将其表达成了纯数学形式。文献[6]提出了 J-A 理论模型,利用改良的 Langevin 函数拟合铁磁材料的无磁滞磁化曲线,并利用磁畴壁位移的思想和能量守恒推导出了磁滞回线的数学表达式。文献[7]中对 J-A 模型进行了改进,提出了一种新的无磁 滞磁化曲线函数来替代原始模型中的 Langevin 函数,并对原始模型中的参数取值进行了优化。

上述几种模型中, J-A 模型从物理角度描述了 铁磁材料的磁化特性,具有所需参数较少、物理意义 清晰等优点。国内外均有学者对此进行了研 究^[7-12],但基于 PSCAD/EMTDC 进行 J-A 模型变压 器建模以及结合实际工程进行参数辨识方面未见研 究报道。

本文提出了一种在 PSCAD/EMTDC 软件中,基 于改进 J-A 模型的变压器模型的建模方法,通过一 个受控电流源来模拟变压器的励磁支路,实现了对 变压器励磁特性的精确建模,并结合牛从直流事件 发生时的实际录波数据进行改进 J-A 模型参数和各 相剩磁的识别,通过与实际录波数据比较验证了所 建模型的准确性和合理性。

1 变压器铁芯的磁化曲线

铁磁材料内部的磁感应强度 B 随磁场强度 H 的变化关系曲线被称为材料的磁化曲线,工程中通 常使用磁化曲线来描述变压器铁芯的励磁特性。磁 滞中线(HML)和磁滞回线(HL)是 2 种常用的模拟 变压器励磁特性的方法^[6,8]。 当采用磁滞中线来模拟变压器励磁特性时,其 对应的铁芯磁化曲线如图 1 所示,此时铁芯磁感应 强度 B 和磁场强度 H 之间的关系为单值特性。 PSCAD/EMTDC 中的经典变压器模型使用的便是这 种磁化曲线。采用该种方法能够简化变压器的建模 过程,但无法模拟铁芯剩磁对励磁涌流的影响。当 采用磁滞回线来模拟变压器励磁特性时,变压器铁 芯的磁化曲线表现为一系列饱和区重合的磁滞回线 簇,其中最大的磁滞回线称为主磁滞回线,如图 2 所 示。相比于磁滞中线,采用磁滞回线模拟精确度更 高,更适用于分析励磁涌流对交直流保护的影响。 本文所提的自定义变压器模型便是基于磁滞回线实 现的。





图 1 磁滞中线模拟的 变压器铁芯磁化曲线 Fig.1 Magnetization curve of transformer core with HML

图 2 变压器铁芯 主磁滞回线 Fig.2 Main hysteresis loop of transformer core

2 改进 J-A 的数学模型

本文所研究的改进 J-A 模型是基于原始的 J-A 模型,提出了一种更加精确的无磁滞磁化曲线函数, 对变压器铁芯的励磁特性进行了精确描述^[68]。改 进 J-A 模型中用于描述磁滞回线的 9 个参数的符号 以及物理意义如下:*C* 为磁畴壁弯曲常数,*K* 为磁滞 损失系数, β 为 *K* 的表达式调整系数, α 为区域耦合 系数, M_s 为饱和磁化强度,4 个无磁滞磁化曲线形状 参数需满足 F_1 >0、 $F_2 \ge F_1$ 、 F_3 >0、 F_b >1.0。

利用上述9个参数,改进 J-A 模型通过下述数 学表达式来精确描述变压器铁芯的励磁特性。

首先由式(1)计算铁芯的有效磁场强度 H_e。

$$H_{e} = H + \alpha M \tag{1}$$

其中,H为磁场强度;M为磁化强度。 然后计算无磁滞磁化强度 Man,如式(2)所示。

$$M_{\rm an} = M_{\rm s} \frac{F_1 H_{\rm e} + H_{\rm e}^{F_{\rm b}}}{F_3 + F_2 H_e + H_e^{F_{\rm b}}}$$
(2)

将式(2)等号两边对 H_e 求微分,可以得到 M_{an} 对 H_e 的微分表达式为:

$$\frac{\mathrm{d}M_{\mathrm{an}}}{\mathrm{d}H_{\mathrm{e}}} = \frac{M_{\mathrm{s}}}{(F_{3} + F_{2}H_{\mathrm{e}} + H_{\mathrm{e}}^{F_{\mathrm{b}}})^{2}} \times [F_{1}F_{3} + F_{3}F_{\mathrm{b}}H_{\mathrm{e}}^{F_{\mathrm{b}}-1} + (F_{2} - F_{1})(F_{\mathrm{b}}-1)H_{\mathrm{e}}^{F_{\mathrm{b}}}]$$
(3)

再利用下微分方程得到变压器铁芯的 *M* - *H* 曲线:

$$\frac{C}{dM_{an}} + \frac{M_{an} - M}{\frac{M_{an} - M}{1 - C}}$$

$$\frac{dM}{dH} = \frac{\mu_0}{1 - \alpha C} \frac{\frac{M_{an} - M}{1 - C}}{\frac{dM_{an}}{dH_e}}$$
(4)

其中, μ_0 为真空磁导率; δ 的取值取决于 dH/dt,当 dH/dt>0 时 δ 取1,当 dH/dt<0 时 δ 取-1。

由于工程中通常使用 B - H 曲线来描述变压器 铁芯的励磁特性,故需利用式(5)将改进 J-A 模型中 得到的 M - H 曲线转化为 B - H 曲线:

$$B = \mu_0(H + M) \tag{5}$$

综合式(1)—(5),实现了改进 J-A 模型对变压 器铁芯磁化曲线的完整数学建模。

3 改进 J-A 变压器模型的建模方法

3.1 变压器铁芯励磁特性的模拟方式

本文利用 PSCAD/EMTDC 软件中的自定义元件 功能,搭建了一个基于改进 J-A 模型的变压器模型。 下面将具体介绍所用的建模方法。

目前电力系统电磁暂态仿真软件主要通过2种 方法来模拟变压器铁芯励磁特性:第一种方法是在 理想变压器一侧并联一个非线性可变电感;第二种 方法是在理想变压器一侧并联一个可控电流源^[13]。

由于 EMTDC 中第一种方法会在饱和时引起子 系统矩阵的变化,降低仿真效率,因此本文采用第二 种方法,即通过一个可控电流源来模拟变压器的励 磁支路,并在其代码段插入相应的计算程序,结合改 进 J-A 模型和数值积分公式,把变压器两端电压 V_L 作为输入变量,计算每个仿真时刻电流源输出电流 I_m。图 3 为所建变压器模型的实现过程示意图。



图 3 自定义变压器实现过程

Fig.3 Implementation of transformer model

3.2 模型的输入参数

为了建立完整的改进 J-A 变压器铁芯的物理模型,除了改进 J-A 模型描述铁芯磁化曲线的 9 个参数以外,自定义计算程序还需要输入其他物理参数 来完成励磁电流的计算。这些参数的符号与物理意 义如下:N 为变压器一次侧绕组匝数,A_{rea}为变压器 铁芯等效横截面积,l 为变压器铁芯的平均磁路长 度,B_{re}为变压器铁芯剩磁,h 为 PSCAD 仿真步长,V_L 为变压器一次侧两端电压。除了 V_L之外,其他输入 参数在仿真过程中都不发生变化。

3.3 计算程序的算法设计

根据图3所示自定义变压器模型的实现过程, 其中最关键的环节是自定义计算程序的算法设计。

自定义计算程序的主要计算过程如下,每一个 仿真步长计算程序都将循环一次,实现对变压器励 磁电流的更新。

a. 在仿真时间零点进行各个变量的初始化,取 各个变量初值为:

 $M_n = 1 \times 10^{-6}$, $H_n = 1 \times 10^{-6}$, $B_n = B_{re}$, $I_m = 0$ (6) 其中, M_n 为上一仿真时刻的磁化强度; H_n 为上一仿 真时刻的磁场强度; B_n 为上一仿真时刻的磁感应强 度; I_m 为所计算的电流源输出电流。

b. 根据法拉第电磁感应定律,列出磁感应强度 与电压之间的微分方程,并利用数值积分方法计算 这一仿真时刻的磁感应强度 *B*_{n+1}:

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} = \frac{V_{\mathrm{L}}}{NA_{\mathrm{rea}}} \\ B_{n+1} = B_n + h \frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} \end{cases}$$
(7)

c. 计算这一仿真时刻的磁场强度 H_{n+1} :

$$H_{n+1} = B_{n+1} / \mu_0 - M_n \tag{8}$$

d. 将 *H*_{n+1}以及 *M*_n代入式(1)—(4)中计算得到 d*M*/d*H*,并利用式(9)计算得到这一仿真时刻的磁 化强度 *M*_{n+1}:

$$M_{n+1} = M_n + \frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}H} \Delta H \tag{9}$$

其中, $\Delta H = H_{n+1} - H_n$ 。

e. 根据安培定律计算这一仿真时刻电流源的输出电流 *I*_m:

$$I_{\rm m} = H_{n+1} l/N \tag{10}$$

f. 将上一仿真时刻的磁感应强度 B_{n+1} 保存为 B_n ,磁化强度 M_{n+1} 保存为 M_n ,磁场强度 H_{n+1} 保存为 H_n ,回到步骤 **b** 开始计算下一仿真时刻的各个变量。

4 基于实际工程录波的模型验证

4.1 仿真平台搭建

为了验证搭建的改进 J-A 模型变压器的准确性 和合理性,在图 4 所示的基于 PSCAD/EMTDC 的牛 从直流仿真平台中进行了仿真实验,并通过和实际 录波数据对比,进行改进 J-A 模型的参数辨识。

图 4 中的仿真系统主要模拟了牛从直流工程的 一回直流双极运行状态,对于闭锁状态的乙线仅对 事件发生时进行空充的 2 台牛寨侧换流变压器进行 模拟,分别为空充变压器 1 和空充变压器 2 以及对 应的断路器 BRK1。图中,ACF 为换流站交流滤波 器,RL 为用于模拟交流侧系统等效阻抗的元件。模 型中换流变压器均使用改进 J-A 变压器模型,根据 实际工程数据,表1给出了变压器模型参数。仿真 系统主要参数如下:整流侧系统电压为525 kV,整流 侧系统阻抗为7.55 Ω,逆变侧系统电压为525 kV, 逆变侧系统阻抗为5.45 Ω,直流电压为±500 kV,直 流电流为1.55 kA。



图 4 牛从直流仿真模型

Fig.4 Simulation model of NiuCong HVDC system

表1 变压器模型参数

Table 1 Parameters of transformer model					
参数	数值				
	整流侧变压器	逆变侧变压器			
额定容量/(MV·A)	952.8	901.2			
网侧额定电压/kV	525	525			
阀侧额定电压/kV	210.5	199.2			
短路电抗标幺值	0.165	0.165			
网侧绕组匝数	659	678			
铁芯横截面积/m ²	1.22	1.18			
平均磁路长度/m	3.91	3.7			

4.2 参数辨识

换流变压器空充产生的励磁涌流大小主要由3 个因素决定^[14]:变压器铁芯的励磁特性,本文中主 要由改进 J-A 模型的9 个输入参数决定;变压器铁 芯的各相剩磁;合闸相角,影响合闸瞬间产生的铁芯 磁通非周期分量的大小,从而影响励磁涌流大小。

实际工程中的这3个因素,合闸相角由实际录 波数据给出,改进 J-A 模型的参数和各相剩磁则需 要通过参数辨识得到。

本文采用 Nelder 和 Mead 所提的单纯形法进行 参数辨识^[15],设目标函数为:

$$f = \left[\left(I_{\text{real}} - I_{\text{simu}} \right)^2 t dt$$
 (11)

其中,*I*_{real}、*I*_{simu}分别为空充变压器网侧电流的实际录 波值和仿真值。目标函数的值代表两者之间的误差。

这样,参数识别问题就转换为了一个参数优化 问题。通过单纯形法迭代收敛,最终得到换流变压 器铁芯改进 J-A 模型参数和各相剩磁如下:C=0.1, $K=4.9\times10^{-5}$, $\beta=0.96$, $\alpha=1.33\times10^{-5}$, $M_{\rm s}=1.72\times10^{6}$, $F_1=2.685$, $F_2=3.195$, $F_3=20.310$, $F_{\rm b}=2.10$,空充变 压器 1 的 A、B、C 相剩磁分别为 -0.31 T、-0.69 T、 0.97 T,空充变压器 2 A、B、C 相剩磁分别为-0.03 T、 0.22 T、0.81 T。

现将所得辨识结果作为仿真模型中乙线的2个 空充变压器模型的输入参数,表2给出了空充变压器 器1网侧电流仿真波形与录波波形的对比结果,图5 为空充变压器1励磁涌流的仿真波形与录波波形。

表2 仿真与录波数据对比

Table 2 Comparison between simulative and recording data

参数	录波 数据/kA	仿真 数据/kA	相对 误差/%
A 相涌流最大峰值	2.145	2.187	2.0
B 相涌流最大峰值	0.208	0.281	35.1
C 相涌流最大峰值	3.672	3.700	0.8
A 相峰值 0.1 s 内衰减量	0.109	0.179	64.2
B 相峰值 0.1 s 内衰减量	0.028	0.041	46.4
C 相峰值 0.1 s 内衰减量	0.154	0.246	59.7



图 5 励磁涌流仿真与录波波形

Fig.5 Simulative and recording waveforms of inrush current

从表 2 中可以看出,完成参数辨识后,通过 PSCAD/EMTDC 仿真得到励磁涌流的最大峰值与录 波数据基本一致。其中 B 相励磁涌流最大峰值较 小,是因为本文所采用的参数辨识方法以绝对误差 的积分作为目标函数,导致了 B 相励磁涌流最大峰 值的相对误差要大于 A 相和 C 相。

同时从表2中还可以看到,仿真波形中各相励 磁涌流的衰减速度大于录波波形,这是由于励磁涌 流的衰减速度受交流侧系统阻抗影响,而仿真系统 中整流侧交流系统采用了戴维南等效电路进行模 拟,无法对实际工程中的交流系统进行精确模拟。

4.3 波形复现

为了对牛从直流这几起变压器空充引起的事件 进行机理性探讨,同时深入研究励磁涌流对直流输 电系统的影响。本文利用自定义变压器模型和牛从 直流仿真平台,复现了其中一起事故发生时牛从直 流的运行状态。图6给出了事故中整流侧和逆变侧 直流电流的仿真波形和录波波形的对比结果。表 3 给出了傅里叶分解后的整流侧和逆变侧直流电流的 直流分量和 50 Hz 分量的对比数据。



Fig.6 Simulative and recording waveforms of

rectifier-side and inverter-side DC current

表 3 直流电流仿真与录波数据对比

Table 3 Comparison of simulative and recording data of DC current

参数	录波数据/kA	仿真数据/kA	相对误差/%
整流侧直流分量最小值	1.235	1.292	4.6
逆变侧直流分量最小值	1.238	1.291	4.3
整流侧 50 Hz 分量最大值	0.107	0.098	8.4
逆变侧 50 Hz 分量最大值	0.176	0.162	8.0

从图 6 中可以看出,仿真得到的牛从直流甲线 两侧的直流电流的波形与录波波形基本一致,实现 了在 PSCAD/EMTDC 仿真平台中对牛从直流换流变 压器空充过程的复现。

从表 3 中可以看到, 仿真得到的直流电流的直流分量和 50 Hz 分量的误差均在 10%以内。主要的误差来源是仿真平台中的交流侧系统采用戴维南电路模拟,无法精确模拟实际工程中的交流侧系统, 会间接影响到直流电流模拟的精确度^[16]。

5 结论

为了深入研究换流变压器的励磁涌流特性及其 对直流输电系统的影响,本文提出了一种基于 PSCAD/EMTDC 仿真软件的考虑磁滞特性的变压器 建模方法。该模型采用了改进 J-A 模型来模拟变压 器励磁特性,物理意义明确,输入参数较少。

本文还结合 PSCAD/EMTDC 中的牛从直流实际 算例和实际工程录波数据进行了改进 J-A 模型的参 数辨识,并实现了直流电流录波波形在仿真平台中 的复现,验证了所建模型的有效性和合理性,并为进 一步深入研究变压器空充励磁涌流对直流输电系统 的影响奠定了基础。

参考文献:

- [1] 兀鹏越,余信,李毅,等. 变压器励磁涌流抑制器工程应用及探 讨[J]. 电力自动化设备,2012,32(6):145-149.
 WU Pengyue,YU Xin,LI Yi, et al. Engineering application of transformer excitation inrush suppressor[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(6):145-149.
- [2]许正亚.几个励磁涌流新判据分析[J].电力自动化设备,2002, 22(1):23-28.

XU Zhengya. Analysis on several new criteria of inrush current [J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(1):23-28.

- [3] 谭江平. 基于磁通轨迹特征的变压器励磁涌流识别新方法[J]. 电力自动化设备,2008,28(12):77-80.
 TAN Jiangping. Identification of transformer magnetization inrush current based on magnetic flux track[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(12):77-80.
- [4] TALUKDARS N, BAILEY J R. Hsteresis models for system studies
 [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95
 (4):1429-1434.
- [5] REZAEI-ZARE A, IRAVANI R, SANAYE-PASAND M, et al. An accurate hysteresis model for ferro-resonance analysis of a transformer [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23 (3):1448-1456.
- [6] JILESD C, ATHERTON D L. Theory of ferromagnetic hysteresis [J]. Journal of Applied Physics, 1984, 55(6):2115-2120.
- [7] ANNAKKAGEU D, MCLAREN P G, DIRKS E, et al. A current transformer model based on the Jiles-Atherton theory offerromagnetic hysteresis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000,15(1):57-61.
- [8] JAYASINGHER P, MCLAREN P G. Transformer core models based on the Jiles-Atherton algorithm [C] // IEEE WESCANEX Communications, Power and Computing. Winnipeg, Canada; IEEE, 1997; 121-125.
- [9] 白保东,赵晓璇,陈德志,等. 基于 J-A 模型对直流偏磁条件下 变压器励磁电流的模拟及实验研究[J].电工技术学报,2013, 28(增刊2):162-166.
 BAI Baodong,ZHAO Xiaoxuan,CHEN Dezhi, et al. Simulation and

experiment research on transformer excitation current under DC magnetic bias based on J-A model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(Supplement 2):162-166.

[10] 熊兰,周健瑶,宋道军,等. 基于改进 J-A 磁滞模型的电流互感 器建模及实验分析[J]. 高电压技术,2014,40(2):482-488.

XIONG Lan,ZHOU Jianyao,SONG Daojun, et al. Modeling and experimental analysis of current transformer based on modified J-A hysteretic model [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40 (2): 482-488.

- [11] 石红,宋道军,刘钰,等. 基于 J-A 理论的铁心磁化模型及其改进[J]. 电测与仪表,2013,50(6):4-7.
 SHI Hong,SONG Daojun,LIU Yu, et al. Magnetization model and modification of iron core based on J-A theory[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2013,50(6):4-7.
- [12] 雷阳,段建东,张小庆,等. 电流互感器 J-A 模型参数辨识及大 通流动模试验[J]. 中国电机工程学报,2016,36(增刊): 240-245.

LEI Yang, DUAN Jiandong, ZHANG Xiaoqing, et al. Identification of current transformer J-A model parameters with large current dynamic simulation experiments[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(Supplement): 240-245.

- [13] Manitoba HVDC Research Center. EMTDC users guide [R]. Winnipeg, Canada: Manitoba HVDC Research Center, 2004.
- [14] 葛宝明,苏鹏声,王祥珩,等. 基于瞬时励磁电感频率特性判别 变压器励磁涌流[J]. 电力系统自动化,2002,26(17):35-40. GE Baoming, SU Pengsheng, WANG Xiangheng, et al. Distinguish inrush current for transformer using frequency characteristics of instantaneous excitation inductance[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(17):35-40.
- [15] 熊光楞. 控制系统数字仿真[M]. 北京:清华大学出版社,1988: 147-154.
- [16] 杨汾艳,朱韬析,丁晓兵,等.考虑涌流影响的直流线路 50 Hz 分量机理性研究[J]. 高电压技术,2015,41(10):3363-3371.
 YANG Fenyan,ZHU Taoxi, DING Xiaobing, et al. Research on 50 Hz component in HVDC transmission lines considering the influence of inrush current[J]. High Voltage Engineering, 2015,41(10): 3363-3371.

作者简介:



杨汾艳(1982—),女,山西吕梁人,高级 工程师,博士,主要从事交直流电力系统分 析领域的工作和研究(E-mail:yangfenyan@ gddky.csg.cn)。

Research on modified J-A model of transformer based on practical engineering

YANG Fenyan¹, YU Chaoyun¹, LIU Zhengfu¹, XU Yuzhe², XU Zheng²

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to research the theory about the influence of inrush current on HVDC system, a new modeling method considering hysteresis characteristic is proposed for transformer based on PSCAD/EMTDC. This modeling method describes the hysteresis characteristic using the theory of modified J-A model, which has the advantages of clear physical meaning and fewer parameters. The commonly-used electromagnetic simulation modeling method for transformer is introduced, and the detailed modeling method and the algorithm design are given. A simulation model of NiuCong HVDC system is built in PSCAD/EMTDC simulation platform, and the parameter identification is carried out combined with the recorded waveforms of NiuCong HVDC system. The waveform replication of the DC current in NiuCong HVDC transmission line during the energizing of no-load transformers is realized finally, which verifies the validity and rationality of the established transformer model.

Key words: DC power transmission; energizing of no-load transformer; inrush current; parameter identification; J-A model; hysteresis curve; electric transformers; model buildings