

电力变压器励磁支路模拟

Excitation Loop Simulation of the Power Transformer

张 瑛, 张小青

(北京交通大学, 北京 100044)

摘要: 介绍了变压器的基本磁化曲线模型。首先分析了电力变压器的饱和特性, 给出了它的基本磁化曲线模型, 最后介绍它的磁滞特性并给出磁滞曲线模型。考虑了包括子磁滞回线的磁滞模型, 较准确地描述了电力变压器的励磁支路。

关键词: 模拟; 电力变压器; 模型; 磁化曲线

Abstract This paper introduced the model of the power transformer's basic magnetizing curve. Firstly, the transformer's saturation character was analyzed. Basic magnetizing curve model was given. Then, it introduced the hysteresis phenomenon and its mathematic model. The model including subordinative hysteresis curve can describe the magnetizing branch more precisely.

Key words: simulation; power transformer; model; magnetizing curve

中图分类号: TM 401.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5306(2005)05-0017-03

电力变压器是电力网络中最为常见的一种铁磁元件。在包含电力变压器的一些试验与计算中, 如空载试验、电磁暂态计算^[1]等, 有时会出现一些异常现象。在这些异常现象中, 电力变压器励磁支路的影响占了很大的比例。在合空变、切空变、铁磁谐振、涌流计算中, 也要充分考虑电力变压器励磁支路的影响。电力变压器作为电网中的固有元件, 它的非线性励磁特性必然要参与所在电网的电磁暂态过程, 需要加以考察它对暂态过电压的影响, 以便能较为精确地预测电网的暂态过电压, 合理选择电力设备的绝缘水平。因此, 有必要对电力变压器的模型进行准确的模拟。对电力变压器的模拟, 关键是对电力变压器磁化曲线的拟合。由于普遍采用铁磁材料, 其励磁特性具有非线性, 呈现出明显的饱和特征。

1 变压器的基本磁化曲线模型

变压器的基本磁化曲线也称为平均磁化曲线或换向磁化曲线, 是铁磁材料静态磁性参数的重要内容。如图1所示额定工作点 N 大致位于 $\Phi-i$ 曲线拐点以下附近处, 当工作磁链大于拐点纵坐标, 变

压器磁路将饱和。其 $\Phi-i$ 曲线大致为: 起始段呈线性, 接近额定工作点时开始饱和, 深度饱和以后又呈线性。变压器的基本磁化曲线一般不能像电抗器那样用2段折线比较准确地加以拟合^[2], 因为拐点附近动态电感 Φ/di 变化范围较大。有时变压器 $\Phi-i$ 特性曲线仍由分段线性化来表示, 如图1a所示, 但由于这样处理会产生寄生震荡的问题, 所以变压器 $\Phi-i$ 特性曲线最好用如图1b所示的光滑曲线表示。

常见双绕组变压器的等值电路如图2所示。图2a中, 电力变压器的励磁支路由1个可变电感来表示, 没有考虑任何损耗。图2b中, 电力变压器的励磁支路由1个可变电感和1个可变电阻并联来表示。这一电路模型充分考虑了变压器的铁磁损耗, 并联的可变电阻代表了消耗的电能。因此图2b的变压器模型比图2a中的更加准确。

有时为了简化起见, 会用一个不变电阻代表励磁支路的能量损耗。在实际中, 如表1为TU3×167MVA单台500kV变压器的实测参数, P_{Fe} 为变压器在试验过程中产生的铁损。可见, 用一个可变电阻模拟变压器的损耗是比较符合实际情况的。在ATP软件中, 输入电压和电流的标么值, 可以直接转化为 $\Phi-i$ 曲线, 如图3所示。

收稿日期: 2005-08-23

作者简介: 张 瑛(1978—), 女, 硕士研究生, 现从事电力系统电磁暂态研究工作。

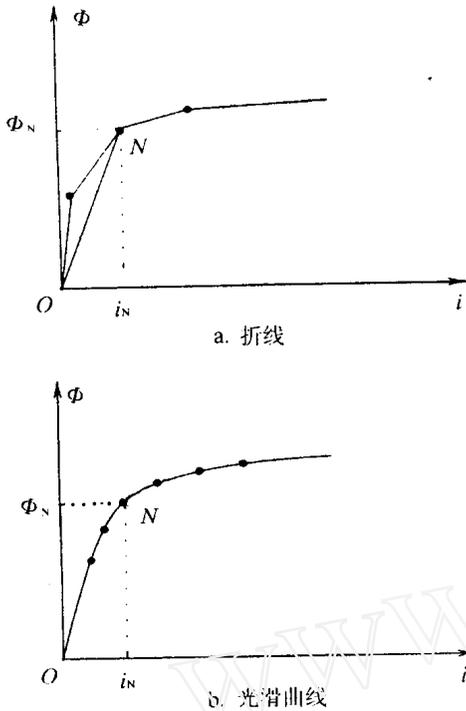
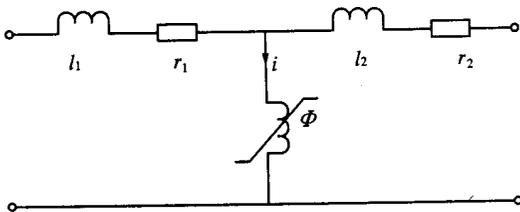
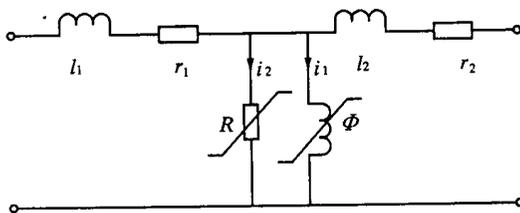


图1 变压器励磁支路 Φ - i 曲线



a. 不考虑铁损



b. 考虑铁损

图2 变压器等值电路

表1 TU3×167MVA 单台 500 kV 变压器实测参数

U/V	I/A	P_{Fe}/W	R/Ω
14 175(90.0%)	6.08(37.8%)	46 440	4 326.7
14 963(95.0%)	9.53(59.3%)	54 360	4 118.7
15 750(100.0%)	16.08(100.0%)	64 530	3 844.1
16 144(102.5%)	21.80(135.6%)	72 900	3 575.2
16 538(105.0%)	34.80(216.4%)	83 925	3 258.9
17 325(110.0%)	108.40(674.1%)	114 282	2 626.4

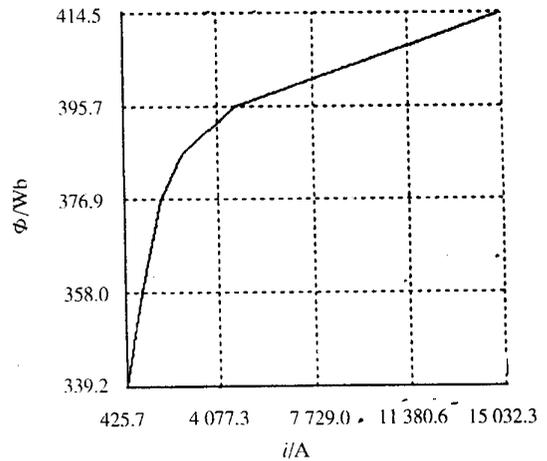


图3 Φ - i 特性曲线

以往,有很多表达式可以拟合励磁支路的基本磁化曲线,如: $\Phi = A \cdot \tan^{-1} B i + C i^{(3)}$ 、 $\Phi = A \cdot \tan^{-1} B i$ 、 $i = A \cdot \text{sh}(B \Phi)$ 、 $i = a_{2s+1} \Phi_{2s+1}$ 等。目前使用较多的是用 $\Phi = A \cdot \tan^{-1} B i + C i$ 拟合电力变压器基本磁化曲线,它可很好的表达电力变压器在额定工作点以下呈线性、深度饱和以后又呈线性的特点^[2]。而且它形式简单,使用方便,拟合参数仅 A 、 B 、 C 3 个,易于拟合,不存在用多项式拟合要事先确定取多少项的问题。

2 变压器的磁滞曲线模型

如果磁场强度从未磁化状态开始逐渐增大到某一最大值,如图4中 P_1 点处,然后减小磁场, Φ 则不沿原来曲线 P_1 到原点 O 下降,而是沿另一曲线 P_1 到 P_2 下降,这种变化滞后的现象称为磁滞。当 i 逐渐从 i_m 变为 $-i_m$ 再变回 i_m 时, Φ 将得到一个十分接近对称原点的闭合曲线,称为磁滞曲线,也称为主环。如果磁场强度在某 2 个数值 i_1 、 i_2 之间变化,磁化过程就可用一个小的回线来描述,这样的小回线称为局部磁滞回线,也称为子环。一种铁磁物质对应于一个 i_m 值,就有一个对应的磁滞回线。当增大 i_m 时,磁滞回线所围的面积随之增大。当 i_m 足够大时,该面积达到一定极限,这个包围最大面积的磁滞曲线就称为饱和磁滞曲线。通常,最外围的主环由基本磁化曲线移位构成,如图5所示。

铁心中原始剩磁的大小,体现了铁心曲线在纵轴上起始工作点的不同。局部磁滞回环的上升轨迹随剩磁的大小和方向的不同而不同。如果原始剩磁的方向与电流起始阶段产生的磁通方向一致,则为

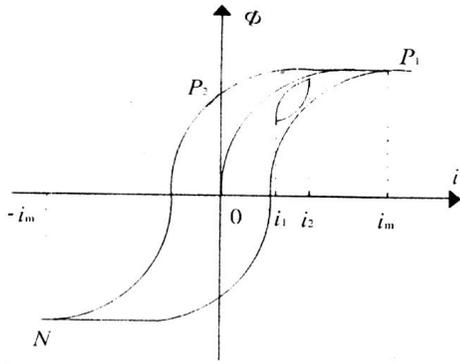


图4 变压器磁滞曲线

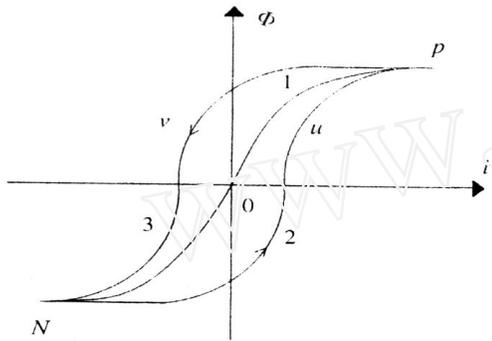


图5 基本磁化曲线移位构成的变压器磁滞曲线

正向剩磁,反之为负向剩磁。当铁心中有正剩磁时,其局部磁滞回环趋向于沿基本磁化曲线上升。当铁心中有负剩磁时,其局部磁滞回环趋向于沿饱和和磁滞回环中的上升曲线上升。

随着科学研究的发展,变压器的数学模型越来越接近变压器实际工作的状况,即考虑包括子磁滞回线在内的磁滞特性,如图6所示,变压器的磁滞图形全部轨迹可分为2族:上升分支、下降分支。

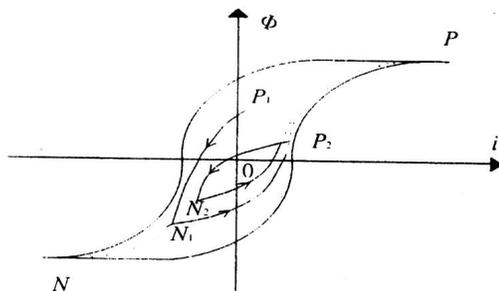


图6 包括子环的变压器磁滞曲线

通常假设:一是主环关于原点对称;二是当工作点超越主环范围后,将沿基本磁化曲线移动。三是位于两连续逆转点之间的分支是单调的,如 N_1 到 P_1 等;四是所有上升分支的延长线将通过 P 点,如 N_1-P_1-P ,所有下降分支的延长线将通过 N 点,

如 P_1-N_1-N 。大多采用 $\Phi = A \cdot \tan^{-1} B i + Ci$ 表示基本磁化曲线^[3]。如图7所示。图中,主环上升支 $N_u P$ 表达式为 $\Phi = A \cdot \tan^{-1} B (i - D) + Ci$,主环下降支 $P_v N$ 表达式为 $\Phi = A \cdot \tan^{-1} B (i + D) + Ci$ ^[3]。确定主环表达式之后,可以确定子环任一下降支表达式为:

$$\Phi = [A \cdot \tan^{-1} B (i + D) + Ci + \frac{\Phi_p}{\Phi_{p1} - \Phi_{N1}} \cdot dP_1] / (1 + \frac{dP_1}{\Phi_{p1} - \Phi_{N1}})$$

任一上升支的表达式为:

$$\Phi = [A \cdot \tan^{-1} B (i - D) + Ci + \frac{\Phi_p}{\Phi_p - \Phi_{N1}} \cdot dN_1] / (1 + \frac{dN_1}{\Phi_p - \Phi_{N1}})$$

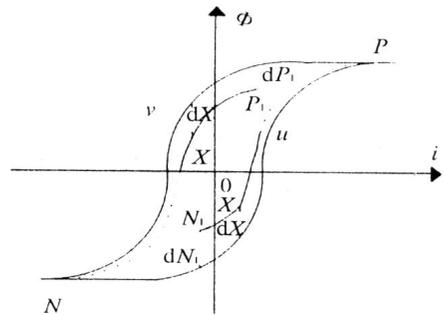


图7 变压器基本磁化曲线

3 结束语

变压器的模型近年来有了很大的发展,从最早不考虑励磁支路,到只考虑励磁支路的基本磁化曲线,再到考虑整个磁滞回环。越来越准确地表示了变压器这一铁磁元件的特性,使得工程技术人员能够更准确处理包含变压器等铁磁元件的电路。当然,更加精确的模型还需要进一步的研究与探讨。

参考文献

- [1] 吴维韩,张芳榴 电力系统过电压数值计算[M]北京:科学出版社,1989.
- [2] Dommel H W. Nonlinear and time-varying elements in digital simulation of electromagnetic transients[J] IEEE Trans On Power Apparatus and Systems, 1971, 15(4): 2561—2567.
- [3] 张小青,吴维韩 电力系统中考虑铁磁元件磁滞特性的暂态计算[J]中国电机工程学报,1993,13(2): 8—14

(编辑 李健平)