基于ATP的三相变压器励磁涌流仿真研究

利用ATP中电力系统模块建立三相变压器的仿真模型，对励磁涌流进行谐波分析，发现励磁涌流中含有大量的高次谐波和直流分量。对于三相变压器，励磁涌流的波形不仅具有单相变压器励磁涌流波形的所有特征，还受到变压器绕组接法的影响。分析了三相变压器在不同剩磁情况下的电流波形，发现变压器剩磁对励磁涌流的波形有着显著影响，它直接影响着变压器差动保护是否能够正确动作，为抑制不平衡电流提供依据。

赵云伟／山东工业职业学院电气工程系
何柏娜　黄桂春　刘连鑫／山东理工大学电气与电子工程学院

赵云伟／讲师

关键词／Keywords
励磁涌流 · 谐波分析 · 合闸角 · 剩磁 ·

0　引言

变压器的纵差动保护是电力变压器的主保护，它是反映变压器两侧电流差额而动作的保护装置，实现变压器差动保护时应考虑对两侧电流进行相位补偿，再进行数值补偿[1]。此外，在实现变压器差动保护时，应考虑不平衡电流，它是保证保护正常动作的关键。当不平衡电流增加时，差动保护将处于非常不利的工作条件。因此，差动保护需要躲开流过差动回路中的不平衡电流，而励磁涌流是产生不平衡电流的一个主要原因[2-3]。

1　励磁涌流产生机理

变压器在空载合闸或外部故障切除后电压恢复时，变压器电压从零或很小的数值突然上升到工作电压，在电压上升的暂态过程中，变压器饱和程度会更加严重，从而大幅度降低变压器绕组的励磁电抗，产生很大的暂态励磁电流，即励磁涌流[4-5]。

三相变压器励磁涌流是指任意两相电流之差，励磁涌流的特性更为复杂。另外，三相变压器任意两相之间的电角度互差120°，所以合闸时三相励磁电流不同。因此变压器在任何条件下空载合闸，至少有两相要出现不同程度的励磁涌流。

2　三相变压器仿真模型

饱和变压器模型存在着一个很大的缺点，它很难考虑变压器剩磁的影响。此外，当变压器是三绕组时，由于在变压器等效电路中引入了负阻抗，采用饱和变压器模型可能出现数值不稳定[6-7]。为了更好地仿真分析励磁涌流，ATP仿真软件中采用了另外一种变压器仿真模型。在这一种变压器模型中，要考虑的变压器模型包括两部分：一是变压器磁滞曲线模型；另一个是变压器的互感支路模型。

2.1　变压器磁滞曲线模型

励磁涌流主要由铁心的饱和作用引起，因此，如何模拟铁心的饱和作用将直接影响励磁涌流的仿真波形及其准确度。在ATP仿真程序中，经常采用96型非线性磁滞电感，它要求用户提供基于磁链$\Phi-I$的磁滞特性曲线。求取方法如下：首先由变压器的空载试验得到$U-I$曲线，然后采用ATP提供的支持程序Saturation将$U-I$曲线转化为相应的磁链$\Phi-I$曲线。

山东省高等学校科技计划项目（J14LN27），山东理工大学科技计划资助项目（103121和103233）。

2.2 互感支路模型

在ATP仿真软件中，其中一个变压器模型是用支路电阻矩阵***R***和电感矩阵***L***表示的。其子程序BCTRAN能根据变压器空载试验和短路试验的数据，计算出用于模拟变压器的基于耦合支路的***R***、***L***矩阵，它适用于任意多个绕组的单相变压器和三相变压器。以一个三相双绕组变压器为例，如图1所示，BCTRAN将生成两个6×6的矩阵，***R***、***L***矩阵分别如式（1）、式（2）所示。根据这两个矩阵，应用ATP中的线性耦合支路模型就可以对一台实际的变压器进行仿真。

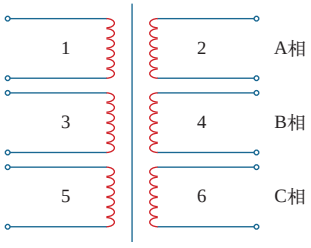


图1　三相变压器互感支路模型

$$\boldsymbol{R}=\begin{pmatrix} R_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{66} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{L}=\begin{pmatrix} L_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{16} \\ M_{21} & L_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} \\ M_{31} & M_{32} & L_{33} & M_{34} & M_{35} & M_{36} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & L_{44} & M_{45} & M_{46} \\ M_{51} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & L_{55} & M_{56} \\ M_{61} & M_{62} & M_{63} & M_{64} & M_{65} & L_{66} \end{pmatrix} \quad (2)$$

R、***L***变压器线性模型本身是没有考虑变压器铁心饱和影响的。因此需要在模型某一侧的端点上加一非线性电感支路来模拟变压器铁心饱和的影响，即考虑变压器铁心中剩磁的影响。

2.3 双绕组变压器励磁涌流仿真电路

双绕组变压器绕组采用Yd11接法，一、二次侧绕组电压为15 kV/6.9 kV，短路阻抗为7.5%，短路损耗为10 kW；空载电流为0.5%，空载损耗为1 kW；电源频率为50 Hz。非线性电感的饱和特性如图2所示。设置好所有的电路参数以后，可在ATP中建立仿真模型如图3所示。

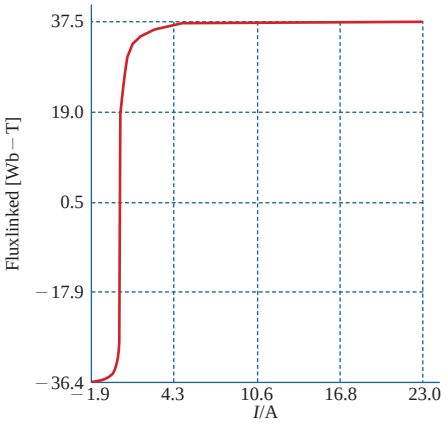


图2　非线性电感的饱和特性

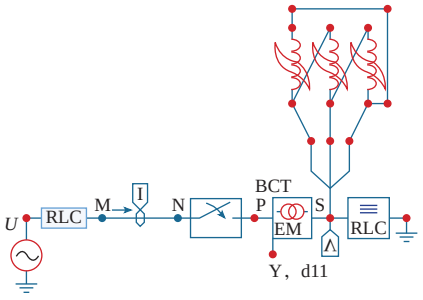


图3　双绕组变压器励磁涌流仿真电路

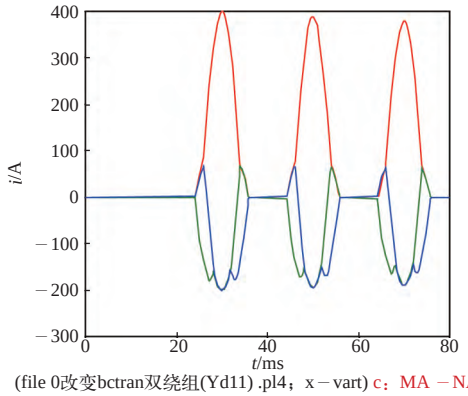
仿真步长设为10^{-6}s，仿真最大时间为80 ms，即四个周期。在图3中，三个非线性电感是三角形联结的，负载设置为10^{20}s，即可模拟变压器空载合闸情况下的励磁涌流特性。

3 仿真结果分析

3.1 不同合闸角励磁涌流分析

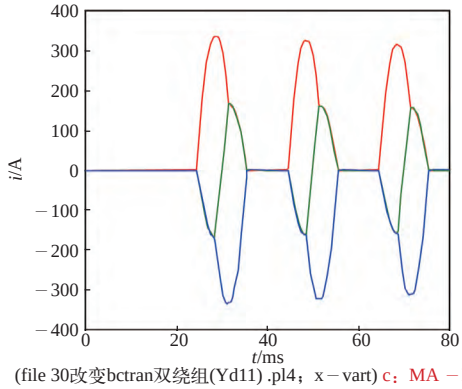
以A相为例，仿真分析变压器在不同角度合闸时的励磁涌流情况。A相的合闸角设置为0°、30°、60°、90°、120°和150°，运行仿真电路后，可得出波形如图4所示。

由图4可知，变压器一次侧三相励磁涌流具有明显的周期性和对称性，三相电流波形随合闸角的变化而呈现不同的形状，每一相都出现了较大



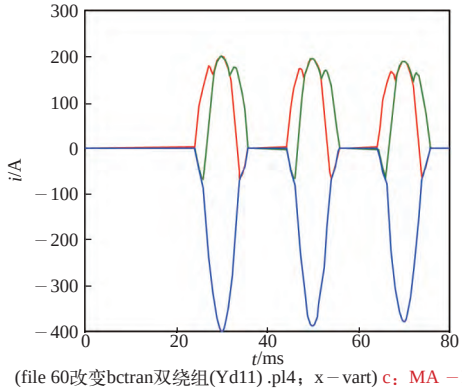
(file 0改变bctran双绕组(Yd11) .pl4；x－vart) c：MA －NA c：MB －NB c：MC －NC

（a）0°



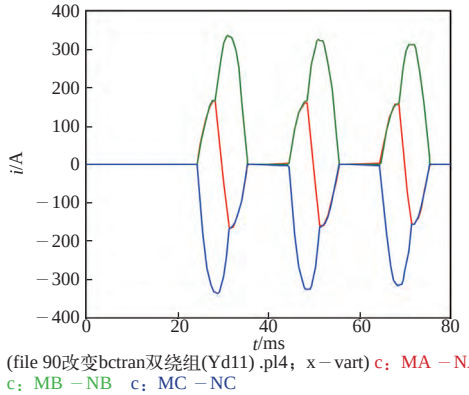
(file 30改变bctran双绕组(Yd11) .pl4；x－vart) c：MA －NA c：MB －NB c：MC －NC

（b）30°



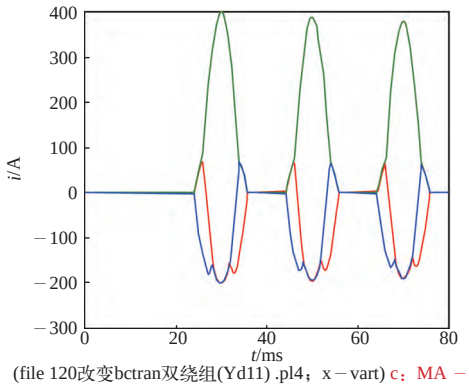
(file 60改变bctran双绕组(Yd11) .pl4；x－vart) c：MA －NA c：MB －NB c：MC －NC

（c）60°



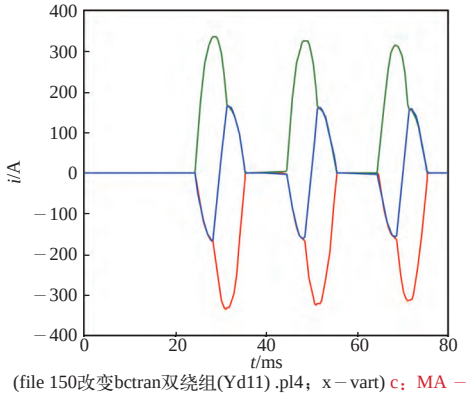
(file 90改变bctran双绕组(Yd11) .pl4；x－vart) c：MA －NA c：MB －NB c：MC －NC

（d）90°



(file 120改变bctran双绕组(Yd11) .pl4；x－vart) c：MA －NA c：MB －NB c：MC －NC

（e）120°



(file 150改变bctran双绕组(Yd11) .pl4；x－vart) c：MA －NA c：MB －NB c：MC －NC

（f）150°

图4　不同角度合闸励磁涌流波形

的间断角。

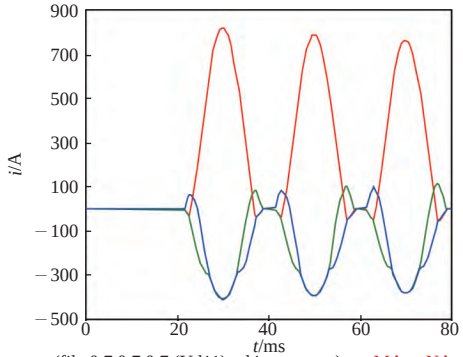
3.2　不同剩磁时励磁涌流仿真分析

变压器投入运行时可能存在剩磁，下面分析剩磁不为零时变压器的励磁涌流。为了简化分析，并根据变压器运行的实际情况，可取剩磁为$\pm 0.7\Phi_m$[8-9]，仿真得出的波形如图5所示。

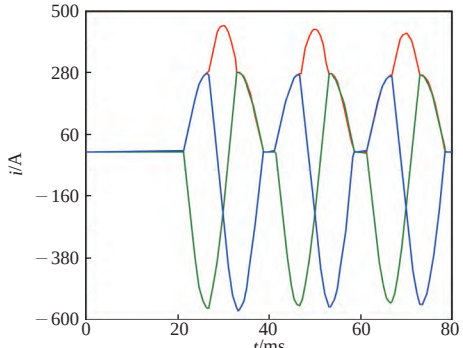
与剩磁为零的情况进行比较可知，当三相剩磁都为$0.7\Phi_m$时，峰值电压在800 A以上，是剩磁为零情况的两倍多；其他几种情况也都达到了很高的峰值电流。以上分析说明：当变压器在有剩磁空载投入运行时，它会处于非常不利的情况，很有可能会使差动保护误动作，这对差动保护的设计提出更高的要求。

3.3　励磁涌流谐波含量分析

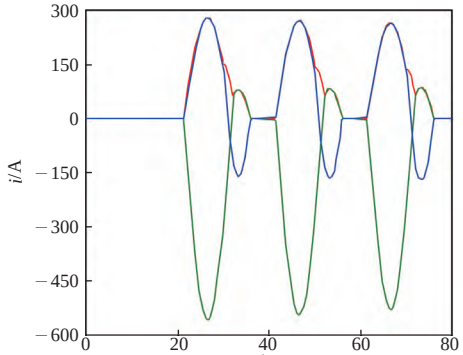
为了更为全面地分析当变压器有剩磁时三相励磁涌流的基本特性，给出了上述各种情况下的谐波含量分析，如下表所示。



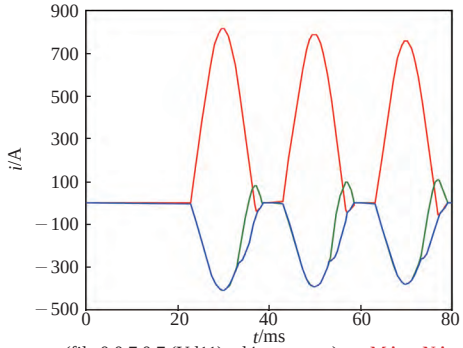
（a）0.7，0.7，0.7



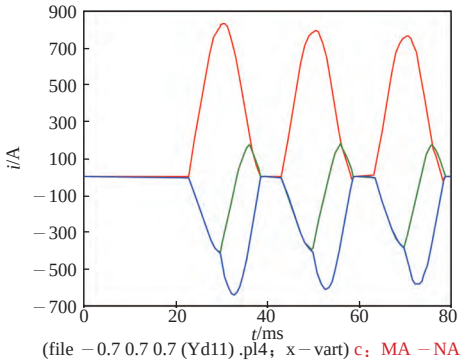
（b）－0.7，－0.7，－0.7



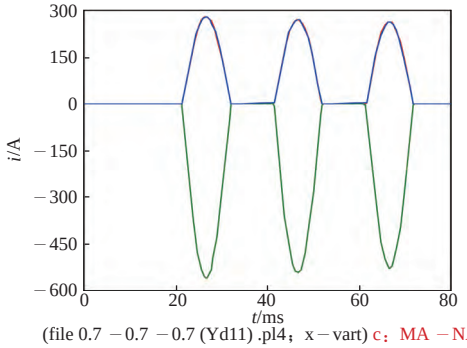
（c）0，－0.7，－0.7



（d）0，0.7，0.7



（e）－0.7，0.7，0.7



（f）0.7，－0.7，－0.7

图5　不同剩磁合闸励磁涌流波形

表　剩磁不同时的谐波含量分析

组别	相别	B_r/B_m	基波值/A	I_0/I_1	I_2/I_1	I_3/I_1	THD(%)
1	A	0	125.83	0.631 82	0.463 36	0.082 948	47.4
	B	0	69.435	0.574 69	0.497 08	0.17151	59.4
	C	0	69.265	0.571 71	0.497 76	0.176 86	59.6
2	A	－0.7	136.55	1.089 3	0.070 665	0.146 36	18.4
	B	－0.7	253.48	0.287 6	0.325 48	0.073 778	33.8
	C	－0.7	254.77	0.297 7	0.323 65	0.074 98	33.7
3	A	－0.7	291.72	0.796 95	0.121 02	0.076 978	14.7
	B	0.7	149.02	0.372 73	0.470 8	0.060 919	47.9
	C	0.7	202.07	0.875 63	0.200 94	0.104 08	23.6
4	A	0	88.083	0.837 67	0.333 2	0.081 838	36.1
	B	－0.7	200	0.560 48	0.415 73	0.069 417	42.8
	C	－0.7	119.7	0.320 04	0.512 06	0.171 66	54.6
5	A	0	292.72	0.728 51	0.181 37	0.099 075	20.9
	B	0.7	157	0.587 65	0.290 31	0.162 58	33.6
	C	0.7	139.99	0.864 29	0.091 465	0.065 694	13.1
6	A	0.7	94.369	0.643 01	0.400 68	0.017 068	41.1
	B	－0.7	188.33	0.644 94	0.400 56	0.017 301	41.1
	C	－0.7	93.965	0.646 87	0.400 43	0.017 655	41.1
7	A	0.7	296.71	0.704 26	0.191 75	0.110 53	22.5
	B	0.7	158.94	0.648 72	0.227 61	0.157 65	28.8
	C	0.7	154.7	0.684 24	0.227 23	0.150 48	28.3

从上表可以看出，第1组（无剩磁）出现的基波电流值最大为125.83 A，从第2组～第7组至少有一相的基波电流值大于125.83 A，并且第2组、第3组、第5组和第7组各组的电流值都超过了第1组的最大值，这说明当变压器存在剩磁时，会使变压器的一次侧励磁涌流比变压器无剩磁时大很多。如果再通过采样两相的差流，将这两相的差流值通过TA传到继电器，差动保护误动作的机率会大大增加，这对差动保护的正确动作非常不利。因此，如果采用基波有效值设计差动保护的相关原理，必须充分考虑各种剩磁情况，设计时需留一定的裕度。

有剩磁的情况与无剩磁的情况相比，直流分量的有效值明显增加，但与各自基波的比例值只是略有增加，并不是很明显，相对含量大部分集中在55%～85%之间；2次谐波有效值的差别不是很大，但相对含量的下降却十分明显，甚至没有任何一组数据的相对比超过第1组；3次谐波的基本规律与2次谐波的规律基本相似；表征谐波总体规律的总谐波失真百分比THD明显下降，与2次和3次谐波的规律相似。因此可得出结论：变压器有剩磁空载合闸与变压器无剩磁空载合闸相比，直流分量的有效值明显增加，高次谐波含量有效值的变化并不明显，但与各自基波的相对比却有明显的减少。

4 结束语

本文通过ATP软件建立了三相变压器空载合闸的仿真模型并分析了励磁涌流。对于非理想变压器，合闸角、系统内阻抗和变压器剩磁等因素都会影响励磁涌流的变化，它们直接影响变压器差动保护是否能够正确动作。不仅如此，三相变压器的励磁涌流还受到变压器联结方式的影响。经过仿真分析得到如下结论：

1）空载合闸时的励磁涌流包含很大成分的非周期分量，使涌流波形偏于时间轴的一侧；仿真结果表明合闸角为0°时，励磁涌流最严重。

2）变压器剩磁的存在对励磁涌流的影响较大，剩磁为零的情况下可能不出现励磁涌流，剩磁越大，励磁涌流越严重。当变压器在有剩磁空载投入运行时，会处于非常不利的情况，很有可能会使差动保护误动作，这对差动保护的设计提出更高的要求。

参考文献

[1] 郝治国，张保会，褚云龙，等．变压器空载合闸励磁涌流抑制技术研究 [J]．高压电器，2005，41 (2)：81-84．

[2] 李琥，周海洋，施围．断路器合闸电阻对变压器励磁涌流的影响 [J]．高压电器，2003，39 (1)：16-19．

[3] 李振强，谷定燮，戴敏．特高压空载变压器谐振过电压和励磁涌流分析及抑制方法 [J]．高电压技术，2012，38 (2)：387-392．

[4] 和敬涵，李静正，姚斌，等．基于波形正弦度的变压器励磁涌流判别方法 [J]．中国电机工程学报，2007，27 (4)：54-59．

[5] Basu K P，Morris Stella．Reduction of magnetizinginrush current in traction transformer [C]．ThirdInternational Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and PowerTechnologies，2008：2302-2305．

[6] 陈丽，姜国涛．几种变压器励磁涌流抑制方法的性能分析 [J]．变压器，2010，47 (6)：37-41．

[7] 李伟，黄金，方春恩，等．基于相控开关技术的空载变压器励磁涌流抑制研究 [J]．高压电器，2010，46 (5)：9-13．

[8] 黄金，方春恩，李天辉，等．计及剩磁的变压器励磁涌流的仿真研究 [J]．变压器，2009，46 (11)：40-43．

[9] 索南加乐，焦在滨，张怿宁，等．基于波形系数的变压器励磁涌流快速识别算法 [J]．电网技术，2006，30 (11)：71-76．

（收稿日期：2017－07－11）EA