

DOI: 10.7667/PSPC180645

变压器直流扰动下励磁谐波与铁心饱和失稳研究

王格万¹, 潘超¹, 郑逸丹², 刘东洋³, 崔迪³, 冯超³, 王佳欣⁴

(1. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012; 2. 国网辽宁省电力有限公司检修分公司, 辽宁 沈阳 110003; 3. 哈尔滨电力职业技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 4. 大唐新能源黑龙江公司, 黑龙江 哈尔滨 150038)

摘要: 变压器遭受直流入侵时铁心励磁饱和程度加深, 励磁电流发生畸变, 谐波含量显著升高。针对该问题研究变压器励磁谐波与铁心饱和特性, 并提出一种变压器直流扰动下铁心饱和失稳判据。基于电磁耦合原理构建交直流混杂模式下的变压器状态方程, 利用端口电气信息研究励磁电流辨识方法, 对励磁电流进行谐波分析并总结其变化规律, 通过分析变压器直流扰动铁心饱和机理, 研究铁心饱和失稳判别方法。通过仿真计算与动模实验深入分析变压器的电磁特性, 并验证该方法的有效性。该研究为变压器直流扰动下铁心饱和失稳判别提供可行方法。

关键词: 直流扰动; 励磁谐波; 参数辨识; 失稳判据

Research on excitation harmonics and core saturation instability of transformer under DC disturbance

WANG Gewan¹, PAN Chao¹, ZHENG Yidan², LIU Dongyang³, CUI Di³, FENG Chao³, WANG Jiabin⁴

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education(Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China; 2. Maintenance Branch, State Grid Liaoning Electric Power Company, Shenyang 110003, China; 3. Harbin Power Vocation Technology College, Harbin 150030, China; 4. Datang Renewable Power Heilongjiang Company, Harbin 150038, China)

Abstract: Excitation saturation of core is deepened when the transformer is subjected to DC invasion, which causes excitation current to distort and harmonic components are increasing significantly. In this paper, the characteristics of excitation harmonic and core saturation are studied, and a criterion for core saturation instability of the transformer DC disturbance is proposed. Based on the principle of electromagnetic coupling, the state equation of transformer in AC / DC hybrid mode is constructed, then the identification method of excitation current is studied based on port electrical information. The harmonic of excitation current is analyzed and its variation law is summarized, furthermore, the discriminating method of core saturation instability is studied by analyzing the saturation mechanism of the transformer under DC disturbance. The electromagnetic characteristics of transformer are analyzed through calculation and dynamic simulation experiment and the effectiveness of this method is verified, which provides a feasible method for discriminating the saturation instability of core under DC disturbance.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507027).

Key words: DC disturbance; excitation harmonics; parameter identification; instability criterion

0 引言

大规模电力电子装置的应用与普及、地球磁暴以及高压直流输电单极大地回路运行时均可能产生直流分量, 从而在交流电网中形成了交直流混杂的特殊环境, 造成变压器等电磁设备偏磁运行^[1-4]。变

压器在直流扰动下运行会产生偏磁效应, 出现励磁饱和, 进而引起电流畸变、谐波含量剧增、振动噪声、构件局部过热等异常或故障, 导致保护装置误动或拒动, 甚至发生电网瘫痪或停电^[5-8]。目前, 变压器交直流混杂运行铁心励磁饱和引发的相关问题已严重威胁了电网及其主要设备的安全稳定运行^[9-12]。因此, 准确判别变压器在直流扰动下的铁心饱和失稳异常具有重要的理论价值和工程意义。

变压器在交直流混杂模式下的谐波特性、铁心

基金项目: 国家自然科学基金项目(51507027); 吉林科技创新发展计划项目(20166014)

饱和特性及变压器参数辨识是备受关注的研究内容^[13-15]。文献[16]给出直流偏磁条件下修正后的 J-A 模型, 该模型可准确描述铁磁材料在直流扰动下的磁化特性。文献[17]分析了变压器在正常运行、铁心饱和及内部故障时电感参数的变化特点, 在此基础上提出了基于电感参数辨识的保护方法。但是, 上述方法未考虑到变压器在交直流混杂运行时的偏磁特点, 所制定的保护策略不适用于变压器直流扰动情况。变压器在直流扰动下的铁心饱和失稳及相关判别方法研究不够深入。因此需要结合变压器直流扰动下的偏磁特点研究铁心饱和失稳判别方法。

本文针对变压器直流扰动时铁心饱和失稳问题, 结合变压器交直流混杂运行时励磁电流畸变特性, 提出一种基于励磁谐波畸变率辨识的铁心饱和失稳判别方法。利用变压器电磁耦合原理求解交直流混杂状态方程, 辨识励磁电流并对其进行 FFT 变换, 根据变压器直流扰动下铁心饱和机理与励磁谐波畸变特性制定铁心饱和失稳判据, 通过仿真分析和动模实验验证该方法的可行性与有效性。

1 励磁电流谐波数学模型

1.1 电磁耦合计算原理

变压器交直流混杂模式电磁耦合状态方程为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{Q}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{R}(t)\mathbf{U}(t) \\ \mathbf{Y}(t) = \mathbf{S}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{T}(t)\mathbf{U}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X}(t)$ 为系统状态变量, 包含绕组电流列向量 \mathbf{i} 和动态电感矩阵 \mathbf{L}_D ; $\mathbf{U}(t)$ 为系统输入变量, 包括交流电压激励与直流扰动电流列向量; $\mathbf{Y}(t)$ 为输出变量, 主要为时域励磁电流列向量; $\mathbf{Q}(t)$ 、 $\mathbf{R}(t)$ 、 $\mathbf{S}(t)$ 、 $\mathbf{T}(t)$ 为系数矩阵。

变压器状态方程可以通过磁场-电路耦合的方式进行求解^[18]。建立非线性磁场模型, 铁心-绕组励磁单元为非涡流区, 忽略磁滞效应, 磁场方程为

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{J}_s \quad (2)$$

式中: “ $\nabla \times$ ” 表示矢量旋度运算; μ 为磁导率; \mathbf{A} 为矢量磁位; \mathbf{J}_s 为励磁电流密度。

对式(2)应用格林定理, 得伽辽金加权余量方程为

$$\iiint_V \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{M}_m) \cdot \left[\nabla \times \left(\sum_{n=1}^n \mathbf{M}_n A_n \right) \right] dV = \iiint_V \mathbf{M}_m \cdot \mathbf{J}_s dV \quad (3)$$

式中: \mathbf{M}_m 、 \mathbf{M}_n 分别为权函数与基函数。将加权余量方程离散形成代数方程组, 求解可得所有 \mathbf{A} , 进而计算其他场量, 如磁感应强度 \mathbf{B} 等。

根据能量扰动的思想, 由系统能量计算动态电感矩阵。以单相双绕组变压器为研究对象, 当线圈电流增量为 $d\mathbf{i}_j$ 时, 将电磁系统总能量与动态电感和电流关联, 得到

$$\begin{cases} dW_1 = \frac{1}{2} L_{Djk} di_j di_k \quad j, k = 1, 2 \\ dW_2 = \frac{1}{2} \int d\mathbf{B} \cdot d\mathbf{H} \end{cases} \quad (4)$$

式中: dW_1 、 dW_2 分别为电路和磁场能量增量; j 、 k 为绕组编号; $d\mathbf{B}$ 、 $d\mathbf{H}$ 分别为 $d\mathbf{i}$ 引起的磁感应强度和磁场强度变化量。

由能量平衡原理, 联立式(4)方程即可计算 \mathbf{L}_D 。将动态电感引入电路模型, 以单相双绕组变压器为例, 构建直流扰动时域电路微分方程为

$$\begin{cases} u_1 = i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} - U_{DC} \\ u_2 = i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

式中: u_1 、 u_2 分别为原、副边绕组电压; i_1 、 i_2 为绕组电流; L_1 、 L_2 为动态电感矩阵中的自感元素; M 为互感元素; r_1 、 r_2 为绕组电阻; U_{DC} 表示直流电压源。该电路模型采用高阶数值迭代方法进行求解, 可由 t_k 时刻的绕组电流 i_k 计算 t_{k+1} 时刻的 i_{k+1} 。

通过计算时域电流与动态电感两个关键状态变量即可实现直流扰动状态方程的求解, 其原理如图 1 所示。

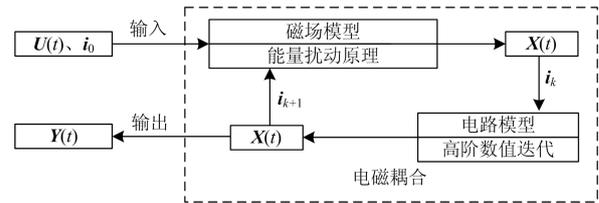


图 1 电磁耦合迭代原理

Fig. 1 Electromagnetic coupling iterative principle

1.2 励磁电流辨识

结合直流扰动电路结构, 构建单相变压器 T 型电路, 如图 2 所示。

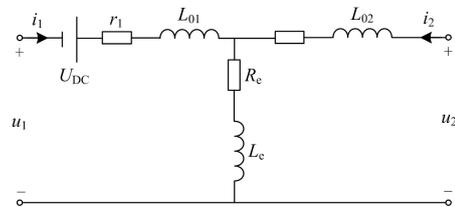


图 2 变压器直流扰动电路

Fig. 2 DC disturbance circuit of transformer

图2中 L_{01} 为原边漏感, L_{02} 为副边漏感(已归算到原边), R_e 为励磁电阻, L_e 为励磁电感。

基于式(4)推导电路方程为

$$u_1 + U_{DC} = r_1 i_1 + L_{01} \frac{di_1}{dt} + R_e (i_1 + i_2) + L_e \frac{d(i_1 + i_2)}{dt} = u_R + u_0 + u_e \quad (6)$$

式中: u_R 表示绕组电阻电动势; u_0 与 u_e 分别为漏磁通电动势和励磁电动势。

当原、副边绕组电流归算后, 励磁电流 i_e 可由式(7)进行辨识^[17]。

$$\begin{cases} u_1 + U_{DC} = r_1 i_1 + L_{01} \frac{di_1}{dt} + R_e i_e + L_e \frac{di_e}{dt} \\ i_e = i_1 + i_2 \end{cases} \quad (7)$$

1.3 励磁电流谐波计算

励磁电流谐波畸变率为

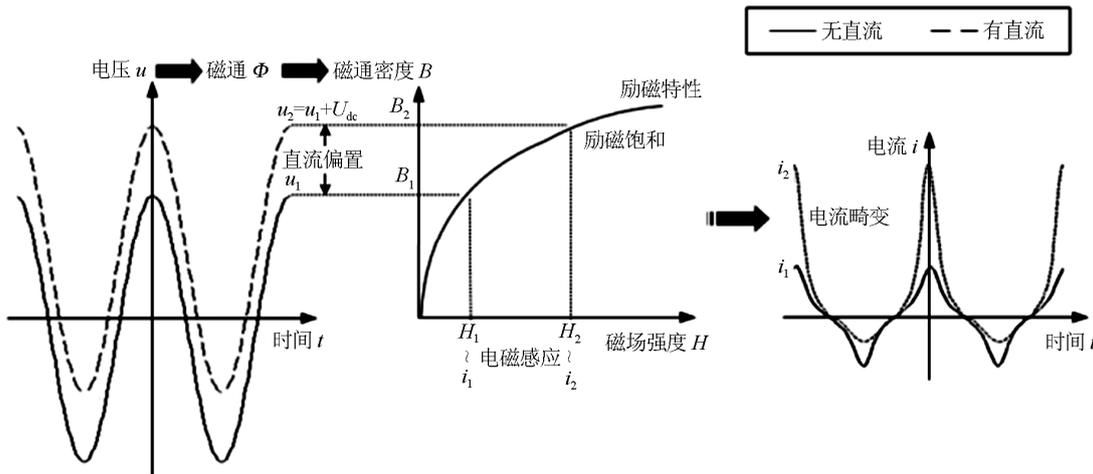


图3 变压器铁心饱和机理

Fig. 3 Saturation mechanism of transformer core

1) 根据变压器励磁电流的直流分量 I_d 判别是否存在直流扰动, 则有:

$$\begin{cases} I_d > 0, \text{ 存在} \\ I_d = 0, \text{ 不存在} \end{cases} \quad (9)$$

2) 基于双端同步采样的端口量测信息获取励磁谐波畸变率 THD, 定义差值函数 f , 表征励磁谐波畸变率变化:

$$f(THD) = |THD - THD_0| \quad (10)$$

式中, THD_0 为变压器空载运行未遭受直流扰动时的谐波畸变率。未受直流扰动时谐波畸变率变化范围为 $f_0=0$, 考虑到变压器运行稳定性对 f 的限值进行修正, 定义可靠系数 K_r , 其取值范围为 1.1~1.2, 令 $f_s=(K_r-1)THD_0$, 若 $f>f_s$, 则判定变压器直流扰

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{\zeta=2}^N I_{\zeta}^2}}{I_1} \times 100\% \quad (8)$$

式中: ζ 为谐波次数; N 为最高谐波次数; I_{ζ} 表示 ζ 次谐波电流有效值; I_1 为基波电流有效值。

1.4 直流扰动铁心饱和失稳判据

由图3可知, 变压器励磁受直流扰动影响具有半周饱和的特点, 进而导致电流畸变等异常, 并且随着直流扰动程度的加深, i_e 畸变严重^[19-20], 而 i_e 谐波含量可量化 i_e 畸变程度。研究表明, i_e 谐波含量能够反映变压器受直流扰动时铁心饱和失稳状况, 进而可制定直流扰动下铁心饱和失稳判据。

变压器空载运行时 i_1 近似为励磁电流 i_e ^[18], 通过检测直流扰动下的 i_e 谐波含量情况, 并与空载 i_1 谐波含量比较, 从而表征变压器的励磁饱和状态。

动铁心饱和失稳。

2 励磁谐波仿真与实验

采用时域电磁耦合模型仿真模拟变压器交直流混杂运行模式。通过高阶数值迭代算法求解时域电路模型, 利用 ANSYS 有限元分析软件建立 1/8 仿真模型, 见图4, 模型尺寸与实际比例为 1:1, 变压器型号为 BK300, 参数见表1, 铁心硅钢片型号为 DW360-50, 将实际 $B-H$ 数据代入磁场。磁场模型施加外边界磁力线平行和对称面磁力线垂直的边界条件, 激励为时域微分电路迭代计算得到的线圈电流。

搭建变压器交直流混杂运行实验平台, 接线原理及物理平台如图5所示。

表 1 变压器参数

Table 1 Parameters of transformer

铭牌参数	额定值	量测值
频率/Hz	50	—
容量 S _N /VA	300	—
电压 U _N /V	220/60	—
空载电流 I ₀ /A	—	0.1
铁心尺寸/mm	—	132×60×110
原/(副)边匝数	375/105	—
原/(副)边电阻/Ω	—	4.3/0.2

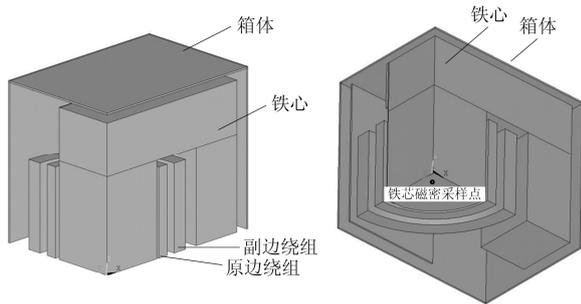


图 4 变压器仿真模型

Fig. 4 Simulation model of transform

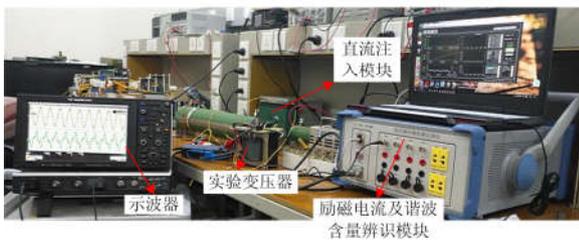
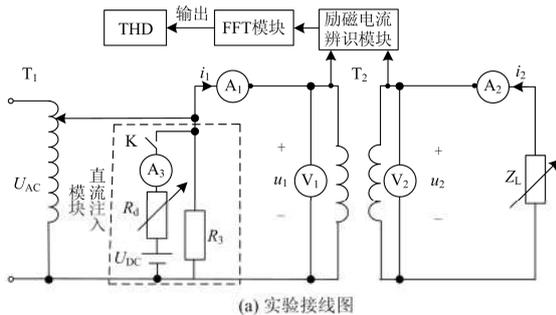


图 5 动模实验

Fig. 5 Dynamic simulation experiment

实验具体步骤如下:

- 1) 调节自耦变压器 T₁, 在实验变压器 T₂ 原边施加 220 V 交流电压;
- 2) 闭合直流支路开关 K, 调节滑动变阻器改变直流输入量, 直至电流表 A₃ 示数达到研究所需的直流水平;
- 3) 利用示波器记录电压、电流波形。设计励磁

电流辨识模块及 FFT 模块, 对励磁电流参数进行辨识与变换, 得到谐波频谱及有效值。

4) 调节直流注入模块, 将直流电压源产生的直流电流表示为 I_{DC} , $I_{DC} = \alpha I_0$, I_0 为空载电流有效值, 观察并记录不同 α 时变压器的电磁参数。

5) 变压器副边接 12 Ω 电阻模拟满载(100%负载率)运行, 直流扰动由原边注入。

铁心磁感应强度 B 仿真结果见图 6。

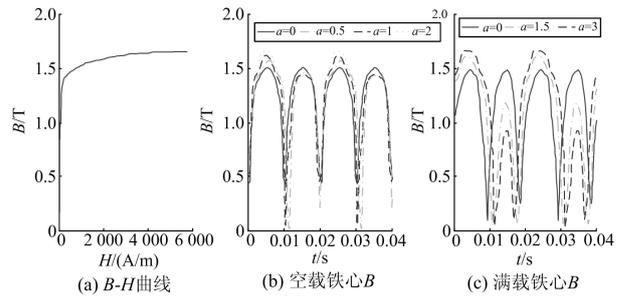


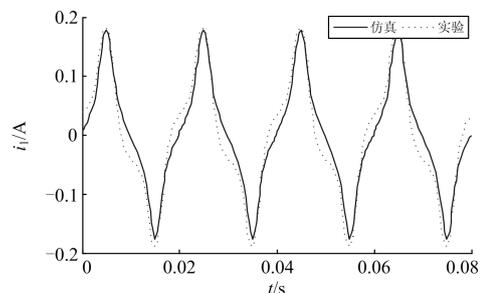
图 6 铁心 B 仿真结果

Fig. 6 Simulation results of B in core

由图 6 分析可知, 铁心 B 在不同运行方式下受直流扰动的变化情况类似, 无直流时, 在正负半周对称, 且峰值均约为 1.5T, 工作点处于 $B-H$ 曲线的拐点区域; 遭受直流扰动时, 铁心 B 在正负半周不对称, 但峰值增长并不明显, 表明工作点越过拐点进入过饱和区域, 铁心出现励磁饱和失稳现象。

变压器空载运行的仿真及实验结果见图 7。由图 7 分析可知, i_e 受变压器非线性励磁的影响, 呈尖顶波, 其峰谷区域表示励磁处于饱和状态, 零点附近位置表示励磁不饱和。由于忽略了磁滞效应, 在不饱和区仿真与实验存在一定误差, 但本文研究直流扰动下变压器励磁状况, 随着直流水平提高, 励磁饱和程度加深, 磁滞影响较小, 波形畸变严重, 谐波含量增加, 不难看出, i_e 谐波含量与铁心饱和程度存在一一对应的关系。

满载励磁电流及谐波特性的仿真、实验结果见图 8。值得注意, 当 $\alpha=1.5$ 时, 变压器原边电压上升至 200 V, 励磁严重饱和, 铁心振动剧烈, 部分绝缘已出现烧毁现象, 实验无法进行。



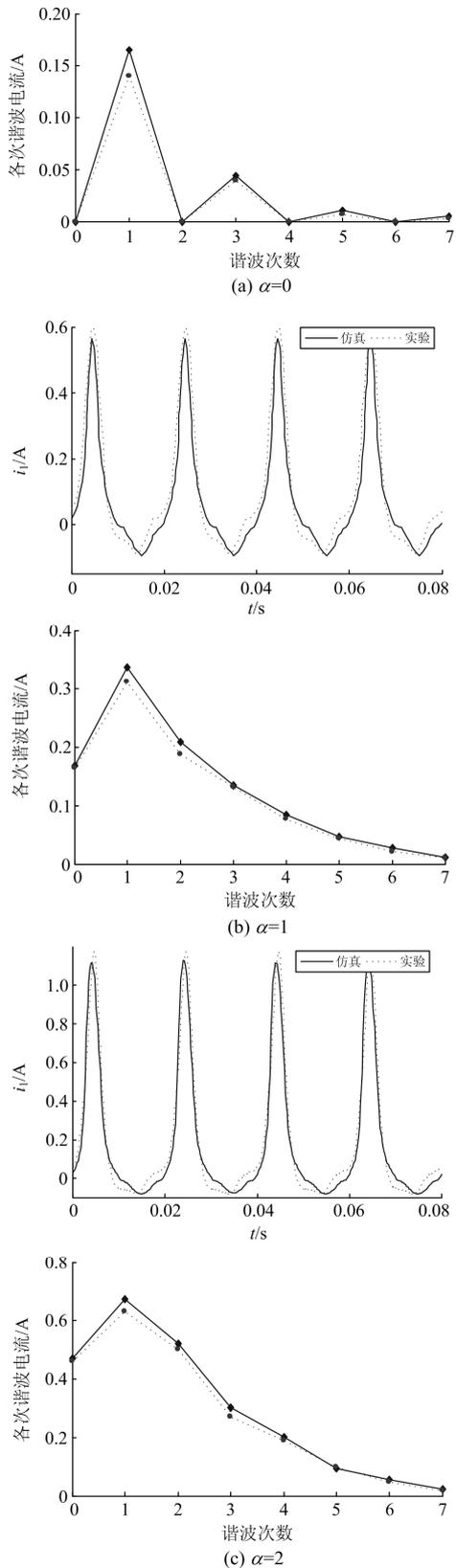


图 7 空载运行 i_e 及各次谐波电流结果

Fig. 7 Results of i_e and harmonic in no-load operation

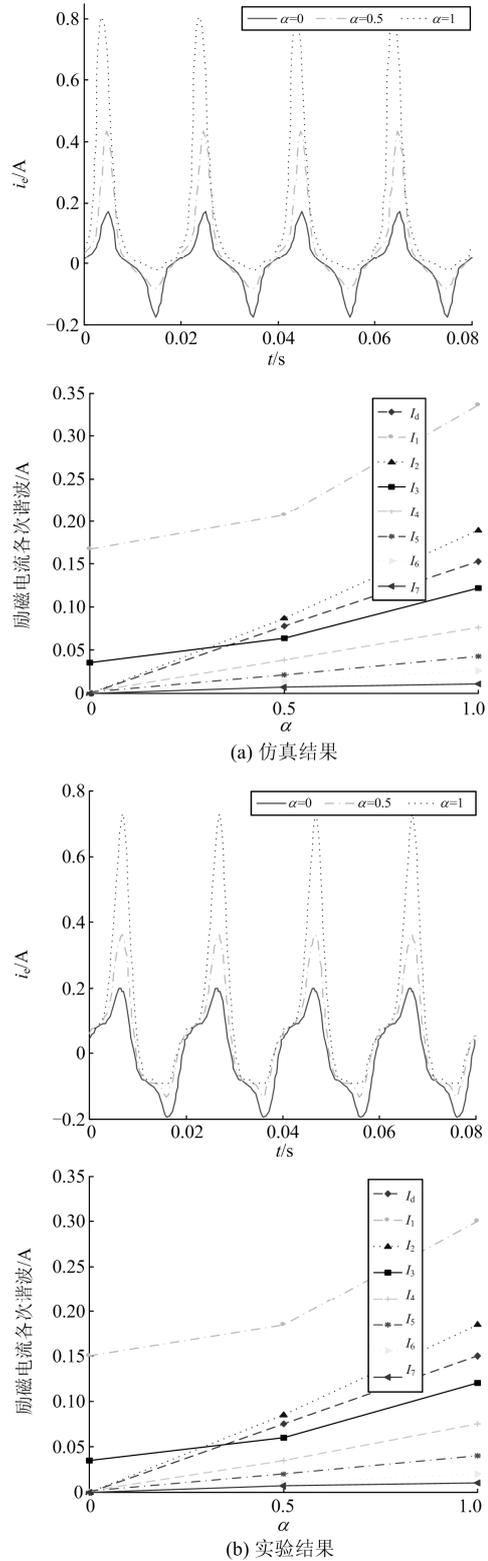


图 8 满载运行 i_e 及各次谐波电流结果

Fig. 8 Results of i_e and harmonic in full-load operation

由图 8 结果表明, 变压器满载运行时, i_e 波形及其各次谐波的变化规律与空载运行一致, 其励磁

谐波能够有效反映铁心饱和的变化情况。

结合图 7、图 8 可知,在不同运行方式和直流水平条件下, i_e 及其各次谐波仿真结果与实验数据基本一致,验证了励磁电流辨识方法的正确性及 FFT 变换模块的有效性; $\alpha=0$ 时 i_e 主要含有 3 次谐波,高次谐波含量较少,随着 α 增大,出现直流分量与偶次谐波,各次谐波分量随 α 增大而增大,其中,2 次谐波分量变化与 α 近似呈线性关系。

进一步研究励磁谐波畸变率随直流变化情况,以无直流时励磁谐波畸变率为基准,将不同 α 对应的 THD 进行折算,折算系数用 β 表示,仿真结果见图 9。

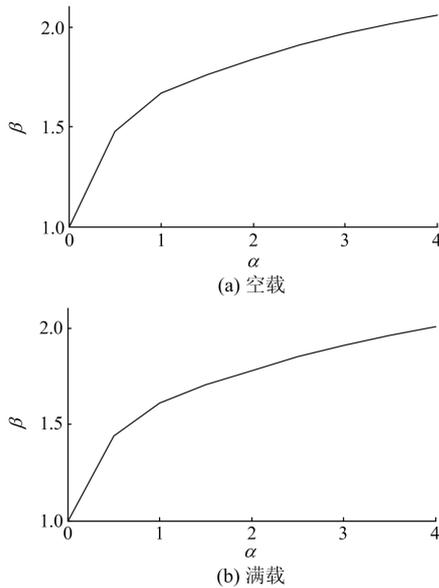


图 9 THD 随 α 变化曲线

Fig. 9 Change curve of THD with α

由图 9 可知,励磁谐波畸变率随直流水平提高而增大。结果表明,可通过励磁谐波描述变压器铁心饱和的变化过程。

在不同直流水平下,对直流扰动铁心饱和失稳判据进行分析,仿真和实验结果如表 2 所示。以表

表 2 THD 仿真和实验结果

Table 2 Simulation and experiment results of THD

运行状态	仿真			实验			
	α	THD/%	f	运行状态	α	THD/%	f
空载	0	19.01	0	空载	0	19.32	0
	0.5	24.95	5.94		0.5	25.24	6.01
	1	28.59	9.85		1	28.87	9.55
	1.5	30.49	11.48		1.5	30.69	11.37
	0	19	0.01		0	19.27	0.05
满载	0.5	23.19	4.18	满载	0.5	23.51	4.19
	1	25.99	6.98		1	26.77	7.45
	1.5	27.72	8.71		—	—	—

2 中实验结果为例,分析可知, THD_0 取值为 19.32%, f_s 取 3.864%(变化幅度为 20%)。 $\alpha=0.5$ 时, f 的数值超出整定范围,利用本文判据能够有效判别直流扰动铁心饱和失稳。对比仿真与实验数据可知,两者结果基本一致。结果表明,直流扰动铁心饱和失稳判据能够有效的判别铁心饱和失稳。

3 结论

1) 提出了直流扰动下变压器励磁电流及其谐波含量的辨识方法,通过仿真与实验对比,验证该方法的正确性。

2) 变压器在直流扰动下铁心饱和失稳,励磁电流总谐波畸变率随直流水平升高而增大,可利用谐波畸变率构建变压器铁心饱和失稳判据。通过仿真结果与实验数据对比验证了该判据的有效性。

参考文献

- [1] DANIEL G, HECTOR E, ERNESTO V, et al. Algorithm for transformer differential protection based on wavelet correlation modes[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(12): 2871-2879.
- [2] 曹楠, 王天正, 王冬青, 等. 变压器直流偏磁治理站点选择优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 117-122.
CAO Nan, WANG Tianzheng, WANG Dongqing, et al. Study on configuration optimization method of transformer magnetic bias treatment[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 117-122.
- [3] PAN Zhuohong, WANG Xiaomao, TAN Bo, et al. Potential compensation method for restraining the DC bias of transformers during HVDC monopolar operation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 103-111.
- [4] TANAKA S, MURATA H, HATSUKADE T, et al. Imaging of magnetic nanoparticles using a second harmonic of magnetization with DC bias field[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(2): 1-4.
- [5] LI X P, WEN X S, MARKHAM P N, et al. Analysis of nonlinear characteristics for a three-phase five-limb transformer under DC bias[J]. IEEE Transactions on Delivery, 2010, 25(4): 2504-2510.
- [6] PRICE P R. Geomagnetically induced current effects on transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 17(4): 1002-1008.
- [7] SABURO T, HAYAKI M, TOMOVA H, et al. Imaging of magnetic nanoparticles using a second harmonic of magnetization with DC bias field[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(2): 1-4.

- [8] BIRO O, KOCZKA G, LEBER G, et al. Finite element analysis of three-phase three-limb power transformers under DC bias[J]. IEEE Magnetics Society, 2014, 50(2): 565-568.
- [9] KOSAI H, TURGUT Z, BIXEL T, et al. Performance comparison of finemet and metglas tape cores under non-sinusoidal waveforms with DC bias[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(7): 1-4.
- [10] WANG Shuaibing, LI Lin, ZHAO Xiaojun, et al. Asymmetrical DC bias analysis of the no-load series transformer by using the TPFEM[J]. IET Electric Power Applications, 2017, 11(2): 169-177.
- [11] BAI Baodong, CHEN Zhiwei, CHEN Dezhi. DC bias elimination and integrated magnetic technology in power transformer[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 1-4.
- [12] TANAKA S, MURATA H, OISHI T, et al. Imaging of magnetic nanoparticles using a second harmonic of magnetization with DC bias field[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(2): 1-4.
- [13] 翁汉琮, 杨国稳, 相艳会, 等. 变压器饱和对交流电网直流电流分布的影响[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3295-3300.
- WENG Hanli, YANG Guowen, XIANG Yanhui, et al. Effect of transformer saturation on the DC distribution of AC power system[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3295-3300.
- [14] 李妍, 周洪伟, 沈小伟, 等. 电力变压器绕组电气参数对绕组变形的全局灵敏度分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 31-37.
- LI Yan, ZHOU Hongwei, SHEN Xiaowei, et al. Global sensitivity analysis of winding electrical parameters on power transformer winding deformation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 31-37.
- [15] 戚宣威, 李露, 黄晓明, 等. 区外故障导致变压器电流互感器饱和及差动保护误动问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 44-51.
- QI Xuanwei, LI Lu, HUANG Xiaoming, et al. Study on the CT saturation and mal-operation of the transformer current differential protection during external faults[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 44-51.
- [16] 李长云, 刘亚魁. 直流偏磁条件下变压器铁心磁化特性的 Jiles-Atherton 修正模型[J]. 电工技术学报, 2017, 32(19): 193-201.
- LI Changyun, LIU Yakui. Modified Jiles-Atherton model of transformer iron core magnetization characteristics with DC bias[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(19): 193-201.
- [17] 焦在滨, 马涛, 屈亚军, 等. 基于励磁电感参数识别的快速变压器保护[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1658-1666.
- JIAO Zaibin, MA Tao, QU Yajun, et al. A novel excitation inductance-based power transformer protection scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1658-1666.
- [18] 潘超, 王泽忠, 李海龙, 等. 基于瞬态场路耦合模型的变压器直流偏磁计算[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 174-181.
- PAN Chao, WANG Zezhong, LI Hailong, et al. DC-bias calculation for single phase transformers based on transient field-circuit coupled model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 174-181.
- [19] 李泓志, 崔翔, 刘东升, 等. 直流偏磁对三相电力变压器的影响[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 88-96.
- LI Hongzhi, CUI Xiang, LIU Dongsheng, et al. Influence on three-phase power transformer by DC bias excitation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 88-96.
- [20] 白保东, 赵晓旋, 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(S2): 162-166.

收稿日期: 2018-05-29; 修回日期: 2018-07-02

作者简介:

王格万(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与电磁兼容; E-mail: 841476613@qq.com

潘超(1981—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统稳定与电磁兼容。E-mail: 31563018@qq.com

(编辑 姜新丽)