

变压器励磁涌流负序高次谐波的研究

变压器在空载合闸过程中会产生励磁涌流，其中励磁涌流中含有大量二次谐波。之前一般通过判别二次谐波含量或电流波形间断角来甄别励磁涌流。从另外一个角度即变压器负序高次谐波含量对变压器励磁涌流进行研究，通过Matlab仿真不同剩磁和对不同磁通饱和情况下，变压器空载合闸过程励磁涌流中负序高次谐波含量进行比较，得出变压器励磁涌流负序高次谐波的一些特征。

王 飞/安徽淮南平圩发电有限责任公司

何智龙/中国大唐集团科学技术研究院有限公司华东电力试验研究院



王 飞/工程师

关键词/Keywords

变压器 ·
励磁涌流 ·
负序高次谐波 ·

0 引言

变压器励磁涌流一直以来是电力行业科研技术人员研究与关注的重点之一，以往对变压器励磁涌流主要以二次谐波和电流波形间断角为主要特征。在变压器继电保护中也主要是以励磁涌流中二次谐波含量作为判据，并对变压器差动保护加以闭锁。文献[1]中分析讨论了变压器励磁涌流负序二次谐波的特征与机理。推导出只有变压器三相铁心含有不平衡剩磁才会造成励磁涌流中二次谐波以负序为主的现象，但是并未对二次谐波的具体含量作出明确定量的分析，也未对负序高次谐波作出具体讨论。本文将更加深入研究变压器励磁涌流负序高次谐波的特征，并对其应用作相关探讨。

1 励磁涌流高次谐波理论分析

1.1 高次谐波的解析表达式

图1为变压器空载模型，图1中， R_1

和 R_2 分别为变压器一次和二次电阻； L_1 和 L_2 分别为变压器一次和二次漏感； L 为励磁电感。

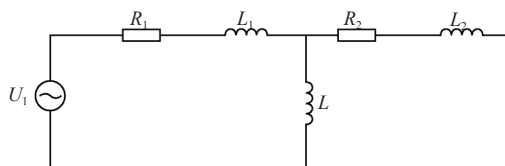


图1 变压器空载模型

由以上模型可得

$$\begin{cases} R_1 i + L_1 \frac{di}{dt} + L \frac{di}{dt} = u_1 \\ L \frac{di}{dt} = \frac{d\varphi}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

求解上述方程，得到三相磁通表达式

$$\begin{cases} \varphi_A(t) = \varphi_m \sin(\omega t + \alpha - \delta - \varphi_m) - \varphi_m \sin(\alpha - \delta) e^{-\frac{t}{T}} \\ \varphi_B(t) = \varphi_m \sin(\omega t + \alpha - \delta - 120^\circ) - \varphi_m \sin(\alpha - \delta - 120^\circ) e^{-\frac{t}{T}} \\ \varphi_C(t) = \varphi_m \sin(\omega t + \alpha - \delta + 120^\circ) - \varphi_m \sin(\alpha - \delta + 120^\circ) e^{-\frac{t}{T}} \end{cases} \quad (2)$$

考虑到剩磁影响，三相磁通表达式为

$$\begin{cases} \varphi_A(t) = -\varphi_m \cos(\omega t + \alpha) + \varphi_m (\cos \alpha + \varphi_{rA}) e^{-t} \\ \varphi_B(t) = -\varphi_m \cos(\omega t + \alpha - 120^\circ) + \varphi_m (\cos \alpha + \varphi_{rB} - 120^\circ) e^{-t} \\ \varphi_C(t) = -\varphi_m \cos(\omega t + \alpha + 120^\circ) + \varphi_m (\cos \alpha + \varphi_{rC} + 120^\circ) e^{-t} \end{cases} \quad (3)$$

式中， φ_{rA} 、 φ_{rB} 和 φ_{rC} 为三相初始剩磁。

图2为铁心近似磁化曲线。

列出曲线方程为

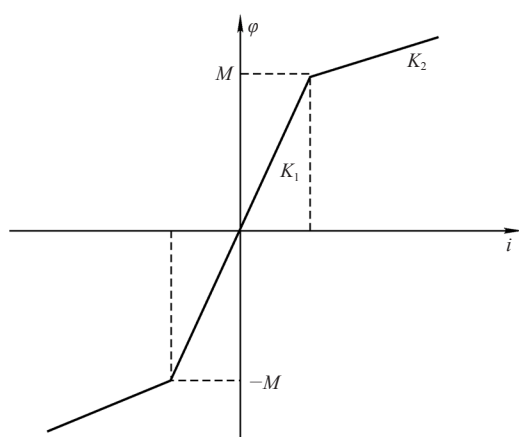


图2 铁心近似磁化曲线

$$\varphi = \begin{cases} K_1 i - M \leq \varphi \leq M \\ K_2 i + M(1 - \frac{K_1}{K_2}) & M \leq \varphi \\ K_2 i + M(\frac{K_1}{K_2} - 1) & -M \geq \varphi \end{cases} \quad (4)$$

由此可得到励磁涌流表达式为

以A相为例

$$i = \begin{cases} \frac{-\varphi_m \cos(\omega t + \alpha) + \varphi_m (\cos \alpha + \varphi_{rA}) e^{-t}}{K_1} & -M \leq \varphi \leq M \\ \frac{-\varphi_m \cos(\omega t + \alpha) + \varphi_m (\cos \alpha + \varphi_{rA}) e^{-t}}{K_2} - M(\frac{1}{K_2} - \frac{1}{K_1}) & M \leq \varphi \\ \frac{-\varphi_m \cos(\omega t + \alpha) + \varphi_m (\cos \alpha + \varphi_{rA}) e^{-t}}{K_2} - M(\frac{1}{K_1} - \frac{1}{K_2}) & -M \geq \varphi \end{cases} \quad (5)$$

由于励磁涌流持续数秒之久，在第一个周期内衰减很小，因此忽略其衰减过程。对其进行傅里叶变换，可得到励磁涌流高次谐波的表达式为

$$\begin{cases} i_{An} = \sqrt{\gamma_{An}} \sin(\omega t + \beta_A) \\ i_{Bn} = \sqrt{\gamma_{Bn}} \sin(\omega t + \beta_B) \\ i_{Cn} = \sqrt{\gamma_{Cn}} \sin(\omega t + \beta_C) \\ \gamma_{An} = a_{An}^2 + b_{An}^2 \\ \gamma_{Bn} = a_{Bn}^2 + b_{Bn}^2 \\ \gamma_{Cn} = a_{Cn}^2 + b_{Cn}^2 \\ n = 2, 3, 5, 7 \end{cases} \quad (6)$$

1.2 负序高次谐波的解析表达式

采用对称分量法可得到负序基波的表达式为

$$I_{12} = \frac{1}{3} [\sqrt{\gamma_{A1}} \angle \beta_A + \sqrt{\gamma_{B1}} \angle (\beta_B - 120^\circ) + \sqrt{\gamma_{C1}} \angle (\beta_C + 120^\circ)] \quad (7)$$

推而广之，负序高次谐波表达式为

$$I_{n2} = \frac{1}{3} [\sqrt{\frac{\gamma_{An}}{n}} \angle \beta_A + \sqrt{\frac{\gamma_{Bn}}{n}} \angle (\beta_B - 120^\circ) + \sqrt{\frac{\gamma_{Cn}}{n}} \angle (\beta_C + 120^\circ)] \quad (8)$$

现定义负序分量系数，即电流的负序高次谐波与负序基波比值为

$$F_n = \frac{I_{n2}}{I_{12}} \quad (9)$$

当 $F_n > 1$ 时，励磁涌流负序高次谐波分量大于负序基波分量；反之，当 $F_n < 1$ 时，励磁涌流负序高次谐波分量小于负序基波分量。由上述表达式可知，影响负序基波和负序高次谐波主要因素有剩磁和磁通饱和点。以下将从这些角度仿真分析其结果。

2 励磁涌流高次谐波仿真

2.1 仿真模型

励磁涌流高次谐波仿真基于Matlab中Simulink仿真平台，仿真模拟变压器空载合闸的过程。变压器容量为600 MW，仿真模型按照断路器实际合闸时间30 ms左右模拟实际合闸过程。仿真模型如图3所示。

2.2 三相平衡剩磁对负序高次谐波分量系数的影响

电力系统实际运行情况下，由于三相电压电流的对称造成断路器在开断过程中三相剩磁保持对称。仿真模型中，变压器三相铁心剩磁设置为平衡。变换三相铁心剩磁大小，统计电流负序基波、高次谐波以及负序分量系数，图4为在A、B和C三相剩磁分别为0.5、-0.25和-0.25情况下负序基波峰值和有效值。从图4中可以看出，在变压器合闸过程中，负序基波峰值达到2 700 A，有效值达到1 600 A。

图5为负序二次谐波波峰值和有效值，负序二次谐波峰值达到1 200 A，有效值达到820 A。依次类推，在不同剩磁情况下，统计电流负序基波和负序高次谐波有效值，并得出负序分量系数，如表1所示。

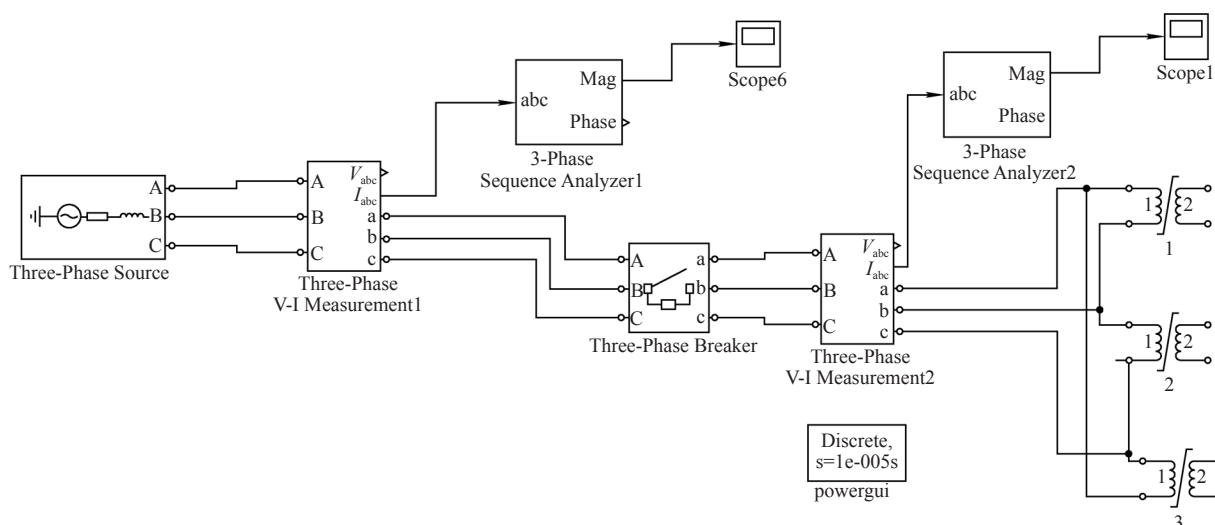


图3 Matlab仿真模型

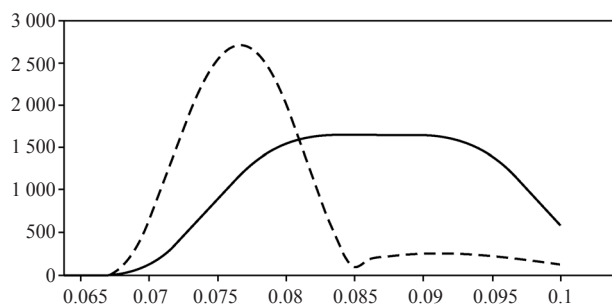


图4 负序基波峰值和有效值

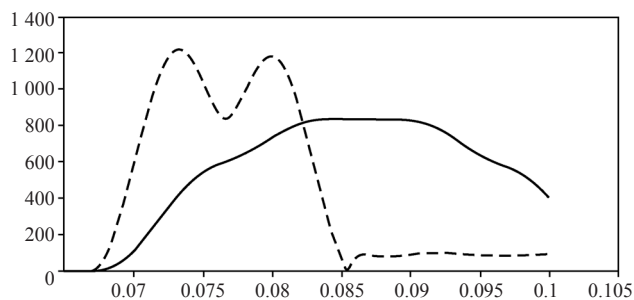


图5 负序二次谐波峰值和有效值

表1 三相平衡剩磁仿真结果

平衡剩磁	A	0.2	0.4	0.5	0.7
	B	-0.1	-0.2	-0.25	-0.35
	C	-0.1	-0.2	-0.25	-0.35
I_{12}	1.0	1.4	1.6	1.7	
I_{22}/F_2	0.39/0.39	0.61/0.43	0.82/0.51	0.88/0.52	
I_{32}/F_3	0.19/0.19	0.42/0.30	0.57/0.35	0.61/0.36	
I_{52}/F_5	0.05/0.05	0.15/0.10	0.35/0.12	0.47/0.28	

由表1近似绘出平衡剩磁情况下负序系数趋势，如图6所示。显而易见，随着变压器平衡剩磁的增加，同一高次谐波负序分量也随着增加；同时，在同一剩磁情况下，负序分量系数随着谐波次数的增大而减小，负序二次谐波分量系数最大，且负序二次谐波分量系数均小于1。

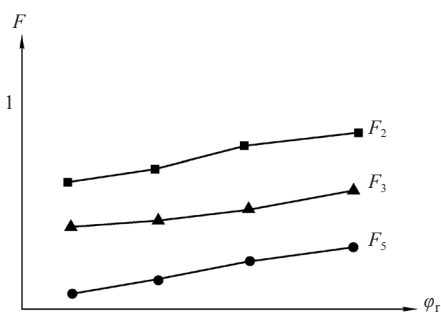


图6 平衡剩磁负序系数趋势

2.3 三相不平衡剩磁对负序高次谐波分量系数的影响

上述分析了变压器平衡剩磁对励磁涌流负序谐波的影响，然而在某些情况下，变压器铁心也会出现不平衡剩磁，较为常见的是直流电阻测试。在测量直流电阻过程中，如给线圈通入直流电流较大且未进行去磁操作时，会在变压器三相铁心形成三相不平衡剩磁。同样在图3模型中对变压器三相剩磁设置为不平衡。

图7为A、B和C三相剩磁分别为0.5情况下负序基波波峰值和有效值。从图7中可以看出，在变压

器合闸过程中, 负序基波峰值达到1 200 A, 有效值达到650 A。

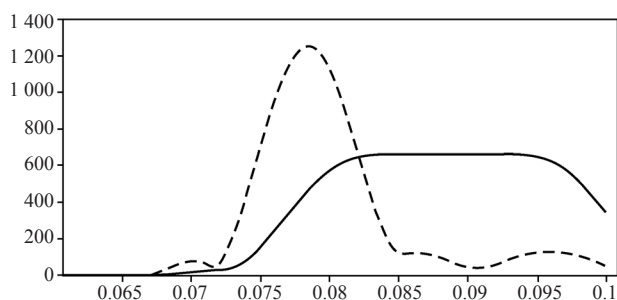


图7 负序基波峰值和有效值

图8为负序二次谐波峰值和有效值, 负序二次谐波峰值达到2 800 A, 有效值达到2 800 A。依次类推, 统计其他负序高次谐波有效值, 并得出负序分量系数, 如表2所示。

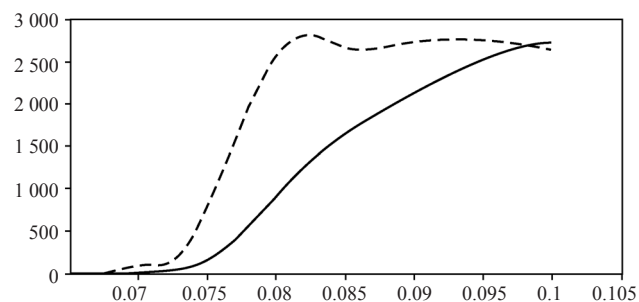


图8 负序二次谐波峰值和有效值

表2 三相不平衡剩磁仿真结果

平衡剩磁	A	0.2	0.4	0.5	0.7
	B	0.2	-0.4	0.5	0.7
	C	0.2	-0.4	0.5	0.7
I_{12}	0.3	0.5	0.65	0.75	
I_{22}/F_2	1.1/3.7	2.0/4.0	2.8/4.3	3.4/4.5	
I_{32}/F_3	0.8/2.7	1.5/3.0	2.4/3.7	2.9/3.8	
I_{52}/F_5	0.7/2.3	0.75/2.5	1.8/2.7	2.3/3.0	

由表2可以绘出不平衡剩磁情况下负序系数高次谐波趋势, 如图9所示。

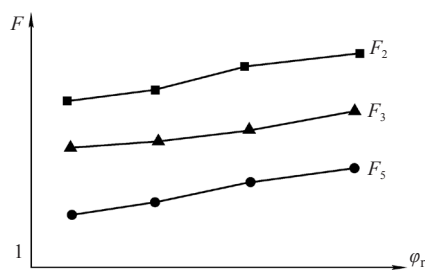


图9 不平衡剩磁负序系数趋势

从图9可以看出, 在三相不平衡剩磁情况下, 随着不平衡剩磁的增大, 电流负序分量系数也增大。在同一不平衡剩磁情况下, 负序分量系数随着谐波次数的增大而减小, 负序二次谐波分量系数最大。相比于平衡剩磁, 在不平衡剩磁情况下, 负序分量系数均大于1。

2.4 磁通饱和点M对负序高次谐波分量系数的影响

从前文可知, 影响负序高次谐波分量系数的其中一个因素就是磁通饱和点M, 因为磁通饱和点不同, 直接影响铁心磁化曲线方程, 从而影响励磁涌流的表达式, 最终使得负序高次谐波分量系数因此而改变。以下为仿真在不同磁通饱和点情况下负序高次谐波分量系数的变化规律。

1) 平衡剩磁情况下, 将磁通饱和点M从1.0变化到1.3。图10、图11为A、B和C三相平衡剩磁分别为0.5、-0.25和-0.25, 磁通饱和点M=1.1情况下负序基波和二次谐波峰值和有效值。表3为A、B和C三相平衡剩磁分别为0.5、-0.25和-0.25, 磁通饱和点从1.0到1.3条件下负序高次谐波和负序分量系数。

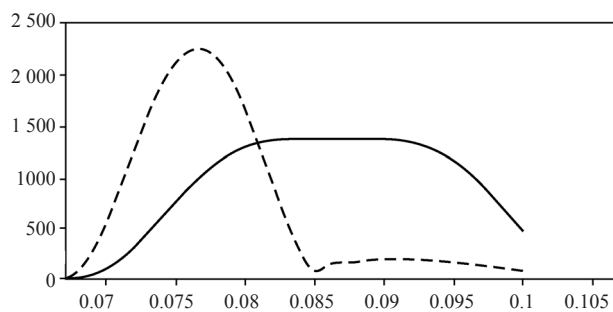


图10 M=1.1负序基波分量

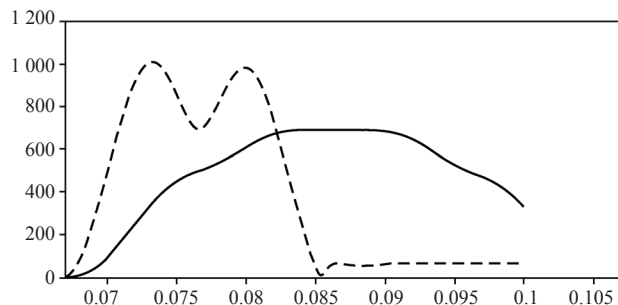


图11 M=1.1负序二次谐波分量

由表3绘出平衡剩磁下, 不同磁通饱和点负序分量系数趋势, 如图12所示。从图12可以看出,

表3 三相平衡剩磁不同磁通饱和点仿真结果

平衡剩磁	A:0.5, B:-0.25, C:-0.25		
	M=1.0	M=1.1	M=1.3
I_{12}	1.6	1.3	1.0
I_{22}/F_2	0.82/0.51	0.70/0.53	0.5/0.5
I_{32}/F_3	0.57/0.35	0.45/0.34	0.32/0.32
I_{52}/F_5	0.35/0.12	0.30/0.23	0.20/0.20

随着磁通饱和点 M 值的增大,同一负序高次谐波含量减小,但是负序分量系数基本保持不变。在同一磁通饱和点 M 值下,负序高次谐波含量和负序分量系数随着谐波次数的增大而减小。

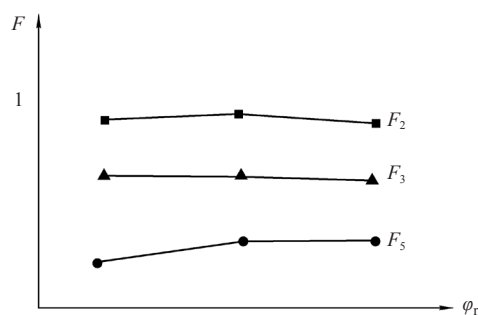


图12 平衡剩磁不同磁通饱和点负序系数趋势

2) 不平衡剩磁情况下,将磁通饱和点 M 从1.0变化到1.3。表4为A、B和C三相不平衡剩磁分别为0.5,磁通饱和点从1.0到1.3条件下负序高次谐波和负序分量系数。

表4 三相不平衡剩磁不同磁通饱和点仿真结果

平衡剩磁	A=0.5、B=0.5、C=0.5		
	M=1.0	M=1.1	M=1.3
I_{12}	0.65	0.5	0.3
I_{22}/F_2	2.8/4.3	2.0/4.4	1.3/4.3
I_{32}/F_3	2.4/3.7	1.9/3.8	1.1/3.6
I_{52}/F_5	1.8/2.7	1.3/2.6	0.8/2.7

由表4绘出不平衡剩磁下,不同磁通饱和点负序分量系数趋势,如图13所示。从图13可以看出,

随着磁通饱和点 M 值的增大,同一负序高次谐波含量减小,但是负序分量系数基本保持不变。在同一磁通饱和点 M 值下,负序高次谐波含量和负序分量系数随着谐波次数的增大而减小,现象基本与平衡剩磁下不同磁通饱和点负序分量系数趋势一致。

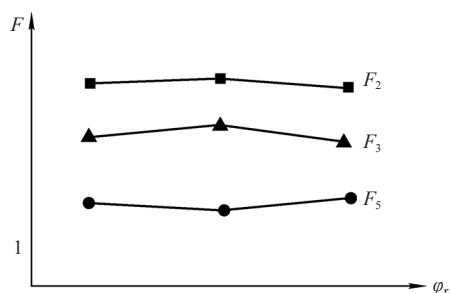


图13 不平衡剩磁不同磁通饱和点负序系数趋势

3 结束语

本文对变压器励磁涌流中负序基波和负序高次谐波进行了详细的理论推导,并提出负序分量系数这一概念。通过Matlab仿真得出在不同剩磁和不同磁通饱和点条件下的一些结论:

1) 在平衡剩磁下,随着变压器平衡剩磁的增加,负序分量系数随着剩磁的增加而增大。在同一平衡剩磁情况下,负序分量系数随着谐波次数的增大而减小。负序二次谐波分量系数最大,且负序二次谐波分量系数均小于1。

2) 在不平衡剩磁下,随着变压器不平衡剩磁的增加,负序分量系数随着剩磁的增加而增大。在同一平衡剩磁情况下,负序分量系数随着谐波次数的增大而减小,负序二次谐波分量系数最大,且负序二次谐波分量系数均大于1。

3) 在平衡和不平衡剩磁情况下,随着磁通饱和点 M 值的增大,同一负序高次谐波含量减小,但是负序分量系数基本保持不变。在同一磁通饱和点 M 值下,负序高次谐波含量和负序分量系数随着谐波次数的增大而减小。

参考文献

- [1] 焦在滨. 变压器励磁涌流负序二次谐波特征及机理[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 147-151.
- [2] 余培岩, 马未平, 等. 变压器五次谐波的产生

- 及其对负序电压继电器的影响[J]. 电力设备, 2015, 5(8): 27-30.
- [3] 周晋. 谐波、负序在电网中透入机理的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [4] 何越, 熊元新, 姜山, 等. 变压器空载合闸励磁涌流的仿真分析研究[J]. 电力学报, 2010, 25(1): 33-36.
- [5] 金恩淑, 李晓娜, 夏国武. 基于正序分量变压器励磁涌流的新判据[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 7-11.
- [6] 吴杰, 刘健, 卢志刚. 基于Matlab的电力系统谐波评估研究[J]. 继电器, 2006, 34(22): 14-17.
- [7] 王维俭, 侯炳蕴. 大型机组继电保护理论基础[M]. 2版. 北京: 电力出版社, 1989.
- [8] 王晶. 电力系统的MATLAB/SIMULINK仿真与应用[M]. 2版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.
- [9] 王猛. 电力系统谐波、负序过程仿真分析及应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.
- [10] 冯勇, 柳焕章. 变压器励磁涌流的新判据[J]. 继电器, 2002, 30(10): 83-89.
- [11] 李贵存, 刘万顺, 滕林. 基于波形相关性分析的变压器励磁涌流识别新算法[J]. 电力系统自动化, 2001, 20(11): 25-28.
- [12] Mortazavi H, Khorashadi-Zadeh H. A new inrush restraint algorithm for transformer[J]. Power System Technology, 2004, 2(5): 1705-1709.

(收稿日期: 2018-06-25) **EA**

专业专注

时刻关注并推动中国电气技术的发展



国家期刊奖 “百种重点期刊”

中国期刊方阵 “双奖期刊”

《电气应用》杂志创刊于1982年, 是国家新闻出版署正式批准注册, 由中国机械工业联合会主管, 机械工业信息研究院主办的专业技术期刊。通过多年来的不懈努力, 我刊内容建设取得长足进步, 连续荣获全国优秀期刊奖, 机械工业部优秀期刊奖, 中文核心期刊; 在由新闻出版署、科技部组织评选的“中国期刊方阵评奖”活动中, 本刊连续荣获中国期刊方阵“双奖期刊”, 国家期刊奖“百种重点期刊”等殊荣, 已成为电气行业颇具影响的专业核心技术期刊。