

DOI: 10.7652/xjtuxb201406010

非自治铁磁谐振电路过电压脉冲时滞 同步抑制方法研究

惠萌, 刘盼芝, 白璘, 李艳波, 武奇生

(长安大学电子与控制工程学院, 710064, 西安)

摘要: 针对铁磁谐振事故产生的过电压会对电力设备产生危害的问题, 从对一典型铁磁谐振电路的非线性特性分析入手, 并考虑铁磁谐振过电压从检测到加入抑制措施会产生一定的时滞, 提出了一种考虑时滞因素的脉冲同步铁磁谐振抑制方法。该控制方法可以使得发生谐振的电路系统与正常工作系统实现同步, 从而抑制铁磁谐振过电压的幅值, 降低系统风险。利用 Simulink 软件对提出的控制方法进行仿真计算, 结果表明: 不考虑时滞因素加入脉冲控制, 系统达到同步状态所需时间约为 1.5 s, 加入时滞后脉冲同步所需时间约为 1.0 s, 同步所需时间能够缩短 33%; 通过和未考虑时滞因素的常规脉冲同步方法进行对比及对电路中非线性电感两端电压的监测, 表明该方法能够快速有效地实现铁磁谐振过电压的同步抑制。研究作为保障电力系统安全提供了新的思路。

关键词: 铁磁谐振; 脉冲时滞; 混沌同步

中图分类号: TM933 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)06-0055-05

Overvoltage Suppression by Impulsive Time-Lagging Synchronization of Non-Autonomous Ferroresonance Chaotic Circuit

HUI Meng, LIU Panzhi, BAI Lin, LI Yanbo, WU Qisheng

(School of Electronics and Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Focusing on overvoltage due to ferroresonance in power equipment, a new suppressing strategy is proposed. By taking notice of the nonlinear characteristics of a non-autonomous ferroresonance chaotic circuit and the lagging of exerting suppression behind ferroresonance detecting, an impulsive delay feedback is considered to synchronize the ferroresonance system with normal system to suppress overvoltage. The Simulink simulation indicates that the newly proposed strategy enables to shorten the synchronization period by 33% compared with the common schemes ignoring lagging effect.

Keywords: ferroresonance; impulsive lag; chaotic synchronization

铁磁谐振是一种复杂的非线性谐振现象, 其主要诱因是由于互感器铁芯的磁饱和效应导致铁芯电感非线性变化^[1-2]。当铁磁谐振事故发生时, 系统将产生稳定的、持续时间较长的谐振过电压。过电压

会使互感器的铁芯发生饱和导致电流急剧增大, 从而破坏相关设备绝缘使其温度升高, 最终导致设备损毁。

铁磁谐振等效混沌电路及其过电压所表现出的

收稿日期: 2014-01-21。 作者简介: 惠萌(1981—), 男, 博士, 讲师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41101357); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013G1321037, CHD2011JC170, CHD2011JC161, CHD2011TD018); 交通运输“十二五”重大科技专项资金项目(2011318812260)。

网络出版时间: 2014-04-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140425.0930.002.html>

混沌特性^[3-5]和抑制方法是目前该领域研究热点之一,多年来,众多学者对铁磁混沌电路的特性分析进行了卓有成效的研究。著名学者蔡少堂及 Brydant 对典型的 LC 铁磁谐振电路的分岔及动力学行为进行了深入探讨^[6-7],刘崇新教授对一个典型的三阶非自治铁磁混沌电路的混沌特性进行了理论分析并进行了实验验证^[8],LCR 铁磁混沌电路的分频谐振特性及磁滞、铁芯模型等参数变化对其混沌特性的影响近年来也被众多专家所关注^[9-11]。但是,关于铁磁谐振过电压的混沌抑制方法研究目前还比较少,Hamid 利用避雷器加入电路,根据混沌理论分析发现,加入避雷器后变压器铁磁谐振得到了抑制^[12],司马文霞等学者利用混沌同步及脉冲控制理论实现了对铁磁谐振过电压的抑制^[13],但是该方法设计的控制条件都为理想状态,并未考虑时滞因素的影响,而实际中从检测到铁磁谐振发生到加入抑制措施总会有时滞产生。

本文对文献[8]中典型的非自治铁磁混沌电路的铁芯非线性特性进行了改进,并在分析其非线性特性的基础上,考虑时滞因素对铁磁谐振抑制的影响,设计了一种基于混沌同步的铁磁谐振抑制方法。

1 非自治铁磁混沌电路模型动力学特性分析

本文研究的非自治铁磁混沌电路如图 1 所示。非线性电感 L_2 是一个含铁磁材料铁心的电感线圈,当线圈激励电流很大时铁芯很可能发生饱和。当铁芯磁通饱和时,流过 L_2 的电流 i_L 和 L_2 中的磁通关系为

$$i_L = a\phi + b\phi^n \quad (1)$$

式中: $a = 2.8 \times 10^{-3}$; $b = 7.2 \times 10^{-3}$; $n = 11$; ϕ 为 L_2 中磁通,其单位为标么值。图 1 所示系统状态方程为

$$\left. \begin{aligned} C \frac{du_c}{dt} &= i - i_L \\ \frac{d\phi}{dt} &= u_c \\ L_1 \frac{di}{dt} &= E_m \sin(\omega t) - u_c - Ri \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

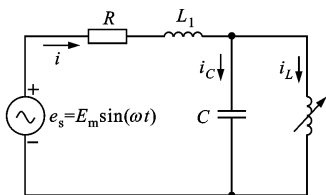


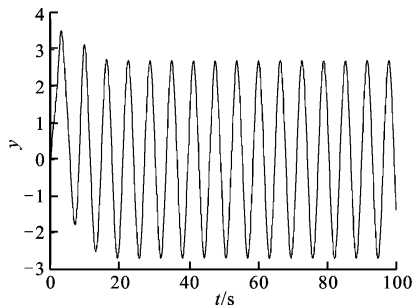
图 1 铁磁混沌电路

引入变量 $\tau = \omega t$, 令 $x = \frac{u_c}{\omega}$, $y = \phi$, $z = i$, $F = \frac{E_m \sin \tau}{L_1 \omega}$, $\alpha = \frac{1}{\omega^2 C}$, $\beta = \frac{R}{\omega L_1}$, $\zeta = \frac{1}{L_1}$, 则系统方程可被改写为

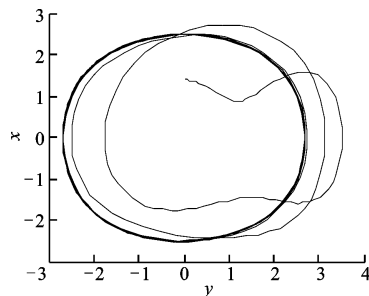
$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{d\tau} &= \alpha [z - (ay + by^n)] \\ \frac{dy}{d\tau} &= x \\ \frac{dz}{d\tau} &= F \sin(\tau) - \zeta x - \beta z \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

文中的仿真分析都以式(1)~式(3)为基础。

图 2 所示为系统正常工作时系统电压波形图和相平面轨迹图,从中可以看出,系统波形还是正弦波,其相平面轨迹为一闭合曲线。图 3 所示为系统发生铁磁谐振时系统电压波形及其相平面轨迹图。



(a) 电压波形

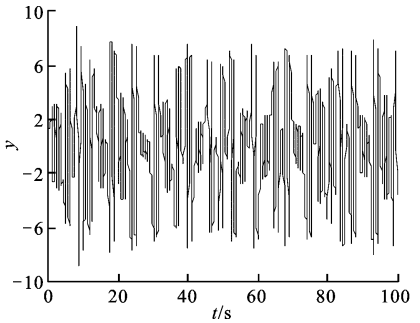


(b) 相平面轨迹

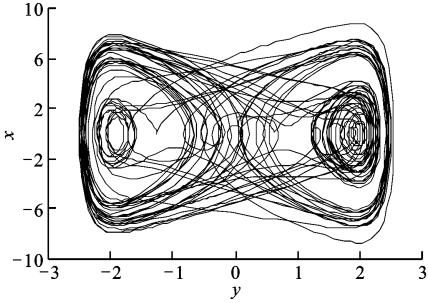
图 2 系统正常工作时的电压波形和相平面轨迹

由图 3 可以看出,此时系统电压已经发生了严重畸变,而且其相平面轨迹图已经变化为了双涡卷吸引子。计算谐振系统李雅谱诺夫指数 $\sigma_1 = 0.2508$, $\sigma_2 = -0.4374$, $\sigma_3 = -0.8134$,其最大李雅谱诺夫指数为正值,说明此时系统已经发生了混沌振荡。

本文应用脉冲微分方程理论和时滞反馈的思想,研究图 1 所示的典型铁磁谐振系统的脉冲时滞同步抑制方法,该方法能够快速有效地对铁磁谐振过电压产生抑制作用,使系统以最快的速度回复正常工作状态。



(a)电压波形



(b)相平面轨迹图

图 3 系统发生铁磁谐振时的电压波形和相平面轨迹

2 脉冲时滞同步设计

在如下的固定时刻脉冲微分系统中

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= f(t, x), \quad x \neq t_k \\ \Delta x &= P(t, x), \quad x = t_k \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

脉冲时刻满足 $t_1 < t_2 < t_3 < \dots < t_k < \dots, \lim_{k \rightarrow \infty} t_k = \infty$, $f, P: R_+ \times R^n \rightarrow R^n$ 在 $(t_{k-1}, t_k] \times R^n$ 上连续, 且 $f(t_k^+, x), P(t_k, x)$ 存在, 其中 $k=1, 2, \dots$ 。

为了简化计算, 引入下列函数类

$$U_0 = \{ \phi: R_+ \rightarrow R_+, \text{当 } s \geq 0 \text{ 时}, \phi(s) \geq 0, \phi(0) = 0 \}$$

$$U = \{ \phi \in U_0, \text{且不减} \}$$

$$J_0 = \{ \phi \in U_0, \text{当 } s > 0 \text{ 时}, \phi(s) > 0 \}$$

$$J = \{ \phi \in J_0, \text{且严格递增} \}$$

$$U_{\text{C}} = \{ \sigma: R_+ \times R^n \rightarrow R_+, \text{对于 } \forall u \in R_+, \sigma(u) \in U_{\text{C}}, \text{对于 } \forall t \in R_+, \sigma(t) \in J \}$$

$$S(h, \rho) = \{ x \in R^n; \|x\| < \rho \}$$

$V_0 = \{ V: R_+ \times R^n \rightarrow R_+, \text{在 } (t_{k-1}, t_k] \times R^n \text{ 上连续可微, 在 } t_k \text{ 处左连续, 关于 } x \text{ 满足局部 Lipschitz 条件, 对任意 } x \in R^n, V(t_k^+, x) \text{ 存在, 其中 } k=1, 2, \dots \}$ 。

定义 1 对 $\forall (t, x) \in (t_{k-1}, t_k] \times R^n, V(t, x)$ 关于系统的右上 Dini 导数为

$$D^+ V(t, x) =$$

$$\limsup_{\delta \rightarrow 0^+} \frac{1}{\delta} [V(t + \delta, x + \delta f(t, x)) - V(t, x)]$$

当 $V(t, x)$ 在定义域内连续时, 有 $D^+ V(t, x) = \dot{V}(t, x)$ 。

引理 1 (1) $V \in V_0$ 有 $\lim_{(t, y) \rightarrow (t_k^-, x)} V(t, y) = V(t_k^+, x)$,

且对 x 满足局部 Lipschitz 条件。对 $\forall x \in S(\rho)$, 当 $\rho > 0$ 时有 $D^+ V(t, x) \leq g(t, V(t, x)), t \neq t_k, g \in C[R_+ \times R_+, R)$ 。

(2) 存在 $\rho_0 > 0$, 使得当 $x \in S(\rho_0)$ 时, 有 $x + P_k(x) \in S(\rho_0)$; 且当 $t = t_k$ 时, 有 $V(t, x + P_k(x)) \leq \phi_k(V(t, x)), \phi_k \in U_{\text{C}}$ 。

(3) $V(t, x) \in R_+ \times R^n, \exists a, b \in J = \{ \theta \in C[R_+, R_+]; \theta(u) \in J \text{ 且 } u \rightarrow \infty \}$, 使 $b(\|x\|) \leq V(t, x) \leq a(\|x\|)$ 成立, 则系统(4)的稳定特性由以下系统的稳定特性决定

$$\left. \begin{aligned} \dot{u} &= g(t, u), t \neq t_k, u(t_0^+) = u_0 \geq 0 \\ u(t_k^+) &= \phi_k(u(t_k)), t = t_k, k = 1, 2, \dots \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

引理 2 假设引理 1 中, $g(t, u) = \lambda(t)u, \lambda \in C[R_+, R_+], \phi_k(u) = d_k u, d_k \geq 0$, 则当 $\lambda(t_{k+1} + \ln d_k) \leq \lambda(t_k), \epsilon > 1, \forall k \in N$, 系统(4)在原点是渐近稳定的。

对于非线性系统 $\mathbf{X}(t)$, 构造驱动系统

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \phi(\mathbf{X}(t)) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{A}$ 为系统 $\mathbf{X}(t)$ 的线性项系数矩阵; $\phi(\mathbf{X}(t))$ 为系统非线性项。引入具有时延的多步误差信号作为同步控制量, 设计响应系统如下

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{Y}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{Y}(t) + \phi(\mathbf{Y}(t)), \mathbf{Y}(t_0) = \mathbf{Y}_0, \\ t &\neq t_k, k = 1, 2, \dots \\ \Delta \mathbf{Y}(t_k) &= \sum_i \mathbf{B} \left[\mathbf{Y} \left(t_k - \frac{\tau_i}{N} \right) - \mathbf{X} \left(t_k - \frac{\tau_i}{N} - \Delta \tau \right) \right], \\ t &= t_k \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: $\Delta \tau < t_k - t_{k-1}; \frac{\tau}{N}$ 为积分步长; $i \geq 0$ 且 $\frac{\tau_i}{N} + \Delta \tau < t_k - t_{k-1}, N = 1, 2, \dots$ 。

令 $\mathbf{e}(t) = \mathbf{Y}(t) - \mathbf{X}(t - \Delta \tau)$ 为同步误差, 则

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}}(t) &= \dot{\mathbf{Y}}(t) - \dot{\mathbf{X}}(t - \Delta \tau) = \\ &= \mathbf{A}\mathbf{Y}(t) + \phi(\mathbf{Y}(t)) - \mathbf{A}\mathbf{X}(t - \Delta \tau) - \phi(\mathbf{X}(t - \Delta \tau)) = \\ &= \mathbf{A}\mathbf{e}(t) + \phi(\mathbf{X}(t - \Delta \tau) + \mathbf{e}(t)) - \phi(\mathbf{X}(t - \Delta \tau)), \\ t &\neq t_k, k = 1, 2, \dots \end{aligned}$$

令 $\phi(\mathbf{X}(t - \Delta \tau) + \mathbf{e}(t)) = \Phi_e, \phi(\mathbf{X}(t - \Delta \tau)) = \Phi_x$ 。设 $\phi(\mathbf{X})$ 满足局部 Lipschitz 条件, 即有

$$\|\Phi_e - \Phi_x\| \leq L \|\mathbf{e}(t)\|$$

$$L = \left\| \frac{\partial \phi(\mathbf{X})}{\partial \mathbf{X}} \right\|_{\infty}$$

定理 设 $\mathbf{B}$ 为 Hermitian 矩阵, d 为 $(\mathbf{I} + \mathbf{N}\mathbf{B})(\mathbf{I} + \mathbf{N}\mathbf{B}^T)$ 的最大特征值, $(\mathbf{I} + \mathbf{N}\mathbf{B})$ 的谱半径 $\rho(\mathbf{I} + \mathbf{N}\mathbf{B})$

$\leq \mathbf{I}, r$ 为 $\mathbf{A} + \mathbf{A}^T$ 的最大特征值, $\{t_k\}$ 为间隔 τ 的等差时间序列, $\Delta\tau < \tau$, 则当 $0 \leq r + 2L \leq \frac{-\ln(\epsilon d)}{\tau}, \epsilon > 1$ 时成立, 驱动系统(6)和 $\Delta\tau$ 时刻后的响应系统(7)实现时滞同步。

证明: 令 $V(t, \mathbf{e}) = \mathbf{e}^T \mathbf{e}$, 当 $t \neq t_k$ 时, 有

$$\begin{aligned} D^+ V(t, \mathbf{e}) &= \mathbf{e}^T \mathbf{A} \mathbf{e} + \mathbf{e}^T (\Phi_e - \Phi_x) \mathbf{e} + \mathbf{e}^T \mathbf{A}^T \mathbf{e} + \\ &\mathbf{e}^T (\Phi_e - \Phi_x)^T \mathbf{e} \leq r \mathbf{e}^T \mathbf{e} + 2L \|\mathbf{e}\|^2 = \\ &(r + 2L)V(t, \mathbf{e}) \end{aligned}$$

令 $g(t, u) = (r + 2L)u$, 则引理 1 的条件成立。

当 $t = t_k$ 时, $(\mathbf{I} + \mathbf{N}\mathbf{B})$ 为 Hermitian 矩阵。令

$$\|\mathbf{e}(t - i)\| = K_i \|\mathbf{e}(t)\|, \text{ 并且 } \mathbf{B} = \max_{0 \leq i \leq N-1} (\mathbf{B}_i K_i).$$

$\forall \rho_0 > 0$ 和 $\mathbf{e} \in S(\rho_0)$, 有

$$\left\| \mathbf{e}(t) + \sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{B}_i \mathbf{e}(t - i) \right\| \leq \left\| \mathbf{I} + \sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{B}_i K_i \right\| \cdot$$

$$\|\mathbf{e}(t)\| \leq \|\mathbf{I} + \mathbf{N}\mathbf{B}\| \cdot \|\mathbf{e}(t)\| \leq \|\mathbf{e}(t)\|$$

故 $\mathbf{e} + \Delta\mathbf{Y}(t_k) \in S(\rho_0)$, 于是可得

$$\begin{aligned} V(t_k, \mathbf{e} + \Delta\mathbf{Y}(\mathbf{e}_k)) &= \\ \mathbf{e}^T (\mathbf{I} + \mathbf{N}\mathbf{B}^T) (\mathbf{I} + \mathbf{N}\mathbf{B}) \mathbf{e} &\leq dV(t_k, \mathbf{e}) \end{aligned}$$

因而引理 1 条件(2)满足。由混沌系统特性可知引理 1 条件(3)也满足, 由引理 1 条件(3)和引理 2 可知, 当 $\epsilon > 1$ 且 $0 \leq r + 2L \leq \frac{-\ln(\epsilon d)}{\tau}$ 时, 系统(6)和(7)实现同步。

3 脉冲时滞同步实验

在仿真实验中, 系统(3)中系数 $\alpha = 1, \zeta = 1, \beta = 2.5$, 可得

$$\mathbf{A} + \mathbf{A}^T = \begin{bmatrix} 0 & 0.9972 & -1.5000 \\ 0.9972 & 0 & 0 \\ -1.5000 & 0 & -2.0000 \end{bmatrix}$$

于是 $r = 1.3836$, 系统处于混沌状态时 $\max(y) = 2.5$, 则 $L = 755.3101$ 。取 $\mathbf{B} = \text{diag}[-0.18 \quad -0.18 \quad -0.18]$, $N = 5$, 计算出 $d = 0.01$ 。

当 $\epsilon = 1.3$ 时, $\tau_{\max} = 0.0029$ 。在本实验中 $\tau = 0.0025$, 积分步长为 0.0005 , $\Delta\tau = 0.001$, 因此在 $t = t_k$ 时, 系统(3)的响应系统为

$$\begin{aligned} \Delta\mathbf{Y}(t_k) &= \sum_{i=0}^4 \mathbf{B}[\mathbf{Y}(t_k - 0.0005i) - \\ &\mathbf{X}(t_k - 0.0005i - 0.001)], t = t_k \end{aligned}$$

仿真系统如图 4 所示, 同步仿真结果如图 5~图 7 所示。图 5 为驱动系统和响应系统无间隔误差曲线, 图 6 所示为驱动系统和响应系统间隔 0.001 s 的误差曲线图。通过对比可以发现, 如果不考虑时

滞因素加入脉冲控制, 系统达到同步状态所需时间约为 1.5 s , 加入时滞后脉冲同步所需时间约为 1.0 s , 该方法能够有效缩短同步所需时间。图 7 所示为系统出现铁磁谐振过电压后, 在第 10 s 左右加入时滞脉冲控制后系统 L_2 两端电压波形图。从仿真图可以看出, 加入抑制措施以后能够快速有效地抑制铁磁谐振过电压的产生及幅值。

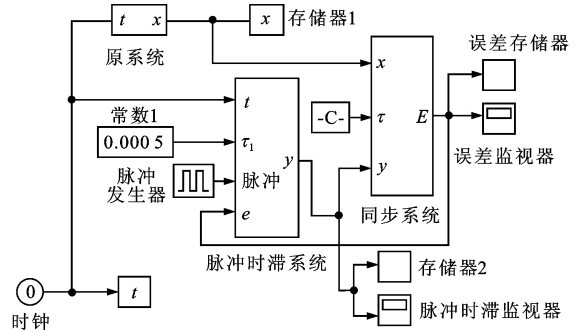


图4 系统仿真模型

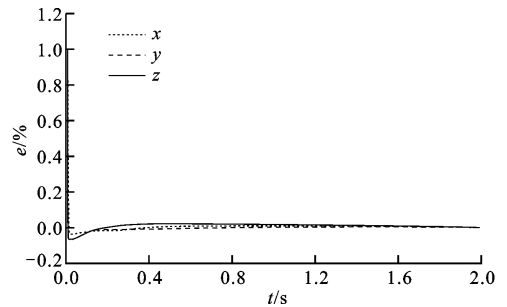


图5 驱动-响应系统无间隔误差变化曲线

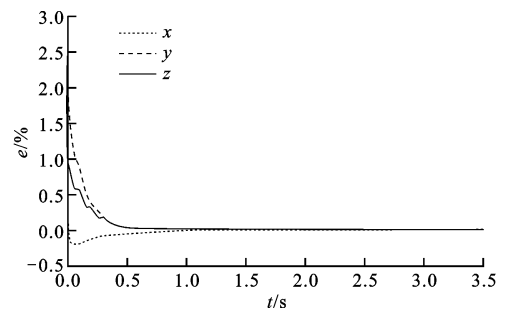


图6 驱动-响应系统间隔为 0.001 s 时误差变化曲线

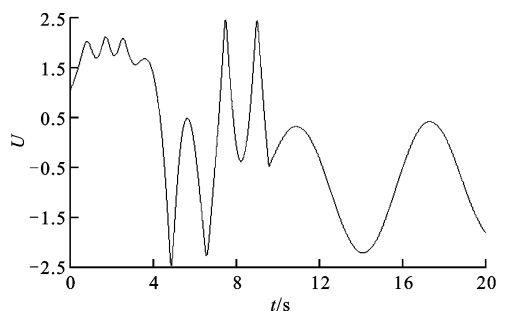


图7 系统加入时滞脉冲控制后的电压波形图

4 结 论

铁磁谐振是电力系统中一种常见的过电压事故,本文考虑到从过电压的检测到消谐措施的加入具有一定延迟,提出了一种时滞脉冲同步的抑制铁磁谐振过电压的方法。通过理论分析及仿真结果可以看出,与不考虑时滞的脉冲同步方法相比,本文方法能够加快系统的同步速度,有效抑制铁磁谐振过电压。本文方法的提出为电力系统过电压的抑制提出了新的思路。

参考文献:

- [1] 李云阁. 中性点直接接地系统中基波铁磁谐振过及抑制措施研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2004.
- [2] 宁家庆. 电力系统非线性共振之研究 [D]. 台湾: 中山大学, 2003.
- [3] LI Yunge, SHI Wei, LI Furong. Novel analytical solution to fundamental ferroresonance: part I power frequency excitation characteristic [J]. IEEE Trans Power Delivery, 2006, 21(2): 788-793.
- [4] 王亮, 施围, 沙玉洲, 等. 电压互感器三相励磁特性对铁磁谐振的影响 [J]. 继电器, 2005, 33(2): 35-38, 42.
WANG Liang, SHI Wei, SHA Yuzhou, et al. Influence of three phases excitation characteristics of PT on ferroresonance [J]. Relay, 2005, 33(2): 35-38, 42.
- [5] 戴武昌, 王彬, 袁天刚, 等. 基于粒子群算法铁磁谐振的检测研究 [J]. 电测与仪表, 2010(8): 8-11.
DAI Wuchang, WANG Bin, YUAN Tiangang, et al. Detection of ferroresonance based on particle swarm optimization [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010(8): 8-11.
- [6] CHUA L O, HASLER M. Dynamics of a piecewise-linear resonant circuit [J]. IEEE Trans CAS, 1982, 29(8): 535-547.
- [7] BRYANT P, JEFFRIES C. Bifurcation of a forced magnetic oscillator near points of resonance [J]. Phys, Rev Lett, 1984, 53(3): 250-253.
- [8] 刘崇新, 金黎, 邵红卫. 三阶非自治铁磁混沌电路的分析及控制 [J]. 电路与系统学报, 2003, 8(2): 100-103.
LIU Chongxin, JIN Li, SHAO Hongwei. Control and analysis of three-order non autonomous ferroresonance chaotic circuit [J]. Journal of Circuits and Systems, 2003, 8(2): 100-103.
- [9] LAMBA H, GRINFELD M, MCKEE S, et al. Sub-harmonic ferroresonance in an LCR circuit with hyster-

esis [J]. IEEE Trans Magnetics, 1997, 33(4): 2495-2500.

- [10] BARBISION E, BOTTAUSCIO O, CHIAMPI M, et al. Parameters affecting ferroresonance in LCR electric circuits [J]. IEEE Trans Power Delivery, 2008, 44(6): 870-873.
- [11] MILICEVIC K, EMIN Z. Initiation of characteristic ferroresonance states based on flux reflection model [J]. IEEE Transactions on Circuits And Systems: II Express Briefs, 2013, 60(1): 51-55.
- [12] RADMANESH H, GHAREHPETIAN G B. Ferroresonance suppression in power transformers using chaos theory [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2013, 45: 1-9.
- [13] 司马文霞, 郑哲人, 杨庆, 等. 用参数不匹配混沌系统的脉冲同步方法抑制铁磁谐振过电压 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 218-225, 251.
SIMA Wenxia, ZHENG Zheren, YANG Qing, et al. Suppressing the ferroresonance overvoltage by impulsive synchronization of chaotic systems with parameter mismatched [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 218-225, 251.

[本刊相关文献链接]

- 赵立波, 徐龙起, 热合曼艾比布力, 等. 矩形微悬臂梁的流固耦合谐振频率分析 [J]. 2013, 47(11): 60-64. [doi: 10.7652/xjtuxb201311011]
- 任重, 董明, 任明, 等. 冲击电压下 SF₆ 气体在极不均匀场中局部放电的时频特征 [J]. 2013, 47(8): 115-120. [doi: 10.7652/xjtuxb201308020]
- 王恒利, 付立军, 揭贵生, 等. 采用比例谐振和状态反馈的三相逆变器最优控制 [J]. 2013, 47(8): 127-132. [doi: 10.7652/xjtuxb201308022]
- 赵煦, 孟永鹏, 成永红, 等. 变压器现场超高频局部放电信号的时域特征分析 [J]. 2011, 45(12): 82-86. [doi: 10.7652/xjtuxb201112015]
- 马扬洲, 徐友龙, 肖芳, 等. 影响脉冲电流法制备 MnO₂ 超级电容器电极性能的因素 [J]. 2011, 45(9): 114-118. [doi: 10.7652/xjtuxb201109021]
- 汪伟, 汲胜昌, 李彦明. 用非线性电阻模拟变压器损耗进行铁磁谐振过电压研究 [J]. 2009, 43(10): 109-113. [doi: 10.7652/xjtuxb200910023]
- 宁改娣, 何世杰, 王跃, 等. 静止同步串联补偿器抑制次同步谐振研究 [J]. 2008, 42(2): 189-193. [doi: 10.7652/xjtuxb200802014]
- 贾磊, 张桂红, 舒亮, 等. 计算输电线路绕击跳闸率的新模型 [J]. 2007, 41(2): 223-227. [doi: 10.7652/xjtuxb200702021]

(编辑 杜秀杰)