

110 kV 变电站铁磁谐振混沌现象的追踪控制与同步

何波, 康积涛, 张花芝, 刘伟波

(西南交通大学电气工程学院, 四川成都 610031)

摘要: 基于系统稳定性理论的基础上, 采用追踪控制与广义投影同步方法设计非线性反馈控制器。对 110 kV 变电站时常发生的铁磁谐振过电压混沌现象进行抑制。研究结果表明, 该方法能够较快地实现同结构或异结构系统之间的混沌控制与同步。

关键词: 铁磁谐振; 混沌; 追踪控制; 广义投影同步

Abstract: Based on the theory of system stability, a nonlinear feedback controller is designed using the method of tracking control and generalized projective synchronization. The controller can control the chaotic phenomena of ferro-resonance overvoltage which often occurs in 110 kV substations. The research results show that the proposed method can achieve the chaos control and synchronization in the same structure or different structure quickly.

Key words: ferro-resonance; chaos; tracking control; generalized projective synchronization

中图分类号: TM864 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)01-0073-04

0 引言

在 110 kV 变电站中, 会时常发生由电压互感器引起的铁磁谐振过电压^[1-2]。系统在适当的参数下会激发混沌现象, 电压幅值升高, 严重时破坏系统绝缘, 使电网的安全运行和人身安全受到威胁, 因此抑制铁磁谐振混沌现象是一个迫切需要解决的问题。近年来, 国内外的专家和学者利用非线性动力学理论^[3-4]和混沌抑制与同步方法来研究铁磁谐振过电压的混沌现象。在铁磁谐振过电压混沌抑制方面, 国内外专家和学者提出了一系列抑制措施和方法。其中文献[5]采用 T-S 模糊方法设计的非线性控制器对铁磁谐振混沌现象进行抑制, 但方法较为复杂; 文献[6]提出了利用常值脉冲方法来抑制混沌现象, 控制能耗大, 不能任意选择控制目标; 文献[7]提出了利用反馈脉冲法来实现参数不匹配系统之间的混沌同步, 该方法只能实现同结构系统之间的同步, 而不能实现异结构系统之间的同步。于是, 在基于系统稳定性理论的基础上, 采用混沌控制和广义投影同步方法, 设计了合适的非线性反馈控制器, 能够实现异结构或同结构系统之间的追踪控制与同步。数值仿真表明该方法对铁磁谐振混沌现象具有较好的抑制效果, 能够快速、准确地达到控制目标, 实现混沌同步。

1 铁磁谐振过电压的混沌现象

1.1 铁磁谐振的数学模型

某 110 kV 变电站铁磁谐振过电压的单相简化电路图如图 1。 C_B 表示断路器的均压电容, C 表示 C_B 与系统母线及其他设备的对地电容之和, L 表示母线电压互感器的励磁电感, R 表示母线电压互感器的铁心损耗的等值电阻, E 为电源相电压的有效值, ω 为角频率^[7]。

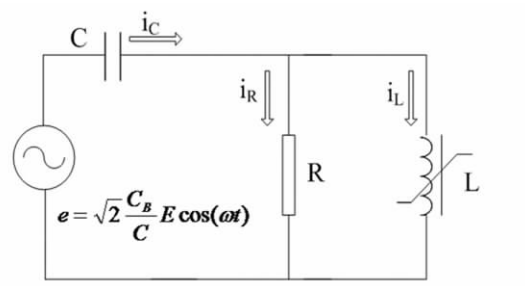


图 1 铁磁谐振过电压单相简化电路图

计算中, 电压互感器的磁化特性曲线可表示为^[8]

$$i_L = f(\psi) = a\psi + b\psi^7 \quad (1)$$

其中 $a = 3.42$, $b = 0.41$ 。根据基尔霍夫定律可得到如下非线性方程组^[7]。

$$\begin{cases} \dot{\psi} = u \\ \dot{u} = -qu - \frac{(a\psi + b\psi^7)}{C} + p\cos(\omega t) \end{cases} \quad (2)$$

其中 $p = \sqrt{2}C_B\omega E/C$ $q = 1/RC$ 。

1.2 铁磁谐振的混沌分析

为了表达方便,令 $x_1 = \psi$ $x_2 = u$ 。把式(2)中所有参数转换为标么值,非线性方程组可表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_1x_2 \\ \dot{x}_2 = b_1x_1 + c_1x_2 + d_1x_1^7 + g_1\cos(\omega t) \end{cases} \quad (3)$$

当参数 $a_1 = 314.16$ $b_1 = -6.41$ $c_1 = -0.31$ $d_1 = -0.75$ $g_1 = 345.58$ 时,系统将出现混沌现象^[9]。其电压波形及相平面图如图2、图3。所有的参数均为标么值,并将式(3)所表示的混沌系统称为系统(1)。

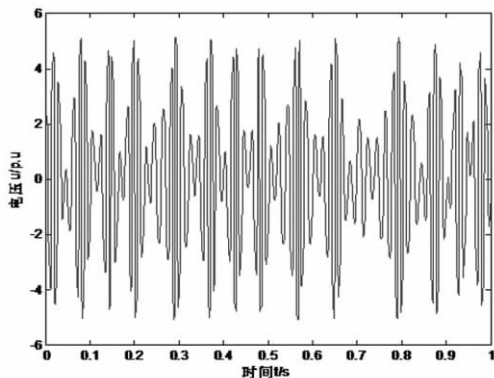


图2 系统(1)的时域电压波形

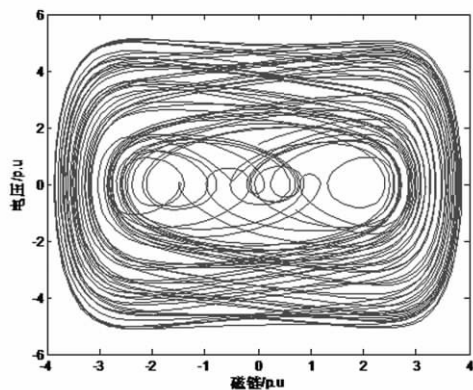


图3 系统(1)的相平面图

2 铁磁谐振混沌追踪控制与广义投影同步

2.1 理论分析

非线性混沌系统^[10,11]为

$$\begin{cases} \dot{x} = f(t, x) + U(t, x, y) \\ \dot{y} = g(t, y) \end{cases} \quad (4)$$

式中 $x, y \in R^n$; f, g 是 $R \times R^n \rightarrow R^n$ 的可微函数。式(4)中的第一式是响应系统,第二式是驱动系统, $U(t, x, y)$ 是控制器输入。令 $e(t) = x(t) - y(t)$, 只要误差系统满足

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|e(t)\| = \lim_{t \rightarrow \infty} \|x(t) - y(t)\| = 0 \quad (5)$$

即设计的非线性反馈控制器就能使响应系统 $x(t)$ 对驱动系统 $y(t)$ 的信号进行追踪,从而实现了响应系统的混沌控制与广义投影同步。

2.2 控制器设计分析

假设驱动系统信号为 $[y_1 \ y_2]$, 控制器 u 为 $[u_1 \ u_2]$, 故响应系统加入控制器可表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_1x_2 + u_1 \\ \dot{x}_2 = b_1x_1 + c_1x_2 + d_1x_1^7 + g_1\cos(\omega t) + u_2 \end{cases} \quad (6)$$

不论驱动系统的形式,均设计如下统一形式的非线性反馈控制器 u 。

$$\begin{cases} u_1 = V_1(t) + \dot{y}_1 - a_1y_2 \\ u_2 = V_2(t) + y_2 - b_1y_1 - c_1y_2 - d_1y_1^7 - g_1\cos(\omega t) \end{cases} \quad (7)$$

设追踪误差为 $e_1 = x_1 - y_1$ $e_2 = x_2 - y_2$, 将式(6)代入式(5)中可得到同步误差系统为

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1(t) \\ V_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & a_1 \\ b_1 & c_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

这里的 $V_1(t)$ 、 $V_2(t)$ 是关于误差变量 e_1 、 e_2 函数的控制输入信号,即

$$\begin{bmatrix} V_1(t) \\ V_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 & v_2 \\ v_3 & v_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)可得

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 & v_2 + a_1 \\ v_3 + b_1 & v_4 + c_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

由式(10)可知,零解是误差系统的平衡点,只要矩阵 A 的特征值为负,就能满足式(5),即设计的控制器就能使响应系统与驱动系统同步。这里的驱动系统应该是可微的,而且是有界的。采用这种混沌追踪控制与广义投影同步的方法,就能够实现与响应系统同结构或异结构系统之间的同步,从而达到抑制混沌的目的。

3 数值仿真

3.1 同结构系统之间的追踪控制与同步

将式(11)所表示的系统作为驱动系统,称为系统(2)。可知,系统(2)与系统(1)具有相同数学模型,称为同结构系统。当参数取 $a_2 = 314.16$, $b_2 = -637.67$, $c_2 = -31.42$, $d_2 = -78.54$, $g_2 = 345.58$ 时,系统运行在正常的工作状态,其时域图、相平面图如图4、图5,电压稳定时的标幺值为1,可作为驱动系统,来抑制混沌现象,将系统(1)的电压限制在合理的工作范围内。

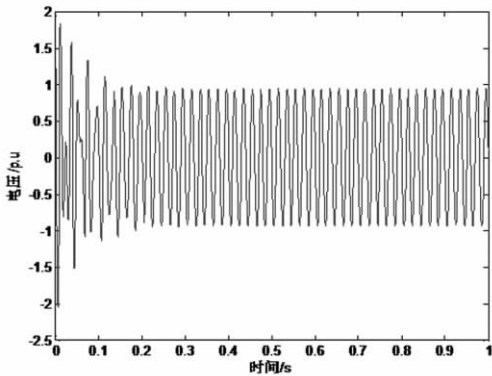


图4 系统(2)的时域电压波形

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = a_2 z_2 \\ \dot{z}_2 = b_2 z_1 + c_2 z_2 + d_2 z_1^7 + g_2 \cos(\omega t) \end{cases} \quad (11)$$

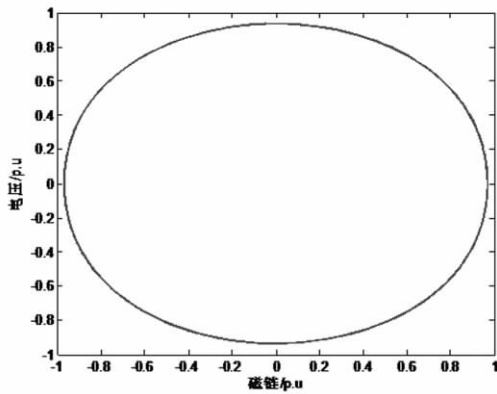


图5 系统(2)的相平面图

取驱动系统信号 $[y_1, y_2] = [z_1, z_2]$, 当 $\begin{bmatrix} V_1(t) \\ V_2(t) \end{bmatrix} =$

$$\begin{bmatrix} -20 & -a_1 \\ -b_1 & -20 - c_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}$$

时,系统(1)运行到0.2s时切入控制器,其波形及相平面图如图7、图8。可见,在切入控制器后,系统(1)的电压幅值迅速降低,在0.5s时就与系统(2)实现了完全同步,抑制混沌速度快,当系统发生铁磁谐振过电压时,该控制器能有效地抑制过电压,确保系统安全运行。

3.2 异结构系统之间的追踪控制与同步

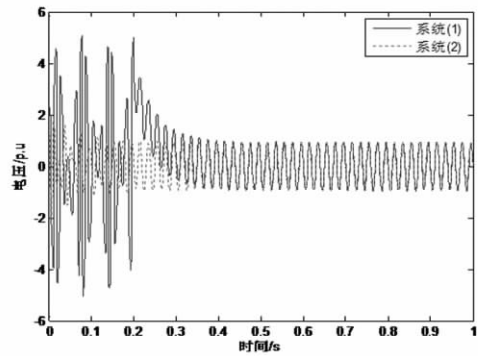


图6 混沌抑制的时域电压波形(同结构)

在铁磁谐振过电压的混沌抑制中,通常希望把混沌控制在可控的周期轨道上。故取驱动系统为 $[y_1, y_2] = [\sin(\omega t), \cos(\omega t)]$ 驱动系统 $[y_1, y_2]$ 与响应系统互为异结构系统。当 $\begin{bmatrix} V_1(t) \\ V_2(t) \end{bmatrix} =$

$$\begin{bmatrix} -15 & -a_1 \\ -b_1 & -15 - c_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}$$

时,系统(1)运行到0.2s时切入控制器 u ,其时域波形和相平面图如图9、图10。可知,所设计的非线性反馈控制器能够较快地实现异结构系统之间的追踪控制与同步,能够将铁磁谐振的混沌现象控制到稳定的周期轨道上。

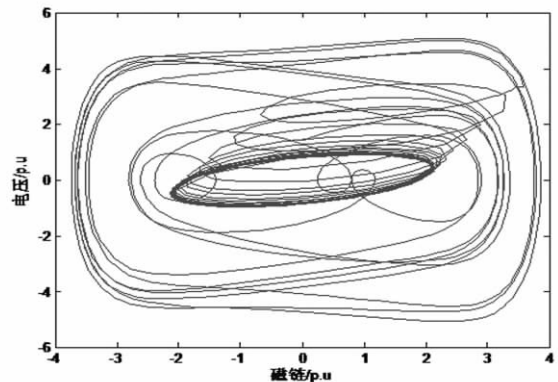


图7 混沌抑制的相平面图(同结构)

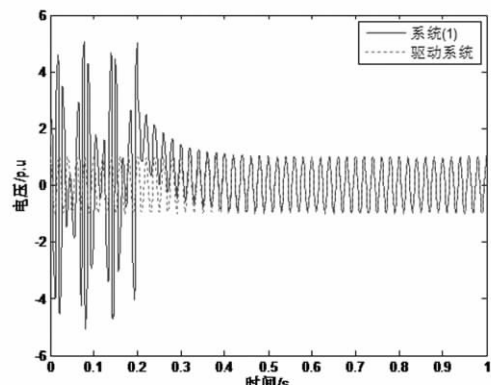


图8 混沌抑制的时域电压波形(异结构)

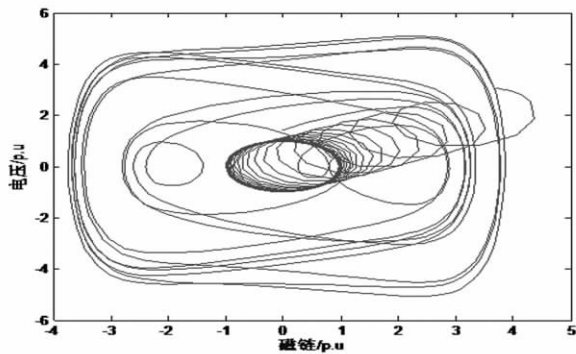


图9 混沌抑制的相平面图(异结构)

4 结 论

在基于系统稳定性理论的基础上,采用追踪控制与广义投影同步方法,设计合适的非线性反馈控制器,能够有效地实现同结构或异结构系统之间的混沌抑制与同步。数值仿真结果表明:该方法能够有效地实现铁磁谐振过电压混沌现象的抑制与同步。所设计的方法简单,易于实现,对抑制 110 kV 变电站时常发生的铁磁谐振过电压混沌现象具有一定的工程参考价值。

参考文献

[1] 贾红琴. 电磁式 PT 所致铁磁谐振过电压分析及抑制 [J]. 高电压技术 2000 26(1): 69 - 70.

[2] 李云阁, 施围. 母线间电容对铁磁谐振的影响 [J]. 高压电器 2004 40(2): 112 - 114.

[3] Z. Emin, B. A. T. Al Zahawi, D. W. Auckland, et al. Ferroresonance in Electromagnetic Voltage Transformers: A Study Based on Nonlinear Dynamics [J]. IEE Proceedings Online, 1997, 144(4): 383 - 387.

[4] Jacobson D. A. N. Examples of Ferroresonance in a High Voltage Power System [C]. Power Engineer Society General Meeting, Toronto, Canada, 2003: 1206 - 1212.

[5] 代姚, 司马文霞, 孙才新, 等. 应用 T - S 模糊方法对铁磁谐振过电压的混沌抑制 [J]. 高电压技术 2010 36(4): 878 - 883.

[6] 刘凡, 司马文霞, 孙才新, 等. 基于常值脉冲法的铁磁谐振过电压混沌抑制 [J]. 电网技术 2006 30(3): 57 - 51.

[7] 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.

[8] 徐勇. 电压互感器 V - I 特性对谐振影响的物理仿真 [J]. 高电压技术 1997 23(4): 61 - 64.

[9] 张博, 鲁铁成, 杜晓磊. 中性点接地系统铁磁谐振非线性动力学分析 [J]. 高电压技术 2007 33(1): 31 - 35.

[10] 蔡国梁, 黄娟娟. 超混沌 Chen 系统和超混沌 R_össler 系统的异结构同步 [J]. 物理学报 2006 55(8): 3997 - 4004.

[11] 闵富红, 王执铨. 复杂 Dynamos 混沌系统的追踪控制与同步 [J]. 物理学报 2008 57(1): 31 - 36.

[12] 贺仁睦, 周文. 电力系统负荷模型的分类与综合 [J]. 电力系统自动化 1999 23(19): 12 - 16.

[13] Mural Fabrioglu, Fernando L. Alvarado. Designing Cost Effective Demand Management Contracts Using Game Theory [C]. IEEE PES Winter Meeting, New York, January 1999.

[14] Mural Fabrioglu, Fernando L. Alvarado. Using Utility Information to Calibrate Customer Demand Management Behavior Models [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2001 16(2): 317 - 322.

[5] 林海雪, 周胜军. 电气化铁路的谐波标准问题 [J]. 中国电力 1999(9): 55 - 58.

[6] 刘遵义, 杨红旗. 电气化铁路对河南电网电能质量的影响(讲义) [R].

[7] 刘付平, 阮联生. 负序电流对电力系统的危害(讲义) [R].

[8] 吴竞昌主编. 供电系统谐波 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

[9] 铁道部第二勘测设计院. 牵引供电系统 [R].

[10] 林舜江, 李欣然, 刘杨华, 等. 电力负荷特性分类方法研究 [J]. 电力系统自动化 2005(22): 33 - 38.

[11] 鞠平, 金艳, 吴峰, 等. 综合负荷特性的分类综合方法

及其应用 [J]. 电力系统自动化 2004 28(1): 64 - 68.

[12] 贺仁睦, 周文. 电力系统负荷模型的分类与综合 [J]. 电力系统自动化 1999 23(19): 12 - 16.

[13] Mural Fabrioglu, Fernando L. Alvarado. Designing Cost Effective Demand Management Contracts Using Game Theory [C]. IEEE PES Winter Meeting, New York, January 1999.

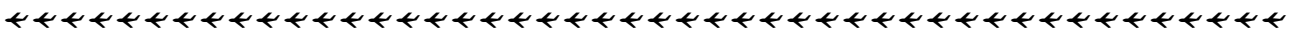
[14] Mural Fabrioglu, Fernando L. Alvarado. Using Utility Information to Calibrate Customer Demand Management Behavior Models [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2001 16(2): 317 - 322.

作者简介:

何波 (1987) 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统过电压;

康积涛 (1962) 男, 教授, 研究方向为电力调度自动化系统、电力系统无功优化、电压稳定性、嵌入式测控装置和工业监控组态软件的研究。

(收稿日期: 2012 - 10 - 10)



(上接第 36 页)

[5] 林海雪, 周胜军. 电气化铁路的谐波标准问题 [J]. 中国电力 1999(9): 55 - 58.

[6] 刘遵义, 杨红旗. 电气化铁路对河南电网电能质量的影响(讲义) [R].

[7] 刘付平, 阮联生. 负序电流对电力系统的危害(讲义) [R].

[8] 吴竞昌主编. 供电系统谐波 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

[9] 铁道部第二勘测设计院. 牵引供电系统 [R].

[10] 林舜江, 李欣然, 刘杨华, 等. 电力负荷特性分类方法研究 [J]. 电力系统自动化 2005(22): 33 - 38.

[11] 鞠平, 金艳, 吴峰, 等. 综合负荷特性的分类综合方法

及其应用 [J]. 电力系统自动化 2004 28(1): 64 - 68.

[12] 贺仁睦, 周文. 电力系统负荷模型的分类与综合 [J]. 电力系统自动化 1999 23(19): 12 - 16.

[13] Mural Fabrioglu, Fernando L. Alvarado. Designing Cost Effective Demand Management Contracts Using Game Theory [C]. IEEE PES Winter Meeting, New York, January 1999.

[14] Mural Fabrioglu, Fernando L. Alvarado. Using Utility Information to Calibrate Customer Demand Management Behavior Models [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2001 16(2): 317 - 322.

(收稿日期: 2012 - 09 - 25)