

Fuzzy 理论在电力系统铁磁谐振研究中的应用

肖伟平,秦祖泽,龙卫华

(湖南工程学院,湖南 湘潭 411101)

摘要: 根据电力系统铁磁谐振的模糊性,应用 Fuzzy 理论对电力系统发生铁磁谐振的可能性、影响因素及防止措施进行了研究。这种新方法对补充和完善铁磁谐振问题的研究具有重要的意义。

关键词: 电力系统; 模糊性; 铁磁谐振

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2003)02-0034-02

1 引言

电力系统铁磁谐振是由铁芯电感元件的非线性引起的一种异常现象,它严重威胁着电网的安全运行,因而铁磁谐振问题一直成为人们关注的研究课题之一。国内外研究铁磁谐振问题的主要方法有:谐波平衡法、描述函数法、Galerkin 方法、Adams 预测—校正法等。由于系统铁磁元件的非线性、接线的复杂性和故障、操作形式的多样性而导致的铁磁谐振现象,性质十分复杂。理论与试验研究表明此类谐振现象都具有一定的随机性和模糊性,因此用模糊理论(Fuzzy 理论)来探讨铁磁谐振问题是可行的。

2 电力系统铁磁谐振的模糊性

铁磁谐振产生的机理、影响因素及谐振表现形式等均具有一定的模糊性,主要表现在以下几个方面:

(1) 磁化特性 $-i$ 关系的模糊性

铁芯电感的非线性关系,难以用精确的数学表达式描述,具有模糊变化的性质,且在近似计算中,磁化特性 $-i$ 关系是通过其有效值 $U-I$ 特性的转化来确定的,这种转化有一定的误差,也带有模糊性^[1]。

(2) 产生谐振机理的模糊性

铁磁谐振回路为工频电源时,系统可以出现基波谐振、分次谐波谐振和高次谐波谐振,这表明铁磁谐振回路具有“变频功能”,这是一种模糊性现象。

(3) 扰动因素的模糊性

电网中的扰动(合闸、发生故障及故障消除等)是激发铁磁谐振的外在条件。扰动的强弱是模糊的,它受多种因素的影响,主要有电源电势 e 、合闸相位、铁芯电感磁化特性 $-i$ 、系统电路参数 R 、

C 等。若以模拟变量表示扰动量,则可表示为

$$= f(e, \dots, -i, C, R) \quad (1)$$

(4) 影响因素及表现形式的模糊性

由于 $-i$ 的非线性,使参数变化规律对谐振性质的影响具有随机性,难以用精确数学表达式来描述。铁磁谐振发生时谐振回路怎样,谐振性质如何?都带有模糊性。

(5) 谐振起谐、脱谐临界值的模糊性。

谐振起谐、脱谐临界电阻和临界电容不是一个确定的值,而是一个模糊范围。在模糊范围内可以激发基波谐振、分频谐振和高次谐波谐振^[2]。

3 Fuzzy 理论的应用

3.1 谐振可能性分布矩阵

设整个电力系统由 $m \times n$ 个子系统组成,每个子系统发生铁磁谐振的可能性用模糊变量 $x_{11}, x_{12}, \dots, x_{mm}$ 来表示,则模糊变量矩阵为

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{m1} & X_{m2} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

如果隶属函数为 $\mu(x)$,取值区间为 $[0, 1]$,则整个系统发生铁磁谐振的可能性分布为

$$\mu(X) = \begin{bmatrix} \mu(X_{11}) & \mu(X_{12}) & \dots & \mu(X_{1n}) \\ \mu(X_{21}) & \mu(X_{22}) & \dots & \mu(X_{2n}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu(X_{m1}) & \mu(X_{m2}) & \dots & \mu(X_{mn}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

矩阵内元素取值范围为 $[0, 1]$,若发生谐振可能性大,则对应于接近于 1 的值;可能性极小,对应于趋向 0;必然发生,其值取 1;不可能发生,其值为 0。

3.2 $\mu(x)$ 与影响因素的模糊分布

理论研究、运行经验和模拟试验表明,铁磁谐振

发生的可能性与 R 、 X_C/X_L 、 e 、有关,可表示为

$$\mu(X) = f(R, X_C/X_L, e,) \quad (4)$$

式中: R 为谐振电路等效损耗电阻,由于铁芯线圈存在磁滞和涡流损耗, R 是非线性的。 X_L 为谐振回路感抗,由于 ω 非线性, X_L 具有模糊性。 X_C 为谐振回路等效容抗,它由线路对地分布电容及高压设备等杂散电容确定。用 Fuzzy 理论分析铁磁谐振问题时,上述参数均可看作模糊变量。

3.2.1 $\mu(x)$ 与 R 的关系

假设 X_C/X_L 、 e 、为定值,分别以 X_{C0}/X_{L0} 、 e_0 、 e_0 表示,于是可单独考虑 $\mu(x)$ 随 R 的模糊分布,并可用戒上型分布来近似描述^[3]。

$$\mu(R) = \begin{cases} \frac{1}{1 + [a(R - R_r)]^b} & (R > R_r) \\ 1 & (R < R_r) \end{cases} \quad (5)$$

式中: R_r 为临界电阻, a 、 b 为与 X_{C0}/X_{L0} 、 e_0 、 e_0 有关的正常数。

3.2.2 $\mu(x)$ 与 X_C/X_L 的关系

由 H. A. Peterson 模拟试验结果,当 R 、 e 、为定值 R_0 、 e_0 、 e_0 时, $\mu(x)$ 与 X_C/X_L 的模糊分布可近似用分段函数来描述:

$$\mu(X_C/X_L) = \begin{cases} 0 & (X_C/X_L > 0.01) \\ 1 & (0.01 < X_C/X_L < 10) \\ 0 & (X_C/X_L < 10) \end{cases} \quad (6)$$

3.2.3 $\mu(x)$ 与 e 的关系

当 $e = E_m \sin(\omega t + \phi)$ 时,据图解法对谐振电路的分析可知, E_m 值越高,发生谐振的可能性愈大, $\mu(x)$ 取值愈大,否则 $\mu(x)$ 取值愈小。 $\mu(x)$ 随 e 的模糊分布可近似用戒下型分布描述。

$$\mu(E_m) = \begin{cases} 0 & (E_m < E_{mr}) \\ \frac{1}{1 + [a(E_m - E_{mr})]^b} & (E_m > E_{mr}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: E_{mr} 是谐振临界电源电压幅值。

3.2.4 $\mu(x)$ 与 Δu 的关系

$\mu(x)$ 与系统的冲击扰动强度 Δu 密切相关,扰动愈强,发生谐振概率愈大, $\mu(x)$ 值愈大。 $\mu(x)$ 与的模糊关系可用升半正态型分布近似描述

$$\mu(\Delta u) = \begin{cases} 0 & (\Delta u < r) \\ 1 - e^{-k(\Delta u - r)^2} & (\Delta u > r) \end{cases} \quad (8)$$

式中: r 为激发谐振所需的最小扰动量, k 为正常数。

3.2.5 $\mu(x)$ 与 p 、 q 的关系

以上对影响 $\mu(x)$ 的诸因素分别进行了简单讨论,由于各因素之间存在模糊的耦合关系,因而使得 $\mu(x)$ 与诸因素的关系变得更为复杂。

若用 p 表示电路系数 R 、 X_L 、 X_C 三者的配合关系,用 q 表示电源 e 与扰动强度 Δu 的模糊关系,则变量 p 代表铁磁谐振电路的灵敏度,变量 q 代表外界激发的强度。于是式(8)变为:

$$\mu(X) = g(p, q) \quad (9)$$

将 p 和 q 分为五个等级,即 $p = \{p_1, p_2, \dots, p_5\}$, $q = \{q_1, q_2, \dots, q_5\}$ 。其中, p_1, p_2, \dots, p_5 分别表示“极灵敏”、“较灵敏”、“灵敏”、“较不灵敏”和“极不灵敏”; q_1, q_2, \dots, q_5 分别表示“极强”、“较强”、“强”、“较弱”和“极弱”概念。则可得系统配合因素与激发因素间的模糊关系矩阵:

$$\begin{matrix} & \begin{matrix} q_1 & q_2 & q_3 & q_4 & q_5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \end{matrix} & \begin{pmatrix} \mu(p_1, q_1) & \mu(p_1, q_2) & \mu(p_1, q_3) & \mu(p_1, q_4) & \mu(p_1, q_5) \\ \mu(p_2, q_1) & \mu(p_2, q_2) & \mu(p_2, q_3) & \mu(p_2, q_4) & \mu(p_2, q_5) \\ \mu(p_3, q_1) & \mu(p_3, q_2) & \mu(p_3, q_3) & \mu(p_3, q_4) & \mu(p_3, q_5) \\ \mu(p_4, q_1) & \mu(p_4, q_2) & \mu(p_4, q_3) & \mu(p_4, q_4) & \mu(p_4, q_5) \\ \mu(p_5, q_1) & \mu(p_5, q_2) & \mu(p_5, q_3) & \mu(p_5, q_4) & \mu(p_5, q_5) \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (10)$$

从上面的矩阵可以直观地看出参数配合因素与外界激发因素对发生铁磁谐振可能性的影响。

在模拟试验中用开关合闸激发谐振的概率,其实质就是这种可能性的大小。因此,可以把激发概率作为矩阵元素的取值。

4 用 Fuzzy 控制器防止铁磁谐振的构想

Fuzzy 控制是模糊理论与控制理论结合的产物,它为解决具有不确定性对象的控制问题提供了有效的途径。一些实验装置的试验结果表明:Fuzzy 控制器对具有高度非线性、交叉耦合严重、没有明确的数学模型以及具有时变特性的模糊对象的调节控制效果颇佳。理论研究、运行实验及试验结果表明,电力系统铁磁谐振电路恰恰具有上述特性^[4]。因此,构想用 Fuzzy 控制器原理实现系统消谐控制值得探索。

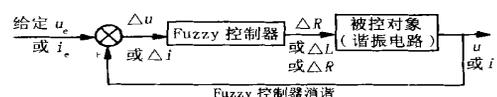


图1 消谐控制原理图

Fig. 1 Block diagram for limiting Ferroresonance

(下转第 40 页)

杨奇逊(1937 -),男,教授,博士生导师,中国工程院院士,从事电力系统继电保护与自动化领域的研究和教学工作;

李国钧(1930 -),男,高级工程师,从事电力系统电气设计工作。

The technology of channel for pilot protection using asynchronous communication

YU Bo¹, YANG Qi-xun¹, LI Guo-jun², HUANG Shao-feng³, QIN Ying-li³, ZHAO Zi-gang⁴

(1. Sifang Research Institute of North China Electric Power University, Beijing 100085, China; 2. Northeast Electric Power Design Institute, Changchun 130021, China; 3. Beijing Sifang Automation Co. Ltd., Beijing 100085, China; 4. Hebei Power Dispatching & Communication Bureau, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: This paper represents the analysis of the status of traditional commanding channels, studying of channel mode using direct digital logic communication based asynchronous communication for pilot protection, and the problems about its practice. The special channel or multi-channel using carrier wave by power lines, which has long transmission time and low reliability, and which is disturbed easily, is the one of main reason of incorrect performance of the protection relay. The direct digital logic communication, with RS-232C asynchronous communication mode, can transfer eight bits available information by digital special or multi-channel, and may integrate some protection schemes. It has some advantages, such as simpler interface, larger information transferred, shorter transmission time, lower cost. It may fit for different digital channel modes. The analysis and test shows that its security and reliability can meet the requirement of the pilot protection for blocking scheme, permission scheme and direct trip scheme.

Key words: pilot protection; digital communication; channel; optical fiber; asynchronous communication

(上接第 35 页)

基本构想:把铁磁谐振电路看作模糊控制对象,谐振电路的电压(或电流)作被控量,消谐电阻 R (或 L 、 C)为控制量,取控制对象的电压 u (或 i)与给定值 u_c (或 i_c)进行比较,将比较结果送入 Fuzzy 控制器,由 Fuzzy 控制器根据模拟控制规则调整消谐电阻 R (或 L 、 C)作用于被控对象,从而将被控对象,即谐振电路控制在非谐振状态。图 1 为消谐控制原理图。其中 Fuzzy 控制器是用计算机来模仿铁磁谐振问题专家、运行专家控制策略的一种智能型控制器。它的设计主要有以下两方面的内容:

- (1) 模糊化过程和控制规则表的形成。
- (2) 模糊控制查询表的生成。

需要说明的是,这里仅仅提出了用 Fuzzy 控制器实现消除铁磁谐振的构想,而模糊控制器的实现尚需做大量艰苦的探索研究。

5 结论

电力系统的铁磁谐振具有随机性和模糊性,因

此可以用 Fuzzy 理论来分析研究铁磁谐振问题。这是一种新的方法,具有重要的实际意义。

参考文献:

- [1] 夏承铨.非线性电路[M].北京:人民邮电出版社,1986.
- [2] Marti R. Ferroresonance in power systems:Fundamental solutions[J]. IEE PRICE EDING&C,1991:533-538.
- [3] 小本雅晴(日).模糊数学及其应用[M].天津:天津科技出版社,1983.
- [4] 秦祖泽.高压配电系统基波铁磁谐振的预测研究[J].湘潭大学自然科学学报,1997,22(3):107-110.

收稿日期: 2002-10-10; 修回日期: 2002-11-27

作者简介:

肖伟平(1959 -),讲师,研究方向电力系统自动化、计算机控制;

秦祖泽(1963 -),副教授,博士研究生,研究方向电力系统铁磁谐振、电力系统规划;

龙卫华(1964 -),高级工程师,研究方向电力系统铁磁谐振、电力系统铁磁谐振。

Application of fuzzy theory to ferroresonance study in electric power systems

XIAO Wei-ping, QIN Zu-ze, LONG Wei-hua

(Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411101, China)

Abstract: According to fuzziness of ferroresonance in electric power systems and using Fuzzy theory, the possibility of ferroresonance resulting in electric power systems, influence factors and preventative steps are investigated. It is a new approach, which possesses important significance to supply and consummate the study on ferroresonance problem.

Key words: electric power systems; fuzziness; ferroresonance