

矩阵测度在消除电力系统铁磁谐振中的应用

冯平^{1,2}, 王尔智², 王维俊¹

(1.解放军后勤工程学院机械电气工程系, 重庆 401311;

2.沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110178)

摘要: 唯一稳态消谐法是近年出现的消除非线性系统谐振新的分析方法。该方法的基本思想是如果非线性系统存在一个非谐振的正常解, 并且该系统具有唯一的稳态, 则此时对应的条件就是系统不发生谐振的条件。将这一方法应用在消除中性点接地电力系统的铁磁谐振的分析中, 以矩阵测度为工具, 得到了相应的消谐条件。结果表明, 消除谐振的条件可以用一个矩阵的测度来决定, 并用数值模拟进行验证, 表明结果正确, 同时也说明唯一稳态消谐法有效性。

关键词: 电力系统; 铁磁谐振; 中性点接地系统; 非线性系统; 唯一稳态消谐法

中图分类号: TM13

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2011)02-0049-03

在 110~220 kV 等中性点接地电力系统中, 经常发生断口电容与电压互感器形成的铁磁谐振, 给电力系统造成很大的危害。围绕这种谐振的机理及消除方法, 国内外进行了广泛的研究^[1,2]。从方法上来看, 目前对这种铁磁谐振问题所主要采用的方法有如下几种。第一是实验研究^[3,4]。即通过大量的实验数据得到各种经验结论。第二是进行数值模拟和仿真^[5,6]。通过建立模型, 在大范围内改变参数, 通过计算机计算得到或验证参数的范围。第三是理论研究^[7,8]。即对这种谐振建立相应的数学模型, 通过对模型的理论分析, 了解这种谐振的机理, 并且寻找消除谐振的方法。这 3 种方法中, 理论分析具有决定性的意义, 主要有作图法^[1,8]、谐波平衡法^[5,6]、平面相图法^[4]、幅频法、描述函数法^[1-3]、非线性动态系统理论^[4,7]等。但由于该问题数学上的复杂性, 目前采用的都是各种近似的方法, 得到的结论和试验数据往往有一定的差距。因此, 提出和发展新的分析铁磁谐振的方法, 并对该问题进行更深入的分析是很有意义的。唯一稳态消谐法是近年出现的消除非线性系统谐振新的分析方法^[9]。该方法的基本思想是如果非线性系统存在一个非谐振的正常解, 并且该系统具有唯一的稳态, 则此时对应的条件就是系统不发生谐振的条件。本文将这一方法应用在消除中性点接地电力系统铁磁谐振的分析中, 以矩阵测度为工具, 得到了相应的消谐条件。

1. 等效电路及其数学模型

中性点接地电力系统铁磁谐振的模型如图 1 所示^[10]。

图 1 中, $e = \sqrt{2} E \sin \omega t$ 是 50 Hz 等效正弦交流

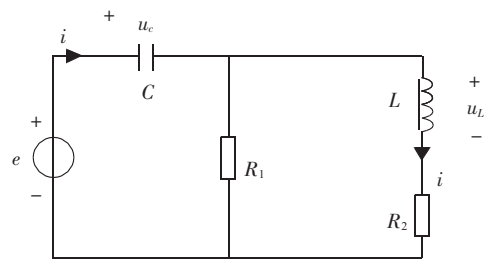


图 1 铁磁谐振等效电路

电源, R_1 和 R_2 是电感器铁芯的等效电阻, L 为等效非线性电感, C 为线路等效电容, 各量参考方向如图。

基准值为^[11]: 对所研究的 220 kV 系统, 三相电压 $v_{\text{base}} = 220 \text{ kV}$, 单相电压 $v_{\text{base}} = 127 \text{ kV}$, 单相视在功率 $S_{\text{base}} = 100 \text{ V} \cdot \text{A}$, 角频率 $\omega_{\text{base}} = 314 \text{ rad/s}$, 阻抗的基准值为 $R_{\text{base}} = 16 \text{ M}\Omega$, $C_{\text{base}} = 1 (R_{\text{base}} \times \omega_{\text{base}}) = 1 / (5.06 \times 10^{10}) \text{ F}$ 。互感器磁链与电流关系由一个三阶代数方程表示如下:

$$i = a\psi + b\psi^3 \quad (1)$$

式中: ψ 为互感器磁链, 此处 $a = 3.42$, $b = 0.41$ 。

对于式(1)表示的非线性电感, 可以用分段折线来近似, 当 $|\psi| \leq 0.5$, 取 $i = 3.42\psi$; 当 $|\psi| \geq 0.5$, 取 $i = 8.8088\psi - 4.0412$ 。

对应于图 1, 按照图中的参考方向, 可以得到电路的状态方程为:

$$\begin{cases} \frac{d\psi}{dt} = e(t) - R_2 i_L(\psi) - u_c(t) = e(t) - R_2 i_L(\psi) - q/C \\ \frac{dq}{dt} = i_L(\psi) + [e(t) - u_c(t)]/R_1 = i_L(\psi) + [e(t) - q/C]/R_1 \end{cases} \quad (2)$$

归一化后电路的微分方程为:

$$\frac{d^2 \psi}{dt^2} + \frac{1}{R(C_s + C_g)} \frac{d\psi}{dt} + \frac{1}{C_s + C_g} (a\psi + b\psi^3) = -\sqrt{2} \omega E \frac{C_s}{C_s + C_g} \sin \omega t \quad (3)$$

可证明,电路至少存在一个以 T 为周期的解^[12]。
对于式(2),设其任意 2 个有界解为:

$$\{\psi, q\}, \{\psi^*, q^*\}$$

并令:

$$\Delta\psi = \psi - \psi^*, \Delta q = q - q^*$$

于是可以得到增量状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\Delta\psi}{dt} \\ \frac{d\Delta q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_2 K_L(t) & -1/C \\ K_L(t) & -1/CR_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\psi \\ \Delta q \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $K_{L\min} \leq \frac{i_{L1} - i_{L2}}{\psi_1 - \psi_2} = K_L(t) \leq K_{L\max}$ 。

考虑式(4)的一般形式:

$$dX/dt = A(t)X \quad (5)$$

$$X = (x_{ij})_{1 \times n}, A(t) = (a_{ij}(t))_{n \times n}$$

显然,如果式(5)的零解 $X=0$ 是全局渐进稳定的,即:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|X\| \rightarrow 0$$

则图 1 所示电路的稳态惟一,即系统的不谐振条件。

2 电路惟一稳态的条件求取^[9]

惟一稳态消谐法的基本思想是如果非线性系统存在一个非谐振的正常解,并且该系统具有惟一的稳态,则此时对应的条件就是系统不发生谐振的条件。按照这一方法,对于图 1 和状态方程(3),大量实验和运行经验表明其有多个稳态解,其中最常见稳态解,就是没有发生谐振时,对应于系统正常工作状态的稳态解。系统的其他非正常的稳态解,则是由于扰动,引起 C 与 L 之间的铁磁谐振造成的稳态解。显然这些非正常的稳态解对于系统是有害的,如果能够使经扰动后的非正常稳态解趋于正常的稳态解,即使系统的稳态解惟一,那就可以达到消除系统铁磁谐振的目的。

为求得系统的惟一稳态,首先给出如下定义:定义 1 对于 2 矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 和 $B = (b_{ij})_{n \times n}$,如果 $a_{ij} \geq b_{ij}$,则记 $A \geq B$ 。

定义 2^[12] 对于矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 如其范数是:

$$\|A\|_p, p=1, 2, \dots, \infty$$

则其测度定义为:

$$\mu_p(A) = \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{\|I + hA\|_p - 1}{h}, p=1, 2, \dots, \infty$$

即:

$$\mu_2(A) = (1/2)\lambda_{\max}(A^T + A)$$

$$\mu_1(A) = \max_j \left(a_{jj} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n |a_{ij}| \right)$$

$$\mu_\infty(A) = \max_i \left(a_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |a_{ij}| \right)$$

于是,有如下的定理:

定理 1,对于式(5),如果 $\mu_p(A) < 0$,则式(2)有惟一稳态。

证明:

$$d\|X(t)\|_p / dt - \mu_p(A(t))\|X(t)\|_p =$$

$$\lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{1}{h} [\|X(t+h)\|_p - \|I + hA(t)\|_p \|X(t)\|_p] \leq$$

$$\lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{1}{h} [\|X(t+h) - X(t) - hA(t)X(t)\|_p] =$$

$$\lim_{h \rightarrow 0^+} \left\| \frac{X(t+h) - X(t)}{h} - A(t)X(t) \right\|_p = 0$$

$$\|X(t)\|_p \leq \|X(t_0)\|_p \exp \int_{t_0}^t \mu_p(A(s)) ds$$

显然,如果 $\mu_p(A) < 0$,则 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|X\| \rightarrow 0$ 。即式(2)有惟一稳态。证毕。

下面根据定理 1,推导消除谐振的条件。对比式(4,5),显然有:

$$A(t) = \begin{bmatrix} -R_2 K_L(t) & -1/C \\ K_L(t) & -1/CR_1 \end{bmatrix}$$

于是,根据定理 1,得到图 1 所示的铁磁谐振电路不发生谐振的条件为定理 2。

定理 2,对于图 1 所示电路,其不发生谐振的条件为:

$$-2RK_L(t) < 0$$

$$-2/CR_1 < 0$$

$$-2R_2 K_L(t) + |K_L(t) - 1/C| < 0$$

$$-2/CR_1 + |K_L(t) - 1/C| < 0$$

根据文献[6]取参数(均为标么值) $E=1, a=3.42, b=0.41, C=0.5, 3.42 < K_L < 8.8$,角频率为 1,代入定理 2,得到当 $R_2 > 2.0, 0 < R_1 < 0.5$ 时,没有铁磁谐振发生。

3 数值模拟与讨论

下面取不同的参数,在不同的初始条件下,对电路进行模拟仿真,以检验电路是否发生谐振。初始条件顺序为:磁链、电容电荷、时间、初始条件按文献[6]选定。

通过模拟结果表明,如果电路参数满足定理 2 的条件,则电路无论在何种初始条件下,虽然经过非常复杂的振荡过程,其稳态都将是惟一的,最终所有解都将趋近正常解,不会出现铁磁谐振,验证了本文给出的条件的正确性。

如下是其中一组数据的振荡过程。初始条件: $\psi^0 = 2.4, q^0 = 1.4, t^0 = 0$ 。

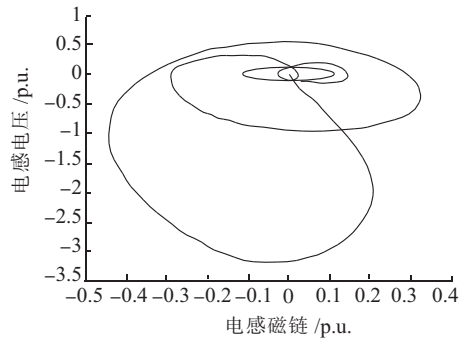


图2 电路稳态相图

4 结束语

本文根据惟一稳态消谐法基本思想,利用矩阵测度,分析了消除中性点接地电力系统的铁磁谐振的参数条件,得到了相应的消谐条件。同时通过数值模拟进行验证,表明结果正确,同时也说明惟一稳态消谐法有效性。

参考文献:

- [1] 解广润. 电力系统过电压[M].北京:水利电力出版社,1985.
- [2] 张纬钺,高玉明. 电力系统过电压与绝缘配合[M].北京:清华大学出版社,1988.
- [3] 郑盛琼,陈维贤,鲁铁成. 110~220 kV 变电所中互感器引起的铁磁谐振及吸能消谐[J].高压电器,1996,18(6):26-30.
- [4] HENRIKSEN T. How to Avoid Unstable Time Domain Respo-

nses Caused by Transformer Models[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2002, 17(2):516-522.

- [5] 李兴斌,王晨新. 断路器均压电容引起的铁磁谐振分析[J]. 东北电力技术,1994,24(9):39-43.
- [6] 贾红琴. 电磁式 TA 所致铁磁谐振过电压分析及抑制[J]. 高电压技术,2000,43(1):69-70.
- [7] 石峰. 110~220 kV 变电站空母线铁磁谐振的分析[J]. 湖南电力,2001,15(1):14-16.
- [8] LI Y G, SHI W A Systematical Method for Suppressing Ferroresonance at Neutral-Grounded Substations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2003,18(3):1009-1014.
- [9] 冯平,王尔智.中性点接地电力系统三相铁磁谐振理论分析[J].电工技术学报,2004,23(4):35-39.
- [10] 尤秉礼常微分方程补充教程[M].北京:人民教育出版社,1981.
- [11] 冯平.一种混沌分析与抑制方法及其在电力系统铁磁谐振中的应用[D].沈阳工业大学博士论文,2010.
- [12] 杨开宇.矩阵分析[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1988.

作者简介:

冯平(1961-),男,四川内江人,副教授,从事电路理论及高压电器理论研究工作;

王尔智(1936-),男,辽宁沈阳人,教授,从事高压电器理论研究和高压断路器开断特性的数值模拟工作。

Application of Matrix Measure for Ferroresonance Elimination

FENG Ping^{1,2}, WANG Er-zhi², WANG Wei-jun¹

(1. Dept of Mechanical and Electrical Engineering, PLA Logistics Engineering Inst., Chongqing 401311, China;

2. School of Electrical Engineering Shenyang Univ of Technology Shenyang Liaoning 110178, China)

Abstract: Unique steady state elimination method is a new method for eliminating resonance in nonlinear system presented recently. Its basic idea is that if there is a normal (non-resonance) solution for the system, and the steady state of system is unique, then the corresponding conditions are the conditions for eliminating resonance. In this paper, this new method is applied to analyze the eliminating of ferroresonance in neutral grounding power system. Based upon Matrix measure technology, the conditions for eliminating this ferroresonance are obtained, which can be determined by the measure of a matrix. The conclusions of this article are proved correct by numerical simulation, and it shows the effectiveness of unique steady state elimination method.

Key words: power system; ferroresonance; neutral grounding power system; nonlinear system; unique steady state elimination method

(上接第 48 页)

Research on Fault Phase Selection Method of Protective Relay for Double Circuit Lines on the Same Tower

DONG Da-long¹, LI Xin-ru², ZHANG Wen¹

(1. Tangshan Power Supply Company, Tangshan 063000, China; 2. Beijing Power Distribution Company, Beijing 100031, China)

Abstract: The paper analyzes the current situation about the protective relay of double circuit lines on the same tower, and elaborates the judge of different types of protection when faults happen. The advantages and disadvantages of the traditional protection are summed up. And the characteristics of faults and the principle of fault phase selection are studied. Then a practical fault phase selection method is presented. The fault phase selection of a 220 kV double circuit lines on the same tower is carried out using this method. The results of fault analysis, which is the same as the actual fault, verify the feasibility of the proposed method.

Key words: double circuit lines on the same tower; protective relay; cross country fault; fault phase selection