

基于向量比较原理的唯一稳态消谐法 及在消除中性点接地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, 以向量比较原理为工具, 得到了相应的消谐条件。其结果表明, 消除谐振的条件可以用一个常数矩阵的 Hurwitz 条件来决定, 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的有效性。

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

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 the system is unique, then the corresponding conditions are the conditions for eliminating resonance. This new method is applied to analyze the elimination of ferroresonance in neutral grounding system. Based on vector comparison method, the conditions for eliminating this ferroresonance are obtained, which can be determined by the Hurwitz conditions of some constant matrixes. The conclusions are proved correct by numerical simulation, and it shows the effectiveness of unique steady-state elimination method.

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

中图分类号: TM711 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0005-03

0 概述

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。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, 以向量比较原理为工具, 得到了相应的消谐条件。其结果表明, 消除谐振的条件可以用一个常数矩阵的 Hurwitz 条件来决定, 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的有效性。

1 等效电路及其数学模型

以图 1 的电路作为中性点接地电力系统铁磁谐

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50477050)

振的模型^[1]。

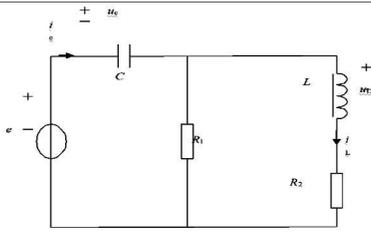


图 1 铁磁谐振等效电路

图 1 中, $e = \sqrt{2}E_s \sin \omega t$ 是 50 Hz 等效正弦交流电源; R_1 和 R_2 是互感器铁心的等效电阻; L 为等效非线性电感; C 为线路等效电容, 各量的参考方向如图。

基准值为^[3]对所研究的 220 kV 系统, 三相电压 $V_{base} = 220$ kV, 单相电压 $V_{base} = 127$ kV, 单相视在功率 $S_{base} = 100$ VA, 角频率 $\omega_{base} = 314$ (rad/s), 阻抗的基准值为 $R_{base} = 16$ M Ω , $C_{base} = 1 / (R_{base} \times \omega_{base}) = 1 / (5.06 \times 10^{10})$ 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, 此处取: $a = 3.42$, $b = 0.41$ 。

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

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

归一化后电路的微分方程可表示如下。

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

可以证明, 电路至少存在一个以 T 为周期的解^[11]。

对于方程式 (2), 设其任意两个有界解为

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

并令

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

于是可以得到增量状态方程为

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

其中,

$$K_{Lmin} \leq \frac{i_1 - i_2}{\Psi_1 - \Psi_2} = K_L(t) \leq K_{Lmax}$$

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 所示电路的稳态唯一, 即系统的不谐振条件。

下面推导消除系统谐振条件。

2 电路唯一稳态的条件 (消除谐振条件) 的求取

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。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利的, 如果能够使经扰动后的非正常稳态解趋于正常的稳态解, 即使系统的稳态解唯一, 那就可以达到消除系统铁磁谐振的目的。这样, 消除铁磁谐振的问题此时就转化为求系统的唯一稳态的问题。

为了求得系统的唯一稳态, 首先, 给出如下引理。

引理 1: 连续向量 $F(X, t)$ 是拟单调增的, 如果 $y_i = z_i, y_i \geq z_i (i \neq j), f_i(Y, t) \geq f_i(Z, t)$ 成立。

引理 2^[12]: 如向量 $R(t)$ 满足微分不等式

$$dR(t)/dt \leq F(R, t), R(t_0) \leq X_0$$

向量 $P(t)$ 是微分方程 $dX/dt = F(X, t), X(t_0) = X_0$ 的最大解, 并且 $F(X, t)$ 是拟单调增的, 则有

$$R(t) \leq P(t)$$

于是, 有如下的定理 1。

定理 1: 对于式 (5), 如果有两个常数阵

$$P = (p_{ij})_{n \times n} \text{ 和 } Q = (q_{ij})_{n \times n}$$

满足

$$p_{ij} \leq a_{ij}(t) \leq q_{ij}$$

以如下方式构造矩阵 M

$$M = (m_{ij})_{n \times n}$$

其中,

$$m_{ij} = \max\{|p_{ij}|, |q_{ij}|\}$$

$$m_{ii} = q_{ii}$$

则式(4)有唯一稳态的充分条件是 M 为 Hurwitz 阵。

证明:考虑如下的方程

$$dZ(t)/dt = MZ(t) \quad (6)$$

定义记号:

$$D_A(t) = \text{diag}[a_{11}(t), \dots, a_{nn}(t)],$$

$$D(t) = \text{diag}[m_{11}(t), \dots, m_{nn}(t)]$$

$$A(t) = D_A(t) + (A(t) - D_A(t))$$

矩阵: |.....|

为相应矩阵取绝对值后所得的矩阵对式(6),有

$$X(t) = e^{\int_0^t A(\tau) d\tau} X_0 + \int_0^t e^{\int_0^\tau A(\tau) d\tau} [A(\tau) - D_A(\tau)] X(\tau) d\tau$$

由记号,有

$$(|A(t) - D(t)|) \leq M - D(t)$$

$$D_A(t) \leq D(t)$$

于是有

$$(|X(t)|) \leq e^{\int_0^t D_A(\tau) d\tau} (|X_0|) + \int_0^t e^{\int_0^\tau D_A(\xi) d\xi} (|A(\tau) - D(\tau)|) (|X(\tau)|) d\tau$$

$$\leq e^{\int_0^t D_A(\tau) d\tau} (|X_0|) + \int_0^t e^{\int_0^\tau D_A(\xi) d\xi}$$

$$(|M - D(\tau)|) (|x(\tau)|) d\tau \equiv Y(t)$$

显然 Y(t) 对 t 连续,于是有

$$dY(t)/dt = D(t) Y(t) + [M - D(t)] Y(t)$$

$$\leq D(t) Y(t) + [M - D(t)] Y(t) = M Y(t)$$

则由引理 2 有

$$Y(t) \leq Z(t) \text{ 和 } (|X(t)|) \leq Y(t) \leq Z(t)$$

如果 M 是 Hurwitz 阵, 则式(6)的零解是全局渐进稳定的, 即式(5)的零解也是全局渐进稳定的, 式(2)有唯一稳态。证毕。

下面根据定理 1 推导消除谐振的条件。

对比式(4)、式(5), 显然, 有

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

由定理 1, A(t) 其对应的 M 矩阵, 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, 其稳态都将是唯一的, 最终所有解都将趋近正常解, 不会出现铁磁谐振, 验证了其给出的条件的正确性。

其中一组数据的振荡过程如下。

初始条件: $\psi^0 = 2.4, q^0 = 1.4, t^0 = 0$

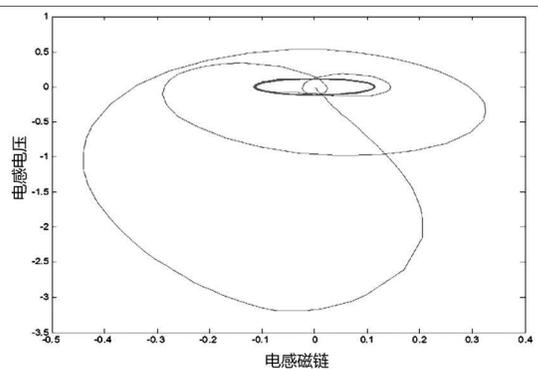


图 2 电路稳态相图

其结果可以用于消除谐振的设备计算中, 只是参数将发生改变。

所采用的电路虽然是集中参数电路, 但实际应用时, 可以根据具体的线路长度等将分布参数集中为等效电路, 这是目前电力系统谐振分析的有效做法, 可见诸于相关文献 [1-3]。

4 结论

(下转第 20 页)

续两次计算得到的 Δu_{t_i} 的幅值均远小于整定值;而当发生瞬时性故障时,连续两次计算得到的 Δu_{t_i} 的幅值均大于整定值。根据判断流程,故算法可以可靠地判断故障性质。

8 结 论

根据带并联电抗器的超高压输电线路发生瞬时性和永久性单相短路故障时,故障相恢复电压周期性不同特点,提出了提取瞬时性故障时恢复电压自由分量的算法,并应用 Prony 曲线拟合算法在短数据窗内获取自由分量的幅值,作为判断故障性质的依据。该判据具有简单、数据窗短、灵敏度高和基本不受系统运行方式、故障位置、过渡电阻和负荷电流的影响的优点。

参考文献

[1] 曹芬,何奔腾.带并联电抗器的超高压输电线路单相自适应重合闸新算法 [J].电力系统自动化,2009,33(23):55-59.

[2] 葛耀中.新型继电保护与故障测距原理与技术 [M].西安:西安交通大学出版社,2007.

[3] 李斌,李永丽,盛鹏,等.带并联电抗器的超高压输电线路单相自适应重合闸的研究 [J].中国电机工程学报,2004,24(5):52-56.

[4] 刘浩芳,王增平,徐岩,等.带并联电抗器的超特高压输电线路单相自适应重合闸故障性质识别判据 [J].电网

技术,2006,30(18):30-34.

[5] Ge Yaosheng Sui Fonghai Xiao Yuan Prediction Methods for Preventing Single-phase Reclosing on Permanent Fault [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 114-121.

[6] Fitton D S, W Dunn R, Aggarwal R K, et al. Design and Implementation of an Adaptive Single Pole Autoreclosure Technique for Transmission Lines Using Artificial Neural Networks [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 748-756.

[7] Aggarwal R K, Johns A T, Song Y H, et al. Neural-network Based Adaptive Autoreclosure Technique for EHV Transmission systems [J]. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 1994, 141(2): 155-160.

[8] 蔡超豪.基于小波分析的自适应重合闸 [J].继电器,1999,27(2):21-23.

[9] 成敬周,张举.基于电弧复小波检测的单相自适应重合闸 [J].继电器,2005,33(7):21-25,49.

[10] 舒亮,贾磊,郑士普,等.超高压线路潜供电弧电压的频率特性分析.西安交通大学学报,2007,41(6):712-716

[11] J F Hauer C J Demeure L L Scharf Initial Results in Power Analysis of Power System Response Signals [J]. IEEE Transactions on Power Systems 1990, 5(1): 80-89.

[12] 伍凌云,李兴源,孙衢,等.基于 Prony 辨识的复杂交直流系统次同步振荡特性分析 [J].四川大学学报:工程科学版,2008,40(3):155-160.

(收稿日期:2010-09-15)

(上接第 7 页)

根据唯一稳态消谐法基本思想,利用向量比较原理,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,同时也说明唯一稳态消谐法的有效性。

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] 张纬敏,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] T. Henriksen How to Avoid Unstable Time Domain Responses 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 PT 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] Yunge Li Wei Shi 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: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.

(收稿日期:2010-10-12)