

常值脉冲法在铁磁谐振过电压混沌抑制中的应用

黄小梅

北京金电联供用电咨询有限公司 北京 100101

摘要: 研究针对铁磁谐振过电压混沌抑制问题, 引入了常值脉冲法, 将变电站接线作为案例, 基于非线性动力学理论对其铁磁谐振混沌特性进行分析, 获得分维数与 Lyapunov 指数。依据系统非线性特征能够将铁磁谐振系统混沌状态稳定在一个固定点, 并向周期轨道转移, 使得系统能够实现混沌状态与有序状态的转换。试验结果证实该方法可靠性强, 能够弥补传统方法对参数精确已知的限制, 具有较高应用价值。

关键词: 常值脉冲法; 铁磁谐振; 过电压; 混沌抑制; 性能分析

Application of Constant Pulse Method in Chaos Suppression of Ferromagnetic Resonance Overvoltage

Xiaomei Huang

Beijing Jindian Power Supply Consulting Co., Ltd., Beijing 100101

Abstract: To solve the chaos suppression problem of ferromagnetic resonance overvoltage, the constant pulse method is introduced. Taking the substation wiring as a case, the ferromagnetic resonance chaotic characteristics are analyzed based on nonlinear dynamics theory, and the fractal dimension and Lyapunov exponent are obtained. According to the nonlinear characteristics of the system, the chaotic state of the ferromagnetic resonance system can be stabilized at a fixed point and transferred to the periodic orbit, so that the system can realize the transformation between the chaotic state and the ordered state. The test results confirm that the method is highly reliable, can make up for the limitation of the traditional method on the precise known parameters, and has a high application value.

Keywords: constant value pulse method; ferromagnetic resonance; overvoltage; chaos suppression; performance analysis

作为电力系统常见故障, 铁磁谐振过电压通常发生在中性点接地系统 110kV 或 220kV 变电站母线, 属于非线性共振现象系统可见, 额定工作电压明显升高, 且持续时间长、电位差增加, 会导致 TV 烧毁、外绝缘闪络等风险事件, 一方面影响电网系统的稳定运行, 另一方面会对人身安全构成威胁^[1]。基于此应及时、准确定位铁磁谐振过电压的类型, 积极采取措施以保障电网安全运行。自 20 世纪 90 年代以来, 国内外学者对铁磁谐振过电压的混沌抑制问题给予了高度重视, 抑制方法研究主要集中在反馈抑制与非反馈抑制两个方面, 两者各有优劣。本研究引入非线性动力学理论, 对中性点接地系统铁磁谐振现象进行了深度分析, 对相关特征予以描述, 利用常值脉冲控制法提出了相应的抑制策略。

1 铁磁谐振电路模型的构建

电力系统中许多元件是属于电感性的或电容性的,

如电力变压器、互感器、发电机、消弧线圈为电感元件, 补偿用的并或串联电容器组、高压设备的寄生电容为电容元件, 而线路各导线对地和导线间既存在纵向电感又存在横向电容, 这些元件组成复杂的 LC 震荡回路, 在一定的能源作用下, 特定参数的回路就会出现谐振现象。如图 1 所示, 为铁磁谐振电路模型, 可见当处于铁磁谐振状态下, 变压器的开关包括断路器、隔离开关均断开,

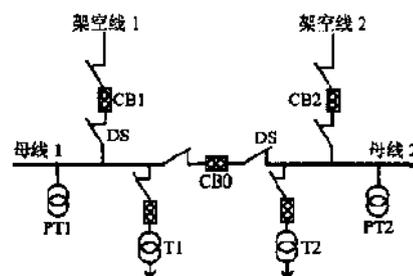


图 1 铁磁谐振变电站接线示意图

可以断定变压器未参与谐振回路。母线1、母线2均发生铁磁谐波，其发生原理完全一致。通过对母线1的分析，可以发现CB0和CB1的其中之一已断开而另一个打开时，谐振即发生。

排除相间耦合因素的影响，获得单相谐振电路，见图2，其为经过简化处理的等效电路，E表示的是电源幅值，其计算公式为 $x = \frac{2C_{gra}E_s}{2C_{gra} + C_{pg}}$ ， $C = 2C_{gra} + C_{pg}$ 。排除母线与地电导、相间电容的影响，那么可以用如下公式表示电路微分方程

$$\frac{du}{dt} + qu + \frac{i_L}{\omega C} = g \cos \omega t$$

其中g表示的是激励因子，其计算公式为 $\frac{2C_{gra}E}{C}$ ，

阻尼因子用q表示，其计算公式为 $\frac{1}{RC\omega}$ ， ω ， φ 分别表示的是系统频率、变压器磁链。可以发现激励因子与谐振发生风险呈现出明显的正相关，即g越大谐振发生风险越高。而阻尼因子与谐振呈负相关，即a值越大，对谐振抑制作用越强。中性点接地系统的电源、电容等均相互独立，不会对其他元件产生明显影响。在A、B、C相回路均可能发生谐振，且存在正序、零序之分。经过开关操作，会对谐振强度、持续时间产生随机影响，并被激发^[2]。系统参数会在一定程度上对谐振波主频率产生影响，其中以基频作为常见，其次为分频，一般较少发生高频谐振。

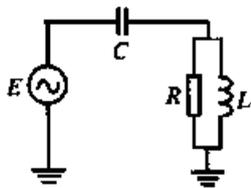


图2 等效电路示意图

2 铁磁谐振的混沌特性分析

经过数值计算，可以判断电路处于正常工作状态下，其q值低于0.6167，周期运动状态比较稳定。假设供电电源交流电为50Hz，电阻值范围为50~300MΩ，若将变压

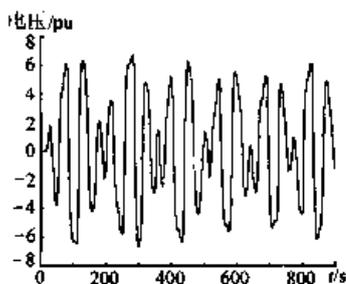


图3 电压波形混沌响应

器的损耗设定为50~250W，那么其波形混沌响应如图3所示，该图能够对供电电压较高状态下混沌响应可能性予以反映。当电阻为50MΩ后，其损耗可达到500W。在Runge-Kutta-Fehlberg算法中嵌入微分方程，经过求解，在h区间内选择子步几何，每一步运算均能够获得两个解，且离散误差呈现出一定的差异，但精确性、迭代速度均较高。

如图4所示，为混沌共振相轨迹，其无周期解，且非平衡状态，表现为一定的杂乱性，且呈现出随机特征。铁磁谐振在混沌状态下，若增加电阻，会进一步加剧共振现象。混沌理论认为确定性激励能够对随机性响应起到激发作用。此次研究在分析非线性电路混沌现象时主要从数学定义出发^[3]。利用奇怪吸引子分数维度对混沌现象进行判断，少数奇怪吸引子维度与整数接近，但大部分均处于分数维度，其也是识别混沌的有效标识。保持各项参数不变，在三维相空间获得二维空间poincare映射截面图。

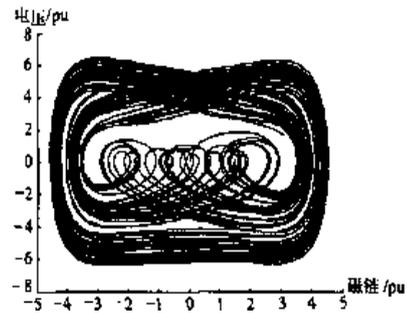


图4 混沌共振相轨迹示意图

应用Lyapunov指数对混沌运动进行判断，初值 X_0 、 $X_{0+\epsilon}$ 比较接近，若根据迭代指数关系使两点发生变化，那么 $|f(x_0 + \epsilon) - f(x_0)| = \epsilon e^{\lambda(x_0)}$ ，将迭代两点距离进行放大后，能够对指数之间的关系予以反映。经过N步迭代计算，结果发现两点距离发生了一定的变化，可以采用如下公式表示

$$\lambda(x_0) = \lim_{N \rightarrow \infty} \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{1}{N} \ln \left| \frac{f^N(x_0 + \epsilon) - f^N(x_0)}{\epsilon} \right|$$

其表示的是Lyapunov指数，当 λ_{max} 为1.724时，提示随着迭代步数指数的增长，初值差异也成倍增长。

3 常值脉冲法在铁磁谐振过电压混沌抑制中的应用

3.1 铁磁谐波混沌抑制理论分析

所谓混沌抑制，主要指的是通过对非线性动力系统混沌运动的改变，进而表现为周期动力学变化的过程，经过混沌抑制后无需考虑周期性动力学行为，且无需提前进行指定。重新对系统进行设计是混沌抑制作为便捷且简单的方法，经过理论分析，结合以往经验寻找相关的判据，需要注意的是判断往往局限于参数空间部分区

域,再次设计需要将参数独立于上述区域外,避免混沌的发生^[4]。此次研究针对中性点接地电力系统铁磁谐振过电压混沌问题,引入了常值脉冲法进行抑制。该方法操作简单,对系统认知深度要求不高,能够直接将脉冲叠加在系统变量上,利用系统反馈实现对混沌行为的控制。从原理上看,其通过对系统变量及周期脉冲发生器的控制,在非线性特征作用下,稳定固定点。

3.2 数值计算

通过铁磁谐振变电站等值电路,可以获得控制方程,

为 $u_{n+1} = g\omega\cos\omega t - qu_n\omega - \frac{i_L}{C} - k\delta_{n,p}$, 通过对铁磁谐振特性的分析,对等值电路微分方程进行求解,其实际上是对三维变量的操作,自变量为 u, φ, t , 通过脉冲控制第一个自变量,即能够解决铁磁谐振混沌问题,之后两个变量则设置为零脉冲。数值计算过程中,应保持各项参数数值不变,对铁磁谐振中性点系统固定点进行分析,评估其稳定性。若铁磁谐振混沌在其他周期稳定,提示系统存在非工频周期电压,会影响到整个电力系统的运行^[5]。对 $F(u)$ 一阶导数进行求解,将常值脉冲量 k 导入,如图7所示,其为 $y=0, p=1, k=-0.58$ 条件下获得的数值。不仅如此,当铁磁谐振系统过电压固定点处于不同位置, y 值、 P 值不同期望周期,同样能够根据上述方法实现对混沌系统状态的有效控制。

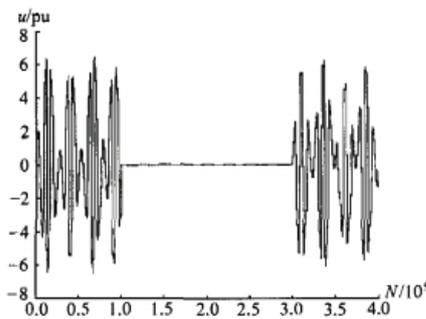


图5 铁磁谐振混沌系统固定点稳定性

当铁磁谐振中性点接地系统为混沌状态,可以获得一个随机的时间序列,当脉冲抑制发挥作用后,电压信号在短时间内便能够在所期望的固定点上稳定,取消常值脉冲后,系统会恢复到混沌状态。可以将脉冲发生器安装于中性点接地系统铁磁谐振回路,自变量叠加常值的时间间隔脉冲被激发后,会实现对铁磁谐波过电压的有效控制,改变混沌状态,并向周期轨道转移,此时混沌过电压高值会受到影响,呈现降低趋势,实现混沌与有序的转变。

3.3 常值脉冲法性能分析

通常,想要实现对混沌抑制的连续性控制,需要耗

费较大的能量,且投入代价高,根据最优控制理论,将脉冲方式加入控制器,不仅能够实现对混沌抑制的控制,维持较好的稳定性,且能够减少性能指标。在加权矩阵 S, Q, R 中,状态矢量 X 及控制输入矢量 u , 当脉冲周期较某一阈值低时,系统稳定性、渐进性等同于连续驱动控制的稳定性。本研究引入脉冲控制占比空,表示为 $\tau=t_{11}(t_1+t_2)$, 以便实现对脉冲控制方式性能的定量描述,控制加入时间用 t_1 表示,系统自由演化所用时间采用 t_2 表示。应合理选择 τ 满足控制代价与速度的要求。

经过理论分析,可以发现谐振发生初期,将谐振合上后,电源开关会被激发,使得断口电容参数发生一定的改变,进而将谐振消除。但从实际情况看,工作人员察觉谐振后往往已经出现一段时间的谐振,此时过电流的发生会对高压线匝产生损坏^[6]。引入常值脉冲法对混沌现象进行抑制,不仅具有占用空间小的优势,而且能够实现对消耗能量的较好控制。另外,可以将循环诊断加入到电路设计系统中,其能够对混沌现象进行实时控制,当出现铁磁谐波后能够及时驱动脉冲控制系统,抑制混沌的发生。

4 结束语

综上所述,在中性点接地系统铁磁谐振过电压混沌问题中采用常值脉冲法,能够实现混沌状态向期望轨道的周期性转移,系统经过常值脉冲抑制能够实现混沌、有序转换,且能够对变量进行脉冲叠加,有利于混沌行为的有效控制。通过数值计算,可以发现该方法占用能耗少,可将系统控制至固定点,有效性高。

参考文献:

- [1]谢家安,王玉荣.SST在铁磁谐振过电压模态参数辨识中的应用[J].广东电力,2020,33(4):82-89.
- [2]郝耀华,曹斌,徐星琛,等.35kV中性点经消弧线圈接地对铁磁谐振过电压影响的研究[J].电瓷避雷器,2020,16(2):93-98.
- [3]罗立波,朱咏明,杨振,等.基于ATP-EMTP的铁磁谐振过电压影响因素灵敏度仿真与分析[J].西安科技大学学报,2020,40(6):1088-1095.
- [4]张志磊,贾洪瑞,刘红文,等.基于零序电压和PT电流复合检测的铁磁谐振二次消谐仿真研究[J].电瓷避雷器,2020,25(5):183-189.
- [5]许贵民,姚帅,尹红霞.中性点非有效接地系统电磁式电压互感器铁磁谐振问题研究[J].电气应用,2020,39(5):53-60.
- [6]桂媛,陈凡,朱勇,等.电磁式电压互感器保险频繁熔断抑制措施分析及RTDS仿真验证[J].中国电力,2020,53(12):214-222.