

基于混沌小扰动抑制的电力系统混沌振荡控制方法研究

苗斌

(西安铁路职业技术学院 电气工程学院, 西安 710026)

摘要: 针对电力系统在周期扰动下可能发生混沌振荡, 影响电力系统稳定运行的问题, 提出基于混沌小扰动抑制的电力系统混沌振荡控制方法; 构建电力系统数学模型, 模拟电力系统混沌振荡过程, 确定扰动与混沌振荡之间的关系; 根据电力系统实时运行数据的采集结果, 计算混沌振荡信号特征参数, 判定系统振荡状态, 计算混沌扰动抑制控制量; 在混沌振荡控制器的支持下, 利用混沌小扰动抑制技术限制混沌振荡幅值, 进而实现电力系统的混沌振荡控制任务; 从实验结果中可以看出, 与传统控制方法相比, 优化设计方法控制作用下, 电力系统的混沌振荡信号的幅值和频率更低, 振荡幅值和频率的控制误差分别降低了约 1.57 dB 和 0.015 Hz, 即优化设计方法的控制性能更优。

关键词: 电力系统; 混沌振荡; 混沌小扰动抑制; 振荡信号幅值

Research on Chaos Oscillation Control Method of Power System Based on Chaos Small Disturbance Suppression

MIAO Bin

(College of Electrical Engineering, Xi'an Railway Vocational & Technical Institute, Xi'an 710026, China)

Abstract: Aiming at the problem that chaotic oscillation may occur in power system under periodic disturbance and affect the stable operation of power system, a chaotic oscillation control method for power system based on chaotic small disturbance suppression is proposed. The mathematical model of the power system is built to simulate the chaotic oscillation process of the power system and determine the relationship between disturbance and chaotic oscillation. According to the collection results of real-time operation data of the power system, the characteristic parameters of chaotic oscillation signal are calculated to determine the system oscillation state, and the control quantity of chaotic disturbance suppression is calculated. With the support of chaos oscillation controller, the chaotic small disturbance suppression technology is used to limit the amplitude of chaos oscillation, thus realizing the chaotic oscillation control task of the power system. The experimental results show that compared with traditional control methods, the chaotic oscillation signal amplitude and frequency of the optimized power system are lower, and the control error of the oscillation amplitude and frequency is reduced by about 1.57 dB and 0.015 Hz respectively, that is, the control performance of the optimized design is better.

Keywords: power system; chaotic oscillation; chaotic small disturbance suppression; oscillation signal amplitude

0 引言

电力系统是一个由发电厂、区域变电站、变电所、配电所、高压设备和用电设备所构成的电力生产和消费体系^[1], 能够生产电能并由输电、变电、配电等方式向用户提供电能^[2-4]。为了达到这种目的, 在电力系统的各个环节和各层级都设有相应的监控、调节、控制、保护、通讯、调度等控制手段, 确保用户能够获得安全、优质的电能^[5]。当电力系统的负载周期的幅度达到一定条件时, 就会产生混沌振荡现象^[6]。混沌是一种与随机运动相似的动态形式, 它在局部呈现出不规则的摆动, 看似杂乱无章, 但从整体上来看, 又被限制在一定的范围内, 具有一定的有序性, 因此它与随机运动不同, 它是秩序与混乱的矛盾统一体^[7]。

由于混沌来自系统的非线性, 因此也具有混沌非线性、非均衡性的特征^[8]。

电力系统的混沌振荡现象会在一定程度上影响电力系统的运行稳定性, 为此, 相关学者纷纷对电力系统混沌振荡控制方法做出了研究。文献 [9] 中提出的混沌振荡控制方法以全局滑模时滞技术作为支持, 能够快速收敛特性的时滞补偿项, 从而抑制上界未知的外部扰动。文献 [10] 中提出的控制方法应用了浸入与不变原理该方法融入 I&I 原理, 对系统中存在的未知非线性项和外部扰动进行补偿, 在反演控制器的支持下完成混沌振荡控制任务。文献 [11] 提出利用动态斜坡调制功率半导体滤波器调节串联通器件电压抑制传导。提出了一种固定频率的动态斜坡调制器,

收稿日期: 2023-02-27; 修回日期: 2023-03-29。

基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划项目(20JK0860)。

作者简介: 苗斌(1987-), 男, 硕士, 讲师。

引用格式: 苗斌. 基于混沌小扰动抑制的电力系统混沌振荡控制方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(9): 124-129.

基于以固定的开关频率操作转换器，并将开关频率设置为远离电网侧谐振频率。无论输入变化如何，两端的电压也通过动态斜坡保持在低电平，从而实现电力系统的低功耗运行。设计了一种优化的快速电流调节电路，以实现高传导电磁干扰（EMI）抑制。然而在上述混沌振荡控制方法的实际应用过程中，存在明显的控制效果不佳的问题，主要体现在混沌振荡幅度大、存在时间长等方面，为此引入混沌小扰动抑制技术。

混沌小扰动抑制技术与混沌振荡控制具有相同的控制目标，该技术主要通过对混沌小扰动的识别与干预，在一定程度上抑制混沌扰动幅度。将混沌小扰动抑制技术应用到电力系统的混沌振荡控制工作中，通过混沌小扰动抑制技术限制电力系统的混沌振荡幅值，以期能够提升混沌振荡控制效果，进而保证电力系统的运行稳定性。

1 电力系统混沌振荡控制方法

优化设计电力系统混沌振荡控制方法的基本思路是：在电力系统模型环境下，模拟混沌振荡发生的过程，并确定混沌扰动与振荡现象之间的关系。通过电力系统实时运行数据的采集，提取其振荡信号特征，从而判定当前电力系统是否存在混沌振荡现象，针对存在振荡现象的电力系统，计算混沌振荡控制量，在混沌振荡控制器的作用下，利用混沌小扰动抑制技术消除混沌振荡的周期运动，结合扰动与振荡之间的关系，实现对电力系统混沌振荡的控制。

1.1 建立电力系统数学模型

电力系统由发电厂、配电所、用电设备等多个部分组成，电力系统的组成结构如图 1 所示。

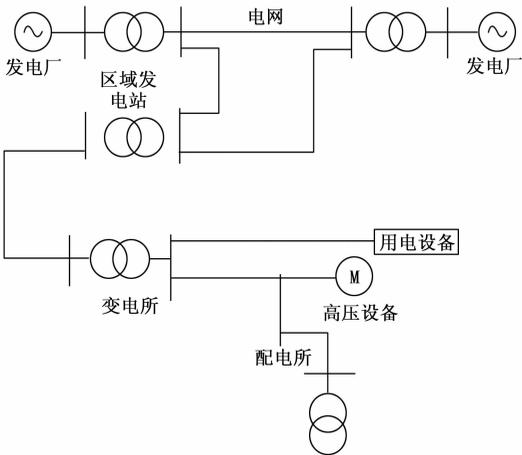


图 1 电力系统组成结构图

电力系统中发电机模块对应的数学模型可以描述为：

$$\begin{cases} \varphi = 2\pi f_{ele} \\ \omega = \frac{-\mu\omega + P_{ele} - \frac{U_{\infty}}{L_{temporary} + L} \sin\varphi}{2H} \\ U_{fd} = \frac{-\kappa_{enlarge}(U - U_{ref}) - (U_{in} - U_{fd0})}{\tau} \end{cases} \quad (1)$$

式中， f_{ele} 和 P_{ele} 分别为发电机的基频和输入功率， U_{∞} 、 U_{ref} 、 U_{in} 和 U_{fd0} 分别为无穷大电压、终端电压、母线电压参考值、输入电压和励磁限制电压， ω 和 φ 为发电机角频率和功角， μ 表示阻尼因子， $L_{temporary}$ 和 L 分别为发电机电抗和暂态电抗， H 为发电机转子惯性， τ 为定子绕组的时间常数。按照上述方式可以得出电力系统中其他模块的数学模型构建结果，通过多模块的连接与组合，得出电力系统数学模型的最终构建结果。

1.2 模拟电力系统混沌振荡过程

在构建的电力系统数学模型下，发电机组调速器和电压崩溃均可能出现混沌现象，此时电力系统的混沌吸引子相图如图 2 所示。

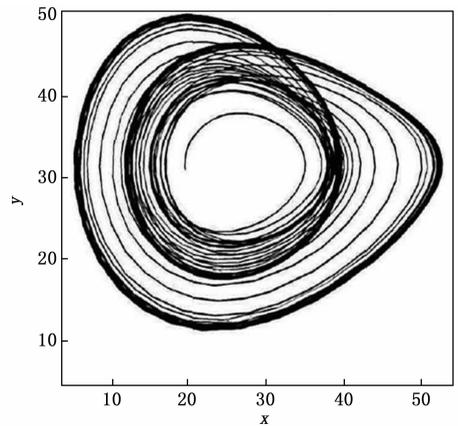


图 2 电力系统的混沌吸引子相图

在只考虑同步发电机转子运动的动态过程的情况下，将存在混沌振荡行为的电力系统表示为：

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{dt} = \omega \\ \frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{Z} P_c \sin\varphi - \frac{\sigma}{Z} \omega + \frac{1}{Z} P_{Mechanics} + \frac{1}{Z} P_c \cos\varphi \end{cases} \quad (2)$$

式中， P_c 和 $P_{Mechanics}$ 分别为电力系统机械与电磁功率， Z 为等值转动惯量， β 为扰动幅度， σ 为等值阻尼系数。公式 (2) 表示的电力系统为耗散系统，利用公式 (3) 计算电力系统的散度值。

$$\lambda = -\frac{\sigma}{\sqrt{P_{Mechanics}/Z}} \quad (3)$$

随着时间的推移，电力系统内的相空间容量会不断缩小，导致总能量因此而改变，当公式 (3) 的计算结果 λ 小于 0，则此时系统发生混沌现象。

1.3 确定混沌小扰动与电力系统混沌振荡的关系

根据电力系统混沌振荡过程的模拟结果可以发现混沌振荡现象的产生与扰动幅度和电磁功率有关，在电磁能量为零时，也就是只有周期负载干扰的情况下，根据干扰幅度的改变，可以将混沌振荡的临界状态表示为：

$$\left| \frac{\frac{4\sigma}{\sqrt{P_{Mechanics}/Z}} - \pi P_{Mechanics}}{\pi \sec\left(\frac{\pi\beta \sqrt{Z}/P_{Mechanics}}{2}\right)} \right| = P'_c < P_c \quad (4)$$

式中, β 表示实际振荡发生时的临界条件。从公式 (4) 中可以看出, 当存在混沌扰动时, 电力系统未达到目标机械功率就会产生混沌振荡现象, 由此证明混沌小扰动的存在会在一定程度上降低电力系统混沌振荡的触发条件, 即混沌小扰动与电力系统混沌振荡之间存在正相关关系。

1.4 计算电力系统混沌振荡信号特征参数

根据电力系统数学模型的构建结果, 结合电力系统混沌振荡的模拟过程, 确定振荡信号的产生位置, 并在该位置上安装传感器设备, 用于采集电力系统的实时混沌振荡信号^[12]。利用安装的传感器设备, 得出任意时刻电力系统混沌振荡信号的采集结果为:

$$r(i) = A \cos[\omega T + \varphi] \quad (5)$$

式中, A 为混沌振荡幅值, T 为振荡周期, 由于电力系统产生的振荡为混沌振荡, 因此参数 T 的取值为随机数, φ 为振荡信号相位, 公式 (5) 的输出结果即为 i 测点位置上的振荡信号的采样结果, 同理可以得出电力系统中其他测点位置上的振荡信号。以初始采集的混沌振荡信号为基础, 从幅值、有效值和频率等方面提取振荡信号的特征参数, 具体的提取过程可以量化表示为:

$$\begin{cases} A = r_{\max} - r_{\min} \\ \psi_{\text{valid}} = \sqrt{\frac{1}{\text{Num}} \sum_{i=1}^{\text{Num}} r_i^2} \\ \psi_f = \frac{\text{Num}}{\Delta t} \end{cases} \quad (6)$$

式中, x_{\max} 和 x_{\min} 表示采集混沌振荡信号中的最大值和最小值, Num 为采集的振荡信号数量, Δt 为采样时间。若电力系统中存在混沌小扰动, 则混沌振荡幅值为扰动与自主振荡的耦合结果, 有效值和频率为扰动与自主振荡的叠加结果。按照上述流程, 得出任意时刻电力系统混沌振荡信号的特征参数计算结果。

1.5 判定电力系统混沌振荡状态

采用特征匹配与条件比对相结合的方式, 判定当前电力系统是否存在混沌振荡状态, 根据电力系统混沌振荡过程的模拟结果, 设置存在混沌振荡现象电力系统的运行信号特征为 ψ_0 , 在考虑特征权重的前提下, 对提取的实时振荡信号特征进行融合处理, 将任意时刻振荡信号的融合特征标记为 $\psi_z(i)$, 那么振荡信号特征的匹配过程如下:

$$s = \frac{\psi_0 \cdot \psi_z(i)}{\|\psi_0\| \|\psi_z(i)\|} \quad (7)$$

将提取的振荡信号特征逐一代入到公式 (7) 中, 即可得出特征匹配结果。若公式 (7) 的计算结果高于阈值 s_0 , 则进入混沌振荡条件比对环节, 否则直接判定当前电力系统不存在混沌振荡现象^[13]。在混沌振荡条件比对过程中, 定义比对参数为 δ , 其函数表达式如下:

$$\begin{cases} \zeta = E_{\text{kinetic}} + E_{\text{potential}} \\ E_{\text{kinetic}} = \frac{1}{2} y^2 \\ E_{\text{potential}} = 1 - \cos x \end{cases} \quad (8)$$

式中, 变量 x 与电力系统相对功角取值相同, 将公式 (3) 的计算结果 λ 赋值给 y , 即可得出电力系统的动能 E_{kinetic} 和势能 $E_{\text{potential}}$ 的计算结果。如果计算 ζ 取值为 2, 则认为当前电力系统存在两条异宿轨道, 计算两条异宿轨道之间的距离, 根据距离计算结果反映电力系统稳定流型和不稳定流型之间的距离, 从而判断当前电力系统是否产生混沌振荡^[14]。经过上述两个环节, 得出电力系统混沌振荡状态的判定结果, 并实现对电力系统实时状态的更新。

1.6 求解电力系统混沌小扰动抑制控制量

提取判定为混沌振荡的所有信号, 利用公式 (9) 计算电力系统混沌小扰动作用下的混沌振荡控制量。

$$\Delta r_{\text{control}} = \sum_{j=1}^{n_{\text{chaos}}} r_j \quad (9)$$

式中, 参数 n_{chaos} 为判定为混沌振荡状态的电力系统信号量, 若混沌振荡状态结果为无振荡, 则控制量求解结果为 0。在已知混沌自主振荡信号特征的情况下, 通过信号重构, 确定初始采集混沌振荡信号中的扰动信号, 电力系统混沌振荡信号中扰动信号的提取过程可以表示为:

$$r^{\text{Disturbance}}(i) = g_{\text{Projection}}(r(i) - g_0) \quad (10)$$

式中, $g_{\text{Projection}}$ 为扰动信号到振荡信号空间的投影算子, g_0 为空间投影标记点。最终将公式 (10) 得出的扰动信号提取结果代入到公式 (9) 中, 即可得出电力系统中混沌扰动信号的抑制量计算结果。

1.7 装设电力系统混沌振荡控制器

考虑电力系统混沌振荡信号特征以及控制指令的作用位置, 优化设计混沌振荡控制器, 图 3 表示的是优化混沌振荡控制器的内部逻辑结构。

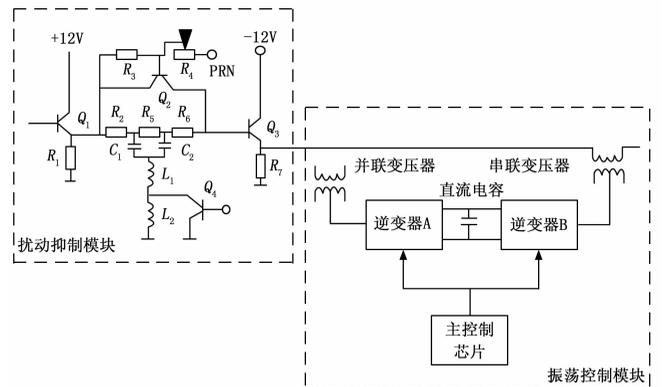


图 3 电力系统混沌振荡控制器逻辑结构图

从图 3 中可以看出, 优化设计的电力系统混沌振荡控制器主要由小扰动抑制元件和振荡控制元件两部分组成, 其中扰动抑制元件主要为信号滤波元件, 根据滑动变阻器的调节, 能够实现低频扰动信号和低频扰动信号抑制目标的切换^[15]。利用图 3 表示混沌振荡控制器, 将电力系统的实时运行信号与控制量计算结果输入其中, 生成的混沌振荡控制指令可以量化表示为:

$$\gamma = r \otimes \frac{\kappa_{inhibition} f_{core}}{\Delta r_{control} + f_{core}^2} \quad (11)$$

式中， $\kappa_{inhibition}$ 和 f_{core} 分别为工作状态下控制器的中心频率和扰动抑制系数^[16]。为保证控制器输出的控制指令能够根据电力系统的实际运行状态发生相应的动态变化，在控制器内部加设一个微分跟随器，微分跟随器的工作原理可以表示为：

$$b_1 = b_2 = -G \operatorname{sign}\left(b_1 - v_{follow}(t) + \frac{b_2 b_2}{2G}\right) \quad (12)$$

式中， G 为微分跟随器的工作系数， $v_{follow}(t)$ 为有界可积输入信号， b_1 和 b_2 为扰动抑制和振荡控制的输出信号。利用供电电源电路，实现微分跟随器与控制、抑制元件的连接，保证电力系统混沌振荡控制指令的动态更新。

1.8 利用混沌小扰动抑制技术限制混沌振荡幅值

在混沌振荡控制器的支持下，利用混沌小扰动抑制技术，将电力系统中的混沌振荡幅值限制至更小状态。图 4 表示的是混沌小扰动抑制技术的工作原理。

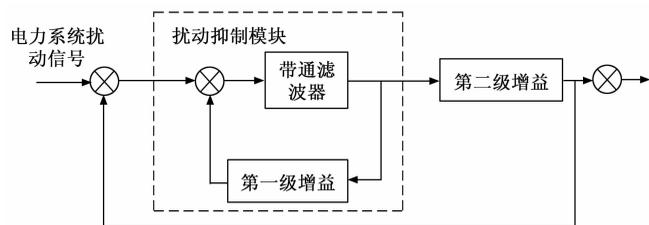


图 4 混沌小扰动抑制技术原理图

在实际的混沌振荡幅值限制操作过程中，混沌小扰动抑制技术的运行可以分为增益、隔直、相位补偿三个步骤，小扰动增益的目的是对振荡信号进行放大，若混沌振荡控制量高于阈值 Δr_0 ，则按照临界增益的 1/3—1/5 整定，否则振荡信号增益比例为 1/2。隔离环节主要用于抑制直流漂移信号对电压调节器的影响，而相位补偿环节一般由一到三级超前滞后单元组成，上述两个环节的传递函数如下：

$$\begin{cases} \zeta_{\text{Septum rectum}}(r) = \frac{\tau_{\text{Septum rectum}} r}{1 + \tau_{\text{Septum rectum}} r} \\ \zeta_{\text{phase}}(r) = \left(\frac{1 + \tau_{\text{lagging}1} r}{1 + \tau_{\text{lagging}2} r}\right)^{n_{\text{c}}} \end{cases} \quad (13)$$

式中， $\tau_{\text{Septum rectum}}$ 为隔直环节时间常数， $\tau_{\text{lagging}1}$ 和 $\tau_{\text{lagging}2}$ 均为超前滞后时间常数， n_{c} 表示超前滞后单元个数。在实际振荡幅值限制过程中，将一阶超前滞后装置或两个超前迟滞环节串联起来，则可以达到该补偿的目的。而在常规电力系统中，滞后角度为 $30 \sim 160^\circ$ 时，需用三个超前延迟链串联^[17]。最终将电力系统混沌振荡幅值的抑制输出限制在给定的限制范围内，从而防止在小扰动情况下产生过大振荡信号，即将电力系统实际产生的混沌振荡幅值限制在规定的范围内。

利用装设的混沌振荡控制器，在完成混沌小扰动抑制后，利用微分跟随器对当前电力系统的振荡信号进行重新检测，判断扰动抑制后是否能够完成对混沌振荡的控制操

作，若电力系统依旧存在混沌振荡，则需要驱动控制器中的振荡控制元件，选择的控制律为：

$$\begin{cases} u_1 = -10e_1 - e_2 \\ u_2 = \zeta \sin r_i - 20e_2 \end{cases} \quad (14)$$

式中， e_1 和 e_2 分别表示水平和竖直方向上的混沌振荡控制偏差， ζ 为电力系统电磁功率与等值转动惯量的比例系数，公式 (14) 得出的控制律即为电力系统的控制输入^[18]。按照上述流程，反复执行小扰动抑制和振荡控制操作，并观测一次控制任务执行结束后，电力系统的实际混沌振荡是否与控制目标一致，若不一致则更新控制指令，继续执行新的控制任务，若一致，则直接退出混沌振荡控制程序，完成电力系统的混沌振荡控制任务。

2 控制性能测试实验分析

以测试优化设计基于混沌小扰动抑制的电力系统混沌振荡控制方法的控制性能为目的，设计性能测试实验，此次实验的基本原理是：利用混沌扰动器和振荡器将配置的电力系统调整至混沌振荡状态，并产生相应的振荡信号。在该背景下，设置混沌振荡控制目标，生成相应的控制任务。在实验环境下开发优化设计控制方法，在该方法的控制作用下，观察电力系统中振荡信号的变化情况，通过与混沌振荡控制目标的对比，判断优化设计混沌振荡控制方法是否能够达到预期效果。

2.1 配置电力系统测试环境

此次实验选择的电力系统为某市中心区域的供电与用电系统，内部包含发电机、变压器、用电设备等多个组成元件，其中发电机为 OB6500JK 型号的汽油发电机，其输出电压为 380 V，输出功率约为 500 kW/h。根据电力系统中用电设备的实际用电需求，分别装设 S7-315/10、SJL-1000/10 和 SFPZ9-120000/110 三种类型的变压器，变压器的装设数量由用电设备及其分布结构确定，经过数据统计选择电力系统中变压器的装设总数量为 174 个^[19-21]。为保证电力系统的运行安全，从而为混沌振荡控制性能测试实验提供稳定的实验环境，需要在电力系统环境中装设主保护、后备保护、异常运行保护等自动保护装置。

2.2 装设混沌振荡器

装设混沌振荡器的目的是将电力系统调整至混沌振荡状态，满足优化设计控制方法的启动条件。混沌振荡器的内部电路如图 5 所示。

混沌振荡器由频变负电阻和 LDC 并联回路构成。二极管的切换状态是由电容 C 两端的电压决定的，当二极管被加到负电压时，二极管不是完全开断，它只是一个“电容”，它的两端的电压正比于电流的变化速率^[22-24]。通过负电阻器提供的频率，

再由电路输出混沌振荡信号。在装设的混沌振荡器中加设一个小扰动器，并将其作为振荡信号的驱动元件。将准备的混沌振荡器安装在电力系统发电机设备上，采用人为控制的方式确定内部二极管的开关状态，保证混沌振荡

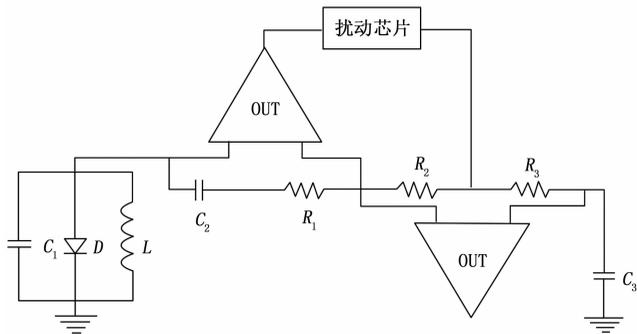


图 5 混沌振荡器内部电路图

器作用下能够生成相应的振荡信号样本。

2.3 收集电力系统混沌振荡信号样本

同时启动配置的电力系统和混沌振荡器，在设备启动 2 分钟后，利用电力系统中内置的传感器设备收集运行信号，以此作为电力系统的混沌振荡信号样本。图 6 表示的是部分电力系统混沌振荡信号的采集结果。

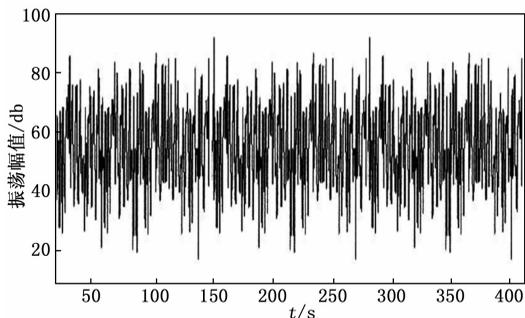


图 6 电力系统混沌振荡信号波形图

从图 6 中可以直观地看出，无控制状态下，电力系统混沌振荡信号的振荡幅值。通过调整混沌振荡器的工作参数生成多组信号样本。

2.4 生成电力系统混沌振荡控制任务

电力系统混沌振荡控制的最终目的是实现混沌振荡的消除，因此所有组别的控制任务均为：

$$\begin{cases} A_{\text{target}} = 0 \\ f_{\text{target}} = 0.02 \end{cases} \quad (15)$$

式中， A_{target} 和 f_{target} 分别表示混沌振荡幅值和频率的控制目标。综合考虑电力系统的初始混沌振荡信号和控制目标，生成多组控制任务。

2.5 描述控制性能测试实验过程

利用编程工具对优化设计的基于混沌小扰动抑制的电力系统混沌振荡控制方法进行开发。将优化设计控制方法直接接入到配置的电力系统中，并将控制器安装到电力系统中。在实验开始之前，首先需要对控制器设备进行调试，随机生成控制指令，观察电力系统中的硬件设备是否能够按照控制指令执行相应操作。在硬件调试成功后，将生成的控制任务逐一输入控制方法中，经过特征参数计算、控

制量计算、振荡幅值限制等步骤，完成混沌振荡控制。图 7 为控制任务 1 的执行结果。

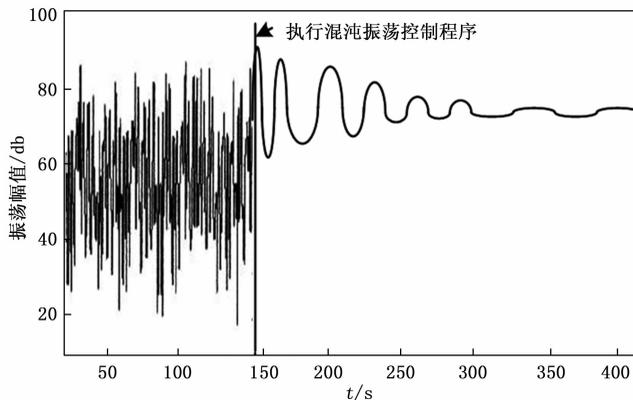


图 7 电力系统混沌振荡控制结果

从图 7 中可以看出，在电力系统运行的第 150 s 运行控制任务，并在 150 s 后混沌振荡信号呈现出明显的下降趋势，并在第 300 s 趋于稳定。按照上述方式得出实验中其他振荡控制任务的执行结果。为了体现出优化设计方法在控制性能方面的优势，设置文献 [9] 提出的基于全局滑模时滞的电力系统混沌振荡控制方法和文献 [10] 提出的基于浸入与不变原理的电力系统混沌振荡分析与控制方法作为实验的对比方法，重复上述操作完成对比方法的开发与运行。

2.6 设置控制性能量化测试指标

此次实验分别从幅值和频率两个方面进行控制性能测试，设置振荡幅值控制误差和振荡频率控制误差作为实验的测试指标，其中振荡幅值控制误差的数值结果如下：

$$\epsilon_A = A_{\text{actual}} - A_{\text{target}} \quad (16)$$

式中， A_{actual} 为控制方法作用下电力系统的实际混沌振荡幅值，实验中选择信号稳定后的幅值作为 A_{actual} 的具体取值，从公式 (14) 中可以看出 A_{target} 取值为 0，因此控制作用下电力系统的实际混沌振荡幅值即为控制误差。另外振荡频率控制误差的测试结果为：

$$\epsilon_f = \left| \frac{1}{T_{\text{actual}}} - f_{\text{target}} \right| \quad (17)$$

式中， T_{actual} 为控制作用下信号的振荡周期。最终计算得出幅值和频率的控制误差越小，证明对应方法的控制性能越优。

2.7 性能测试实验结果与分析

通过相关数据的统计，得出电力系统混沌振荡控制性能的测试对比结果，如表 1 所示。

将表 1 中的数据分别代入到公式 (16) 和公式 (17) 中，计算得出对比振荡控制方法的振荡幅值控制误差的平均值为 3.59 db 和 3.14 db，平均振荡频率控制误差分别为 0.04 Hz 和 0.03 Hz，优化设计方法振荡幅值和频率的平均控制误差分别为 1.8 db 和 0.02 Hz。

表1 电力系统混沌振荡控制性能测试数据表

实验组别	执行基于全局滑模时滞的电力系统混沌振荡控制方法		执行基于浸入与不变原理的电力系统混沌振荡分析与控制方法		执行基于混沌小扰动抑制的电力系统混沌振荡控制方法	
	振荡幅值/db	振荡周期/Hz	振荡幅值/db	振荡周期/Hz	振荡幅值/db	振荡周期/Hz
1	4.1	40	3.7	40	2.2	50
2	3.6	20	3.4	40	1.8	40
3	3.9	20	3.2	40	1.6	50
4	3.4	40	3.0	20	2.4	50
5	3.8	20	3.5	20	2.1	50
6	3.2	20	2.8	40	1.5	50
7	3.4	40	2.6	40	1.7	40
8	3.3	20	2.9	40	1.3	50

3 结束语

混沌振荡是电网系统发散振荡解列现象的前兆,所以在电网出现过度混沌振荡时,采用合适的控制方法来消除其影响是非常有意义的。在此次研究中利用混沌小扰动抑制技术对电力系统混沌振荡控制方法进行优化,进而达到对混沌振荡信号精准控制的目的。实验结果表明,基于混沌小扰动抑制的电力系统混沌振荡控制方法的控制误差更小,控制性能更高,因此具有更高的应用价值。然而此次控制性能测试实验中,在混沌振荡器作用下产生的振荡信号均为高频信号,缺少对低频振荡信号控制性能的测试结果,因此得出的实验结果存在一定的局限性,需要在今后的研究工作中进一步补充。

参考文献:

- [1] 颜闽秀, 徐 辉. 新分数阶混沌系统的电路设计和同步控制[J]. 兰州理工大学学报, 2021, 47 (1): 105-112.
- [2] 于 森, 李京霖. 基于状态反馈解耦控制的含DFIG电力系统低频振荡抑制研究[J]. 可再生能源, 2022, 40 (2): 214-221.
- [3] 王江彬, 刘 凌, 刘崇新. 七阶电力系统混沌振荡的动态面滑模控制[J]. 电机与控制学报, 2021, 25 (4): 1-8.
- [4] 齐国元, 郭曦彤. 基于滑模方法的小型无人直升机混沌振荡控制[J]. 控制工程, 2021, 28 (4): 672-680.
- [5] 于蓉蓉, 谢 勇, 尚云艳. 具有复杂振荡模式电路系统的数值分析研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2021, 34 (3): 367-372.
- [6] 李小腾, 王江彬, 刘崇新, 等. 四阶混沌电力系统的全局快速滑模控制器设计[J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (24): 10298-10303.
- [7] 卢英东, 韦笃取. 基于遗传注意力机制的DLSTM电力系统混沌预测[J]. 计算物理, 2022, 39 (3): 371-378.
- [8] 王家斌, 于永进, 阎振坤, 等. 基于自适应非奇异终端滑模控制的电力系统混沌抑制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49 (7): 120-126.
- [9] 杨 洋, 于永进, 王云飞. 基于全局滑模时滞的电力系统混沌振荡控制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49 (15): 59-67.
- [10] 王定胜, 张宏立, 王 聪, 等. 基于浸入与不变原理的电力系统混沌振荡分析与控制[J]. 振动与冲击, 2022, 41 (4): 142-149.
- [11] ZHANG K, FAN J W, TUNG C P, et al. Conducted EMI suppression using power semiconductor filter with dynamic ramp modulation to regulate series pass device voltage [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 36 (6): 6608-6623.
- [12] 高 晗, 蔡国伟, 杨德友, 等. 基于NExT-DMD的电力系统机电振荡参数提取[J]. 电网技术, 2022, 46 (1): 284-291.
- [13] 李 雪, 于 洋, 姜 涛, 等. 基于最优变量投影的电力系统主导振荡参数综合辨识[J]. 电工技术学报, 2022, 37 (1): 165-178.
- [14] 苏国贇, 杜文娟, 王海风. 并联感应电动机聚合负荷引起含双馈风电场电力系统振荡研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41 (6): 2125-2136.
- [15] 陈露洁, 徐式蕴, 孙华东, 等. 高比例电力电子电力系统宽频带振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41 (7): 2297-2310.
- [16] 王雨虹, 许 可, 刘晓东. 基于RDT和STD的电力系统次同步振荡参数辨识[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33 (1): 100-106.
- [17] 赵 妍, 赵 起, 张劲松, 等. 改进PNN神经网络在电力系统次/超同步振荡监测中的应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43 (5): 76-83.
- [18] 管 飞, 黄永章, 杨 鑫, 等. 光伏经新能源同步机并网小干扰模型及次同步振荡抑制作用[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2022, 49 (1): 58-67.
- [19] 刘 铨, 王 旭, 蔡国伟, 等. 基于负荷模式能量的电力系统低频振荡抑制策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42 (7): 229-235.
- [20] 冯 双, 崔 昊, 陈佳宁, 等. 人工智能在电力系统宽频振荡中的应用与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41 (23): 7889-7905.
- [21] 左兆伦, 俞 翔, 李 爽, 等. 基于混沌同步与迁移控制的隔振系统线谱控制方法[J]. 振动与冲击, 2021, 40 (16): 245-252.
- [22] 江 元, 李晓明, 尚云飞. 基于混沌序列的电力营销数据去隐私化加密方法研究[J]. 微型电脑应用, 2022, 38 (2): 109-112115.
- [23] 徐 敏, 康 哲, 刘早富. 基于观测器的混沌电力系统PI固定时间自适应滑模控制[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50 (19): 146-157.
- [24] 李 虹, 张冲默, 丁宇行, 等. 基于混沌脉宽调制的有源EMI滤波器高频抑制效果优化设计方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42 (13): 4642-4651.