

基于波波夫谐波线性化的简化水电系统 切换型频率振荡的近似分析

王嘉伟¹, 熊鸿韬², 杨滢³, 刘晓博¹, 张建承², 庄文彬¹, 华文², 薛安成^{1*}

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;

2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江省 杭州市 310014;

3. 国网浙江省电力有限公司调度控制中心, 浙江省 杭州市 310007)

Approximation of Switching-type Frequency Oscillation in the Simplified Hydropower System Based on Popov Harmonic Linearization

WANG Jiawei¹, XIONG Hongtao², YANG Ying³, LIU Xiaobo¹, ZHANG Jiancheng²,
ZHUANG Wenbin¹, HUA Wen², XUE Ancheng^{1*}

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Source (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Province Electric Power Company, Hangzhou 310014, Zhejiang Province, China; 3. Electric Power Dispatching and Control Center of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: As the describing function method could not directly approximate the switching-type frequency oscillation (ST-FO) of the single-hydropower-generator power system (SHG-PS) with external disturbance input, this paper proposed an approximation analysis method based on improved Popov harmonic linearization. First, the model of SHG-PS with switch, i.e. dead zone and limit, under load disturbance, i.e. external input, and the ST-FO phenomenon with center shifting were introduced. Second, the limitation of describing function method to the system with external input and the deficiency of traditional Popov harmonic linearization were analyzed. Then, combined with the roughly symmetry of the stable limit cycle, i.e. ST-FO, with respect to the unstable equilibrium point, and judgment of the switch engaged in the oscillation, an improved Popov harmonic linearization approximation analysis method was proposed. Furthermore, taking the unilateral dead zone function as an example, the specific implementation of the proposed improved Popov harmonic linearization was introduced. Finally, the effectiveness of this method was verified in various ST-FOs of SHG-PS.

KEY WORDS: switching-type oscillation; dead zone; limit; Popov harmonic linearization; limit cycle

摘要: 针对描述函数法无法直接近似分析有外部扰动输入的单机简化水电系统切换型频率振荡的问题, 提出一种基于改进波波夫谐波线性化的近似分析方法。介绍含死区和限幅切换环节的单机系统在有负荷扰动(外部输入)下的模型及其有中心偏移的切换型频率振荡现象; 分析描述函数近似分析对具有外部输入系统的局限性和传统波波夫谐波线性化方法的不足; 结合稳定极限环(切换型振荡)关于不稳定平衡点基本对称的现象, 判断振荡时起作用的切换环节, 提出一种改进的波波夫谐波线性化近似分析方法; 以单边死区作用为例, 介绍改进波波夫谐波线性化的具体实施方法。在单机简化水电系统的各类切换型振荡中验证方法的有效性。

关键词: 切换型振荡; 死区; 限幅; 波波夫谐波线性化; 极限环

0 引言

近几年, 水电机组高占比电网中出现了多次和调频相关的超低频频率振荡, 严重威胁了电网安全^[1-6]。

根据振荡的数学表征不同, 可将超低频频率振荡分为负阻尼振荡、光滑的强迫振荡和非光滑的切换型振荡^[7]。负阻尼振荡和光滑的强迫振荡对应于光滑动力系统负阻尼或者弱阻尼(平衡点的稳定性)

基金项目: 国网浙江省电力公司科技项目: 大受电背景下基于暂态响应的差异化网源协调控制优化技术研究(5211DS200086)。

State Grid Zhejiang Province Electric Power Company Science and Technology Project: Research on the Optimization Technology of Coordinated Control of Differentiated Grid Sources Based on Transient Response Under the Background of Large Power Reception (5211DS200086).

下的光滑振荡,而切换型振荡对应的是非光滑动力系统中死区、限幅或控制等切换环节参与的非光滑振荡。

目前,对于水电高占比系统,发现了3种不同类型的切换型超低频频率振荡:一是具有稳定平衡点(局部正阻尼)的系统在严重扰动下初值偏离平衡点较远时出现的切换型振荡^[8];二是在小扰动或者一般大扰动下,故障后具有不稳定平衡点(局部负阻尼)的系统轨线发散时,死区或限幅切换参与作用形成的切换型振荡^[9];三是故障后系统无平衡点时的切换型振荡^[10]。切换型振荡和平衡点局部性质无明显对应关系,是一种大范围的振荡。

值得注意的是,文献[8-10]仅从仿真角度,简单分析了死区或限幅起作用的切换型振荡现象和对应的非光滑分岔特性,未有理论近似分析。文献[11-14]针对第一类正阻尼和极端大扰动下(无外部输入)的切换型振荡,应用描述函数法近似分析了系统的稳定性和振荡特性。但是,描述函数法是基于系统无外部输入的假设,无法直接分析有外部输入系统的第二类/第三类切换型振荡^[15]。

另一方面,波波夫谐波线性化理论可近似分析含外部输入的系统振荡^[16-17]。但是,目前暂未见到使用波波夫谐波线性化方法分析水轮机调速器参与的超低频频率振荡的有关报道。此外,在含死区

和限幅多切换环节的系统中,传统波波夫谐波线性化方法需要分别假设可能起作用的切换环节,计算较为繁琐^[18],直接应用有一定困难。

有鉴于此,本文针对有外部输入的单机简化水电系统的切换型频率振荡,提出了一种改进的波波夫谐波线性化近似分析方法。本文的主要工作为:

1)建立了负荷扰动(有外部输入)下分析超低频频率振荡的单机系统的传递函数模型,分析了其有中心偏移的切换型频率振荡现象。

2)提出了一种改进的波波夫谐波线性化近似分析方法,并在单机简化水电系统中验证了各种情形下所提方法的有效性。

1 有外部输入单机系统模型及其振荡现象

当系统发生超低频频率振荡时,所有机组的频率同调振荡,可将多机系统建立成统一频率模型,等值为单机系统进行简化分析^[19]。因此,本文选择在单机简单系统中进行理论分析和仿真验证。

1.1 有外部输入的单机系统模型

文献[8]介绍了含死区和限幅切换环节的单机系统在无外部输入时的模型。本文在此基础上,进一步讨论有外部输入(负荷扰动)下,单机简化水电系统的传递函数框图,如图1所示。

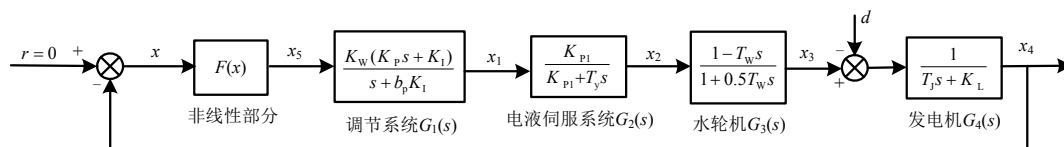


图1 有外部输入的单机系统传递函数框图

Fig. 1 Block diagram of the transfer function of stand-alone system with external input

图1中,各变量与文献[8]一致。不同的是,新增了一个外部输入变量 d ,代表的是负荷扰动($d=P_L-P_{L0}$), d 的位置和符号是由转子运动方程推导而得^[20]。

图1中的非线性部分为一次调频死区和限幅切换环节,其输入输出关系如式(1)和图2。

$$F(x) = \begin{cases} -\lambda + \varepsilon, & x \leq -\lambda \\ x + \varepsilon, & -\lambda < x < -\varepsilon \\ 0, & -\varepsilon < x < \varepsilon \\ x - \varepsilon, & \varepsilon < x < \lambda \\ \lambda - \varepsilon, & x \geq \lambda \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 为切换环节的输入(频率偏差的负值),即 $x=-(\omega-\omega_0)$; ε 和 λ 分别代表死区和限幅的大小。

含有死区和限幅切换环节的单机系统是分段

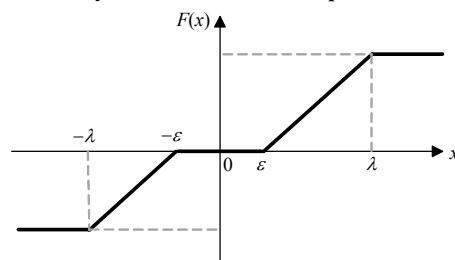


图2 死区和限幅切换环节

Fig. 2 Switch of dead zone and limit

光滑动力系统(非光滑系统)^[21]。其包含上死区边界 ε 、下死区边界 $-\varepsilon$ 、上限幅边界 λ 和下限幅边界 $-\lambda$ 共4个切换边界^[9]。

1.2 有外部输入的切换型频率振荡现象

对于无外部输入系统的切换型频率振荡,具有中心为额定频率,无中心偏移量的特征,可用描述

函数法来近似分析^[12-14]。但是, 故障或扰动可能造成稳态频率偏离额定频率。如单机系统采用如下典型参数: $K_W=1.1$, $K_P=5$, $K_I=1$, $K_{PI}=40$, $b_p=0.03$, $T_y=13.86s$, $T_j=10s$, $K_L=1.5$, $T_W=1.6s$, $\varepsilon=0.0008$, $\lambda=0.0108$ (本文变量取值, 除特别说明, 均为标么值), 系统初始运行在稳定平衡点, 考虑负荷 P_L 由额定值 1 增加到 1.1pu, 即相当于在原系统注入一个 0.1pu 负荷的外部输入。此时, 单机系统将发生最终仅单边死区起作用(穿越上死区边界)的切换型频率振荡^[9]。振荡时, 系统频率偏差的负值 x (切换环节的输入)如图 3 所示。

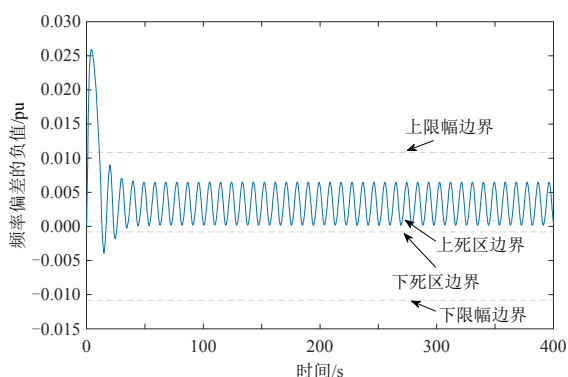


图 3 有外部输入时频率偏差的负值

Fig. 3 Negative value of frequency deviation with external input

图 3 表明, 有外部输入时, 单机系统的频率振荡会偏离额定频率, 导致切换环节的输入信号(即频率偏差的负值)不再关于中心 0 奇对称, 而是正弦信号叠加一个恒定的中心偏移量, 可表示为

$$x(t) = a \sin \omega t + x^0 \quad (2)$$

式中: a 为振幅; ω 为振荡角频率; x^0 为恒定的中心偏移量(不变分量)。

2 有外部输入的近似分析方法

由 1 节分析可知, 分析有外部输入系统中存在的稳定振荡, 需要求解振幅 a 、振荡角频率 ω 、中心偏移 x^0 这 3 个未知量。

2.1 描述函数法的局限性

描述函数法是一种频域角度近似非线性环节方法, 可获得针对固定频率信号下输入输出特性。

具体的, 对某非线性环节, 假设输入信号 $x(t) = a \sin \omega t$ (无外部输入时系统无中心偏移), 其输出 $y(t)$ 忽略高阶项后的傅里叶级数展开为

$$y(t) \approx A_0 + A_1 \sin \omega t + B_1 \cos \omega t = A_0 + Y_1 \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (3)$$

式中: A_0 为非周期分量; A_1 、 B_1 分别为一次谐波正

弦和余弦分量的幅值; Y_1 和 φ_1 分别为输出信号相应的幅值和相位。则该非线性环节的描述函数 $N(a)$ 可表示为稳态输出中一次谐波分量和输入正弦信号的复数比, 即如式(4)所示。

$$N(a) = |N(a)| e^{j\angle N(a)} = \frac{Y_1}{a} e^{j\varphi_1} \quad (4)$$

对于输入输出特性是奇对称的死区和限幅切换环节(图 2), 其输出也是奇对称的, 故相应的傅里叶级数展开近似中 $A_0=0$, $\varphi_1=0$, 即死区和限幅切换环节的描述函数 $N(a)$ 仅为幅值 a 的函数, 其分段表达式^[15]为

$$N(a) = \begin{cases} 0, & a \leq \varepsilon \\ \frac{2}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{\varepsilon}{a} - \frac{\varepsilon}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon}{a}\right)^2} \right], & \varepsilon < a \leq \lambda \\ \frac{2}{\pi} \left[\arcsin \frac{\lambda}{a} - \arcsin \frac{\varepsilon}{a} + \frac{\lambda}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{a}\right)^2} - \frac{\varepsilon}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon}{a}\right)^2} \right], & a > \lambda \end{cases} \quad (5)$$

进一步, 通过求解负倒特性曲线 $-1/N(a)$ 和系统的开环频率特性曲线 $G_0(j\omega)$ 的交点, 便可获得稳定振荡的信息(振荡频率 ω 和幅值 a)^[15]。

然而, 有外部输入的单机系统振荡时, 其切换环节的输入信号为正弦信号叠加一个恒定的中心偏移量 $x(t) = a \sin \omega t + x^0$ 。此时, 切换环节的输出近似中含有非周期分量(即 $A_0 \neq 0$), 且近似的一次谐波幅值 Y_1 与中心偏移 x^0 有关, 故切换环节的描述函数 $N(a, x^0)$ 是输入振幅 a 和中心偏移 x^0 的函数。

因此, 在中心偏移 x^0 未知时, 无法通过负倒特性曲线 $-1/N(a, x^0)$ 和系统的开环频率特性曲线 $G_0(j\omega)$ 的交点求解振荡频率和幅值, 即无法通过式(6)所示的两个方程求解 3 个未知量。

$$\begin{cases} \operatorname{Re}[G_0(j\omega)] = \operatorname{Re}\left(\frac{-1}{N(a, x^0)}\right) \\ \operatorname{Im}[G_0(j\omega)] = \operatorname{Im}\left(\frac{-1}{N(a, x^0)}\right) \end{cases} \quad (6)$$

综上, 描述函数法主要用来分析外部输入为 0 时, 非光滑系统的稳定性和振荡问题; 当系统具有外部输入, 并造成切换环节的输入为正弦信号叠加一个恒定的中心偏移量时, 传统描述函数法将无法完成近似分析。

2.2 传统的波波夫谐波线性化方法

波波夫谐波线性化是一种基于描述函数法的非光滑系统有外部输入时振荡的分析方法^[16]。该方

法允许切换环节的输入端包含周期分量(正弦信号)和不变分量(中心偏移量),并分别列写不变分量方程和周期分量方程,最终将分别计算的不变分量和周期分量合起来作为振荡值。

假设外部输入引起切换环节的输入变量(频率偏差的负值)为

$$x = x^o + x^* = x^o + a \sin \omega t$$

(7)

式中: x^o 为不变分量; $x^* = a \sin \omega t$ 为周期分量。则切换环节的输出近似 $F(x)$ 中不仅包括了周期分量,还包括了不变分量,如式(8)所示。

$$\begin{cases} F(x) = F^o(x^o, a) + [q(x^o, a) + j q'(x^o, a)] x^* \\ F^o(x^o, a) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(x^o + a \sin \psi) d\psi \\ q(x^o, a) = \frac{1}{\pi a} \int_0^{2\pi} F(x^o + a \sin \psi) \sin \psi d\psi \\ q'(x^o, a) = \frac{1}{\pi a} \int_0^{2\pi} F(x^o + a \sin \psi) \cos \psi d\psi \end{cases}$$

(8)

对于本文含死区和限幅多切换环节的非光滑系统,在某一外部输入下,系统振荡时起作用的切换环节无法直接确定,存在多种可能的组合情况(如图 4 所示,包含仅单边死区作用、仅上界限幅作用、单边死区和上界限幅同时作用等情况)。在不同的切换环节作用下,会有不同的切换环节输出近似 $F(x)$,传统的波波夫谐波线性化方法在某一外部输入下,分别假设可能起作用的切换环节,计算量较大,不能直接得到正确结果。

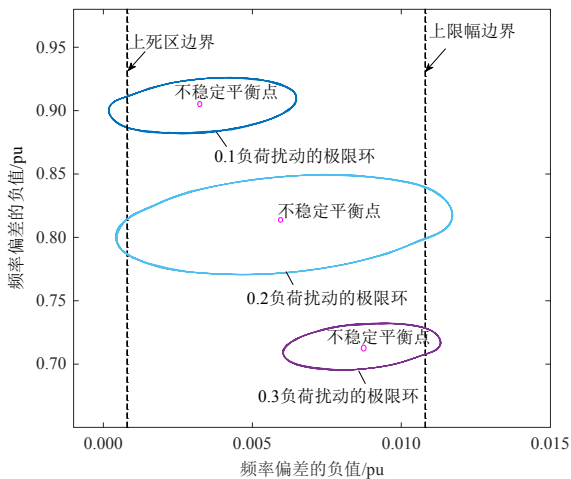


图 4 不同负荷扰动下的极限环

Fig. 4 Limit cycles under different load disturbances

2.3 改进的波波夫谐波线性化方法

本节基于仿真中发现的规律,预判切换型频率振荡时起作用的切换环节,提出一种改进的波波夫谐波线性化方法。

2.3.1 切换型频率振荡的特征规律

在不同的负荷扰动下,单机系统的跨边界极限环(对应切换型频率振荡)如图 4 所示,在频率偏差的负值 x 上的振荡和平衡点情况如表 1 所示^[9]。

表 1 不同扰动后的频率振荡和平衡点情况

Table 1 Frequency oscillations and equilibrium points after different disturbances

负荷扰动 d	x 的振荡区间	振荡幅值的均值	不稳定平衡点
0.1	0.0002~0.0064	0.0033	0.0034
0.2	0.0004~0.0117	0.0060	0.0060
0.3	0.0060~0.0113	0.0086	0.0086

图 4 和表 1 表明:

1) 在不同的负荷扰动下,系统中存在的稳定极限环都包围了一个不稳定的平衡点,且在频率偏差的负值 x 上,振荡幅值的均值(中心偏移量)和不稳定平衡点基本重合,即极限环关于不稳定平衡点基本对称。

2) 在不同的负荷扰动下,极限环穿越的切换边界可能不同(对应着振荡时起作用的切换环节不同)。当不稳定平衡点(接近稳定极限环的中心)离死区/限幅边界较近时,则稳定极限环可能仅穿越死区/限幅边界;当平衡点在死区和限幅边界的中间位置时,则极限环可能同时穿越死区和限幅边界。

进一步,仿真遍历各种可能的负荷扰动(系统会发生切换型频率振荡)^[9],切换型频率振荡(极限环)的特征仍然满足上述 2 条规律,具体结果如表 2 所示。

表 2 各种负荷扰动下的平衡点和极限环情况

Table 2 Equilibrium point and limit cycle under various load disturbances

负荷扰动	平衡点		极限环	
	频率偏差负值	靠近的边界	中心	穿越的边界
0.0012< $d \leq 0.17$	0.0008< x ≤ 0.0052	上死区边界	0.0008< x ≤ 0.0052	上死区边界
0.17< d ≤ 0.20	0.0052< x ≤ 0.0060	上死区边界和上限幅边界的中间位置	0.0052< x ≤ 0.0060	上死区边界+ 上限幅边界
0.20< d ≤ 0.3829	0.0060< x ≤ 0.0108	上限幅边界	0.0060< x ≤ 0.0108	上限幅边界

注:外部扰动输入为负荷减小时,极限环穿越下死区/限幅边界的情况类似。

因此,利用波波夫谐波线性化方法分析负荷扰动后系统中存在的振荡信息时,可以先求解负荷扰动后系统的不稳定平衡点,通过其与各切换边界的距离远近关系,直接假设起作用的切换环节,减少计算分析的工作量。

2.3.2 改进方法的步骤

综合上小节分析, 对于含死区和限幅切换环节的非光滑单机系统, 在某一负荷扰动后系统中存在的穿越边界极限环(对应切换型频率振荡)可通过如下步骤, 进行近似分析(图 5)。

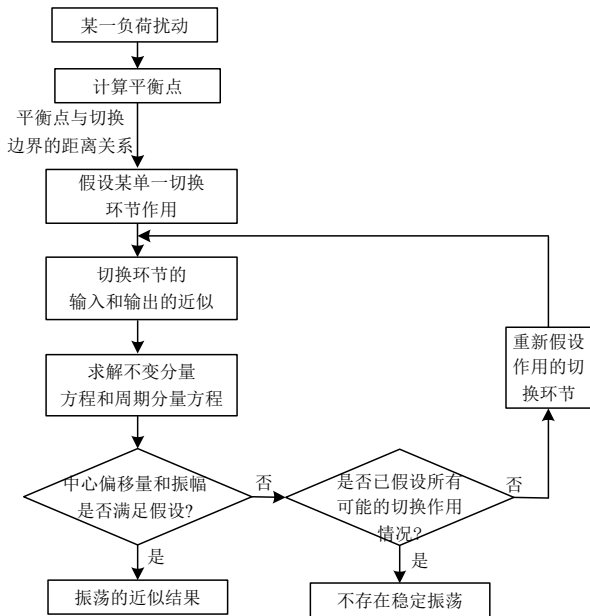


图 5 切换型振荡的近似分析流程

Fig. 5 Approximate analysis processes for switching-type oscillations

步骤 1: 计算负荷扰动后的平衡点, 根据其切换边界的距离关系, 优先假设振荡时某一切换环节起作用, 即若平衡点离上死区边界/上限幅边界的距离较小, 则优先假设振荡时上死区边界/上限幅边界起作用;

步骤 2: 根据起作用的切换环节和输入表达式, 计算输出的谐波近似;

步骤 3: 联立不变分量方程和周期分量方程, 求解振荡信息;

步骤 4: 根据求得的中心偏移量和振幅判断是否满足穿越边界的假设, 若符合, 则计算结果为近似振荡信息; 若不符合, 则判断是否已假设所有可能的切换作用情况;

步骤 5: 若未假设所有可能的切换作用情况, 则重新假设起作用的切换环节, 优先考虑作用的切换环节增多, 如原先假设仅上死区边界作用变为假设上死区和上限幅边界同时作用; 若已假设所有可能的切换作用情况, 则认为系统不存在稳定振荡, 结束分析。

当负荷扰动(外部输入)为 0 时, 不变分量方程和中心偏移等非周期分量都为 0, 即为基于描述函

数的近似分析方法。因此, 本文提出的近似分析方法适用于第一类和第二类切换型振荡。

对于第三类无平衡点时的切换型振荡, 其振荡波形复杂, 不能用特定的数学表达式描述^[10], 故无法直接应用本文方法进行分析。第三类切换型振荡的近似分析方法, 还需进一步研究。

3 上死区作用时的具体实施方法

本节以某一负荷扰动后, 系统的不稳定平衡点离上死区边界较近(即振荡时上死区起作用)为例, 对本文所提的改进波波夫谐波线性化的具体实施方法进行说明。其他情形, 同理可得。

对于图 1 所示的单机简化水电系统, 以负荷 P_L 由额定值 1 增加到 1.1pu 为例, 即相当于在原系统注入一个 0.1pu 负荷的外部输入。在 1.2 节系统参数下, 计算^[9]可得系统的不稳定平衡点在频率偏差的负值上为 0.0034pu, 离上死区边界较近。

因此, 假设系统发生切换型频率振荡时, 切换环节的输入的示意图如图 6 所示(仅上死区作用)。

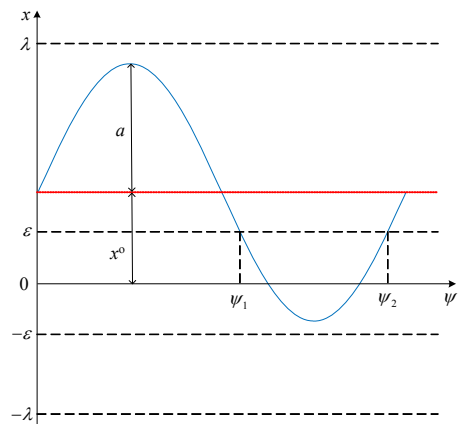


图 6 仅上死区作用的输入示意图

Fig. 6 Input schematic diagram with only upper dead zone function

根据式(1), 此时切换环节的实际输出为

$$F(x^0 + a \sin \omega t) = \begin{cases} x^0 + a \sin \omega t - \varepsilon, & 0 \leq \omega t < \psi_1 \\ 0, & \psi_1 \leq \omega t \leq \psi_2 \\ x^0 + a \sin \omega t - \varepsilon, & \psi_2 < \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (9)$$

进一步, 根据式(8), 将切换环节的输出近似, 其中:

$$F^0 = \frac{1}{2\pi} [x^0 (2\pi + \psi_1 - \psi_2) + a (\cos \psi_2 - \cos \psi_1) + \varepsilon (\psi_2 - \psi_1 - 2\pi)] \quad (10)$$

$$q = \frac{1}{\pi a} [x^0 (\cos \psi_2 - \cos \psi_1) + \varepsilon (\cos \psi_1 - \cos \psi_2) + \frac{a}{4} (\sin 2\psi_2 - \sin 2\psi_1) + \frac{a}{2} (\psi_1 - \psi_2 + 2\pi)] \quad (11)$$

$$q' = \frac{1}{\pi a} [(x^0 - b)(\sin \psi_1 - \sin \psi_2) + \frac{a}{2} (\sin^2 \psi_1 - \sin^2 \psi_2)] \quad (12)$$

根据图6可得, $\sin \psi_1 = \sin \psi_2 = (x^0 - \varepsilon)/a$, 故 $q' = 0$ 。则近似输出 $F(x)$ 仅包括不变分量 F^0 和周期分量 $q \cdot a \sin \omega t$ 。

进一步, 根据图1, 其他各环节的关系式如式(13)所示。

$$\begin{cases} x = -x_4 \\ x_5 = F(x) \\ K_W(K_P s + K_I)x_5 = (s + b_p K_I)x_1 \\ K_{P1}x_1 = (K_{P1} + T_y s)x_2 \\ (1 - sT_W)x_2 = (1 + 0.5sT_W)x_3 \\ x_3 - d = (T_J s + K_L)x_4 \end{cases} \quad (13)$$

令 $s=0$, 可得系统的不变分量方程为

$$\begin{cases} x^0 = -x_4^0 \\ x_5^0 = F^0 \\ K_W K_I x_5^0 = b_p K_I x_1^0 \\ K_{P1} x_1^0 = K_{P1} x_2^0 \\ x_2^0 = x_3^0 \\ x_3^0 - d = K_L x_4^0 \end{cases} \quad (14)$$

联立可得中心偏移量 x^0 为

$$x^0 = \frac{d}{K_L} - \frac{F^0 K_W}{b_p K_L} \quad (15)$$

式(15)表明, 有外部输入(负荷扰动)时, 稳定振荡中存在非周期不变分量。

进一步, 令 $d=0$, 可得系统的周期分量方程为

$$\begin{cases} x^* = -x_4^* \\ x_5^* = q x^* \\ K_W(K_P s + K_I)x_5^* = (s + b_p K_I)x_1^* \\ K_{P1}x_1^* = (K_{P1} + T_y s)x_2^* \\ (1 - sT_W)x_2^* = (1 + 0.5sT_W)x_3^* \\ x_3^* = (T_J s + K_L)x_4^* \end{cases} \quad (16)$$

联立可得如下特征方程:

$$\frac{K_{P1}}{K_{P1} + T_y s} \cdot \frac{(K_P s + K_I)K_W}{s + b_p K_I} \cdot q \cdot \frac{1 - sT_W}{1 + 0.5sT_W} \cdot \frac{1}{T_J s + K_L} = -1 \quad (17)$$

令 $s=j\omega$, 根据式(17)的实部和虚部可写成2个方程, 并联立式(15)(共3个方程)便可求得振幅 $a=0.0031$ 、振荡角频率 $\omega=0.6735$ 、中心偏移 $x^0=0.0033$ 。

求得的中心偏移量和振幅关系满足图6所示的切换环节输入假设, 故 $x(t)=0.0033+0.0031\sin 0.6735t$ 可近似表示 0.1pu 负荷扰动后非光滑单机水电系统中的切换型频率振荡信息。

4 方法的仿真实验

本节结合仿真, 对改进波波夫谐波线性化的具体实施方法进行验证(分析的是负荷扰动后, 振荡时上死区/上限幅作用的情形, 下死区/下限幅作用时同理)。

根据负荷扰动后, 系统的不稳定平衡点与死区和限幅边界的距离关系, 假设起作用的切换环节分别有如下3种情形。

情形1: 仅上死区作用。

当负荷扰动为 0.1pu 时, 系统的不稳定平衡点离上死区边界较近。故假设振荡时上死区边界起作用, 波波夫谐波线性化方法和仿真法求解的振荡信息的时域对比, 如图7所示。

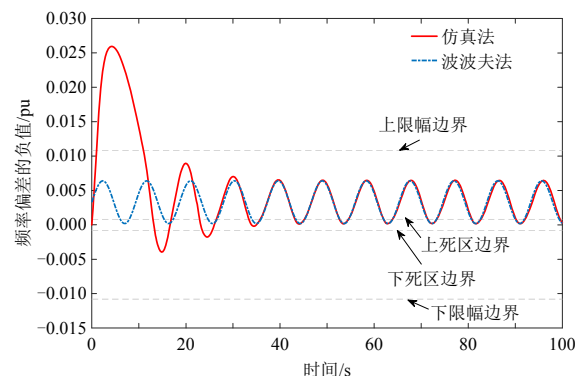


图7 0.1 负荷扰动的时域对比

Fig. 7 Time domain comparison of 0.1 load disturbance

图7表明, 仅上死区边界作用时, 波波夫法和仿真法获得的稳定振荡(等幅振荡阶段)的时域曲线基本重合, 表明近似分析结果的精度较好。

情形2: 上死区和上限幅同时作用。

当负荷扰动为 0.19pu 时, 系统的不稳定平衡点离上死区边界和上限幅边界距离相近。故假设振荡时上死区边界和上限幅边界同时起作用, 波波夫谐波线性化方法和仿真法求解的振荡信息的时域对比, 如图8所示。

图8表明, 上死区边界和上限幅边界同时作用时, 波波夫法和仿真法获得的稳定振荡(等幅振荡阶段)的时域曲线基本重合, 表明近似分析结果的精度较好。

情形3: 仅上限幅作用。

当负荷扰动为 0.26pu 时, 系统的不稳定平衡点

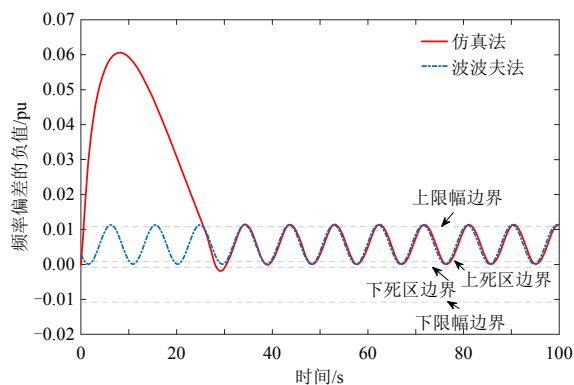


图 8 0.19 负荷扰动的时域对比

Fig. 8 Time domain comparison of 0.19 load disturbance
离上限幅边界较近。故假设振荡时上限幅边界起作用, 波波夫谐波线性化方法和仿真法求解的振荡信息的时域对比, 如图 9 所示。

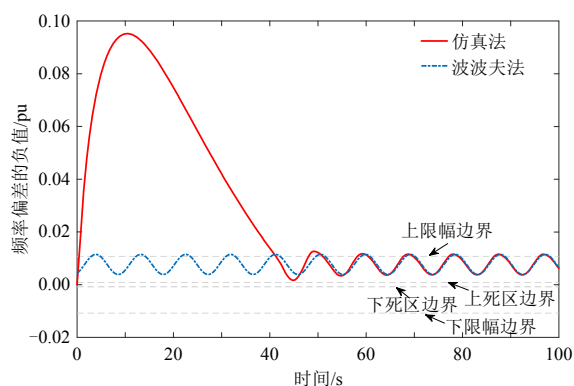


图 9 0.26 负荷扰动的时域对比

Fig. 9 Time domain comparison of 0.26 load disturbance
图 9 表明, 仅上限幅边界作用时, 波波夫法和仿真法获得的稳定振荡(等幅振荡阶段)的时域曲线基本重合, 表明近似分析结果的精度较好。

进一步, 在各种可能的负荷扰动下, 基于改进波波夫谐波线性化方法计算的近似稳定振荡信息, 与仿真法的结果对比, 如图 10—12 所示。

图 10—12 表明, 单机系统受到负荷扰动后, 发生的切换型振荡分别为仅上死区作用(情形 1)、上死区和上限幅同时作用(情形 2)、仅上限幅作用(情形 3)时, 基于改进的波波夫谐波线性化方法都

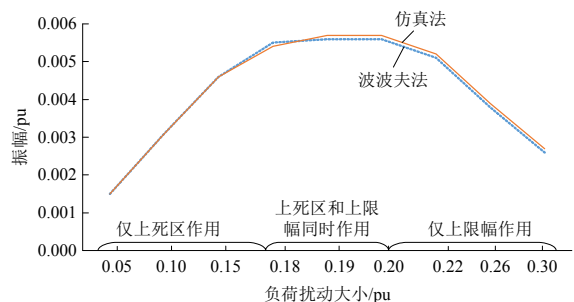


图 10 振幅的结果对比

Fig. 10 Comparison of amplitude results

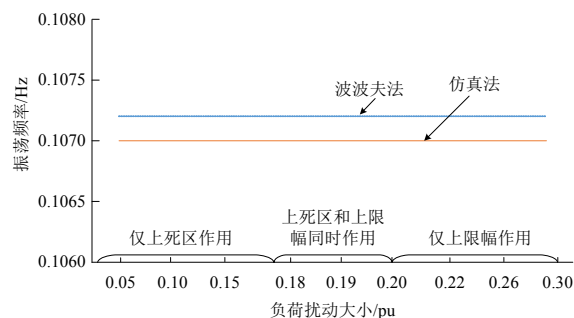


图 11 振荡频率的结果对比(误差 0.19%)

Fig. 11 Comparison of results of oscillation frequency(with error 0.19%)

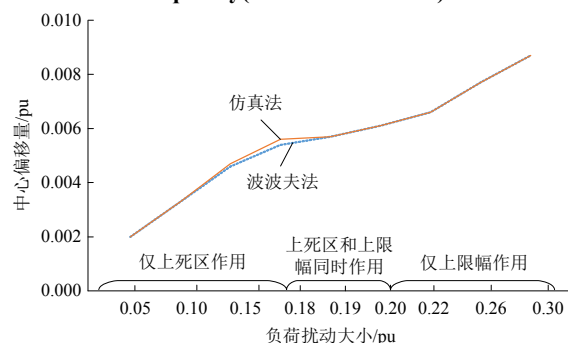


图 12 中心偏移量的结果对比

Fig. 12 Comparison of results of center shifting

能近似计算出振幅、振荡频率、中心偏移量的振荡信息, 且与仿真结果基本一致, 误差较小。即通过本文方法求解的近似光滑系统的稳定振荡信息, 可近似非光滑系统的切换型频率振荡。

进一步, 图 10—12 表明, 在单机系统发生切换型频率振荡的负荷扰动范围内, 随着负荷扰动量的增大(偏离初始负荷增大), 系统的不稳定平衡点偏离额定频率也随之增大, 故振荡时中心偏移量也一直增大; 振荡频率仅与系统的周期分量方程有关, 其求解时令外部扰动 $d=0$ (式(16)), 故外部扰动的大小变化时, 振荡频率不变, 对应的物理意义是本文系统的振荡频率仅与本身的结构和参数有关, 与外部输入的大小无关; 而振荡幅值同时受负荷扰动的大小和系统结构的影响, 故随着负荷扰动量的增大, 振幅呈现先增大后减小的趋势。

本文基于波波夫谐波线性化的近似分析方法, 其切换环节的输出仅考虑主要的一次谐波分量, 故系统参数变化导致低通滤波特性变差、高次谐波不可忽略时, 可能导致分析结果的精度变差。

5 结论

本文针对描述函数法无法直接分析有负荷扰动(外部输入)下非光滑单机简化水电系统的切换型频率振荡问题, 提出了一种改进的波波夫谐波线性

化近似分析方法。主要结论如下:

1) 单机水电系统在负荷扰动下, 会发生偏离额定频率的切换型频率振荡, 即稳定振荡中存在中心偏移量(非周期分量)。

2) 单机系统的稳定极限环(切换型振荡)关于不稳定平衡点在频率这一状态量上基本对称, 故可通过扰动后系统的平衡点与切换边界的位置关系, 假设振荡时起作用的切换环节, 减少计算量。

3) 基于改进的波波夫谐波线性化分析方法, 可从近似光滑系统的角度, 说明负荷扰动下非光滑单机系统中稳定振荡的存在, 且求解的稳定振荡信息(幅值, 振荡频率和中心偏移量), 与仿真结果基本一致。

参考文献

- [1] 肖湘宁, 李伟, 罗超, 等. 特高压直流孤岛运行特性与稳定控制研究综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 1-11.
XIAO Xiangning, LI Wei, LUO Chao, et al. Survey on operational characteristics and stability control of Ultra-HVDC transmission system in islanded mode[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 1-11(in Chinese).
- [2] 王鹏, 刘天琪, 王顺亮, 等. 水电机组超低频振荡小信号模型及影响因素分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5942-5955.
WANG Peng, LIU Tianqi, WANG Shunliang, et al. Small-signal model and influencing factors analysis of ultra-low frequency oscillation in hydropower unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5942-5955(in Chinese).
- [3] 李伟, 肖湘宁, 郭琦. 云广特高压直流送端孤岛运行超低频振荡与措施[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 161-166.
LI Wei, XIAO Xiangning, GUO Qi. Ultra-low-frequency oscillation and countermeasures in Yunnan-Guangdong UHVDC Sending-end System in islanded operating mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 161-166(in Chinese).
- [4] 刘春晓, 张俊峰, 陈亦平, 等. 异步联网方式下云南电网超低频振荡的机理分析与仿真[J]. 南方电网技术, 2016, 10(7): 29-34.
LIU Chunxiao, ZHANG Junfeng, CHEN Yiping, et al. Mechanism analysis and simulation on ultra-low frequency oscillation of Yunnan power grid in asynchronous interconnection mode[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(7): 29-34(in Chinese).
- [5] 岳雷, 薛安成, 李志强, 等. 水轮发电机调速系统对超低频振荡的影响及模型适用性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 227-235.
YUE Lei, XUE Ancheng, LI Zhiqiang, et al. Effects on extra-low frequency oscillation caused by hydro generator governor system and model suitability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 227-235(in Chinese).
- [6] 陈刚, 丁理杰, 李旻, 等. 异步联网后西南电网安全稳定特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 76-82.
CHEN Gang, DING Lijie, LI Min, et al. Stability characteristics of Southwest China Power Grid after asynchronous interconnection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 76-82(in Chinese).
- [7] 薛安成, 王嘉伟, 刘晓博, 等. 电力系统超低频频率振荡机理分析与抑制研究现状与展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 553-567.
XUE Ancheng, WANG Jiawei, LIU Xiaobo, et al. Survey and prospect of ultra-low frequency oscillation mechanism analysis and suppression in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 553-567(in Chinese).
- [8] 薛安成, 王嘉伟. 基于非光滑分岔的单机水电系统超低频频率振荡机理分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(7): 1489-1497.
XUE Ancheng, WANG Jiawei. Mechanism analysis of ultra-low frequency oscillation of single hydropower system based on non-smooth bifurcation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(7): 1489-1497(in Chinese).
- [9] 薛安成, 王嘉伟, 刘晓博, 等. 简化单机水电系统负阻尼时频率振荡的类 Hopf 非光滑分岔分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5103-5112.
XUE Ancheng, WANG Jiawei, LIU Xiaobo, et al. Hopf-like non-smooth bifurcation analysis of frequency oscillation in simplified single hydropower generator system with negative damping[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5103-5112(in Chinese).
- [10] 薛安成, 王嘉伟. 含增强型死区的电力系统超低频频率振荡的非光滑分岔分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2725-2733.
XUE Ancheng, WANG Jiawei. Non-smooth bifurcation analysis of ultra-low frequency oscillations in power systems with enhanced dead zone[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2725-2733(in Chinese).
- [11] 黄坤, 姬联涛, 庄俊, 等. 频率死区对水电孤岛运行系统动态响应的影响[J]. 水力发电, 2021, 47(6): 84-90.
HUANG Kun, JI Liantao, ZHUANG Jun, et al. Effects of frequency dead zone on the dynamic response of hydropower islanded operating systems[J]. Water Power, 2021, 47(6): 84-90(in Chinese).

- [12] 高琴, 刘清晨, 陈亦平, 等. 不同调速器死区特性对系统频率稳定的影响分析[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3575-3581.
GAO Qin, LIU Qingchen, CHEN Yiping, et al. Influence of different deadbands on the frequency stability[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3575-3581(in Chinese).
- [13] 陈磊, 张林, 闵勇, 等. 单机等值系统调速器死区对频率振荡的影响[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 107-112, 128.
CHEN Lei, ZHANG Lin, MIN Yong, et al. Influence of deadband of governor on frequency oscillation in single machine equivalent system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 107-112, 128(in Chinese).
- [14] 范成围, 陈刚, 史华勃, 等. 基于统一频率模型的多死区环节对频率振荡影响的分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18): 164-171.
FAN Chengwei, CHEN Gang, SHI Huabo, et al. Analysis of multi-deadband link influence on frequency oscillation based on unified frequency response model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 164-171(in Chinese).
- [15] 吴麒, 王诗宓, 杜继宏, 等. 自动控制原理[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2006.
WU Qi, WANG Shimi, DU Jihong, et al. Principles of automatic control[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2006(in Chinese).
- [16] Е.П.ПОПОВ. ТЕОРИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ[J]. МОСКВА НАУКА, 1979, 1-15.
- [17] 李元萍, 周有庆. 双闭环直流调速系统自持振荡的波波夫谐波线性化分析及仿真[J]. 电工技术学报, 2011, 26(2): 81-87.
LI Yuanping, ZHOU Youqing. E.П.ПОПОВ harmonic linearization and simulation of DC double closed-loop system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(2): 81-87(in Chinese).
- [18] 李元萍. 基于波波夫谐波线性化理论的闭环控制系统自激振荡研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
LI Yuanping. The research on self-oscillation of closed-loop control system based on E.П.Попов Harmonic Linearization[J]. Changsha: Hunan University, 2013(in Chinese).
- [19] 陈磊, 路晓敏, 陈亦平, 等. 多机系统超低频振荡分析与等值方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(22): 10-15, 25.
CHEN Lei, LU Xiaomin, CHEN Yiping, et al. Analysis of ultrar-low-frequency oscillations in multi-machine system and equivalent method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(22): 10-15, 25(in Chinese).
- [20] 路晓敏, 陈磊, 陈亦平, 等. 电力系统一次调频过程的超低频振荡分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 64-70.
LU Xiaomin, CHEN Lei, CHEN Yiping, et al. Ultra-low-frequency oscillation of power system primary frequency regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 64-70(in Chinese).
- [21] DI BERNARDO LAUREA M, CHAMPNEYS A R, BUDD C J, et al. Piecewise-smooth dynamical systems: theory and application[M]. London: Springer Verlag, 2008.



王嘉伟

在线出版日期: 2021-12-31。

收稿日期: 2021-06-23。

作者简介:

王嘉伟(1996), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统频率振荡的分析和控制, 15650759520@163.com;

熊鸿韬(1984), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统网源协调稳定控制, 373926116@qq.com;

*通信作者: 薛安成(1979), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为模型和数据驱动的新能源电力系统稳定性分析和控制、数据安全防御、二次设备评估, acxue@ncepu.edu.cn。

(责任编辑 乔宝榆, 王庆霞)

Approximation of Switching-type Frequency Oscillation in the Simplified Hydropower System Based on Popov Harmonic Linearization

WANG Jiawei¹, XIONG Hongtao², YANG Ying³, LIU Xiaobo¹

ZHANG Jiancheng², ZHUANG Wenbin¹, HUA Wen², XUE Ancheng^{1*}

(1. North China Electric Power University; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Province Electric Power Company; 3. Electric Power Dispatching and Control Center of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd.)

KEY WORDS: switching-type oscillation; dead zone; limit; Popov harmonic linearization; limit cycle

Recently, the switching-type frequency oscillations (ST-FOs), which is oscillation engaged with switch such as dead zone and limit, occurred in some power grids with a high proportion of hydropower units.

Due to the describing function method could not accurately approximate the non-smooth ST-FO of the single-hydropower-generator power system (SHG-PS) with dead zone and limit under external disturbance input, this paper proposes an approximate method based on improved Popov harmonic linearization, combining with roughly symmetry of the stable limit cycle (SLC), i.e. ST-FO, about the unstable equilibrium point (UEP), and judgment of the switch engaged in the oscillation.

The ST-FO of SHG-PS under a certain load disturbance, i.e. external input, as shown in Fig. 1.

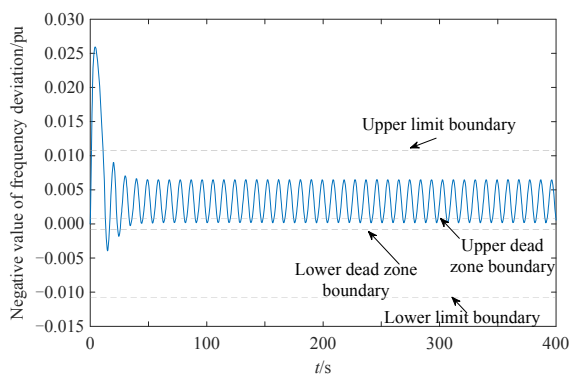


Fig. 1 ST-FO under a certain load disturbance

Fig. 1 shows that the frequency oscillation engaged with switch of the SHG-PS under a certain load disturbance, deviates from the rated frequency, resulting in the input signal of the switch is the sinusoidal signal with a constant center shifting.

The describing function method cannot accurately approximate the switching system with external input. And the traditional Popov harmonic linearization method contains burden computation and could not approximate the above oscillation directly.

It is worth noting that, the SLC, corresponding to the frequency oscillation, is roughly symmetrical with

respected to the UEP, as shown in Fig. 2.

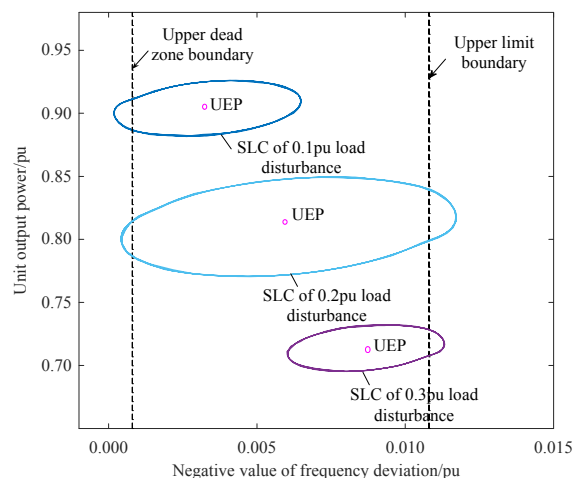


Fig. 2 Limit cycles under different load disturbances

Thus, the SLC, i.e., the ST-FO of the SHG-PS under a certain load disturbance, can be approximated by the improved method is shown in Fig.3.

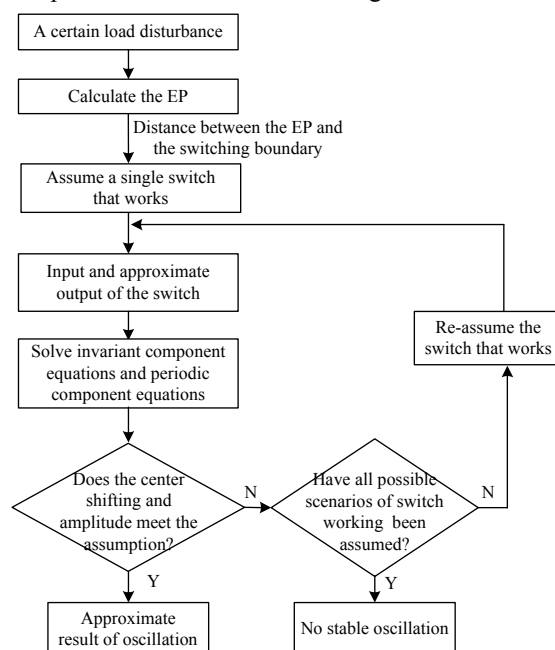


Fig. 3 Approximate analysis processes for the ST-FO

The effectiveness of this method is verified in various ST-FOs of SHG-PS with different conditions.