



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104808705 B

(45)授权公告日 2017.07.28

(21)申请号 201510204386.2

(22)申请日 2015.04.27

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 104808705 A

(43)申请公布日 2015.07.29

(73)专利权人 贵州电力试验研究院
地址 550005 贵州省贵阳市南明区解放路
86号

专利权人 华中科技大学

(72)发明人 唐戡群 刘昌玉 何雪松 沈春华
颜秋容 高晓光 刘肖

(74)专利代理机构 华中科技大学专利中心
42201

代理人 廖盈春

(51)Int.Cl.

G05D 13/62(2006.01)

G05B 13/04(2006.01)

(56)对比文件

CN 104389733 A,2015.03.04,

CN 104063584 A,2014.09.24,

CN 104504224 A,2015.04.08,

CN 104503260 A,2015.04.08,

S.Hagihara,etc.Stability of a hydraulic turbine generating unit controlled by PID governor.《IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,》.1979,(第6期),

审查员 左良军

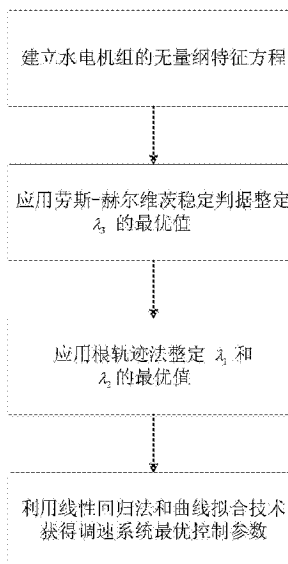
权利要求书2页 说明书8页 附图5页

(54)发明名称

一种基于特征参数的水电机组调速系统控制参数整定方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于特征参数的水电机组调速系统控制参数整定方法,属于水轮机调速器优化技术领域。本发明包括以下步骤:(1)通过无量纲化处理得到水电机组无量纲特征方程;(2)应用劳斯-赫尔维茨稳定判据和根轨迹法求取调速系统最优控制参数;(3)利用线性回归法和曲线拟合技术获得调速系统控制参数的最优值。本发明具有整定过程简单、计算量小、易于实现等优点,能够根据水电机组的五个特征参数(水流惯性时间常数、机组惯性时间常数、接力器反应时间常数、永态转差系数和发电机综合自调节系数)直接整定出调速系统最优控制参数。



1. 一种基于特征参数的水电机组调速系统控制参数整定方法,其特征在于,包括:

步骤1根据水电机组模型建立所述水电机组的闭环特征方程,引入无量纲参数 λ_i 代入所述闭环特征方程,得到所述水电机组的无量纲特征方程,其中, $i=1,2,\dots,6$,定义无量纲时间常数 τ 和无量纲拉普拉斯算子 q 如下:

$$\tau = \frac{\Delta t}{T_w}, \quad q = \frac{\Delta d}{d\tau} = T_w s$$

其中, t 表示时间; T_w 表示水流惯性时间常数无量纲特征方程; s 表示拉普拉斯算子;

步骤2对所述无量纲特征方程应用劳斯-赫尔维茨稳定判据,得到系统稳定条件,整定无量纲参数 λ_3 的最优值;

步骤3根据所述无量纲参数 λ_3 的最优值,应用根轨迹法对所述无量纲特征方程进行分析,整定无量纲参数 λ_1 和 λ_2 的最优值;所述步骤3包括以下子步骤:

(3-1) 根据根轨迹图,设置极点的最优阻尼比 ζ_{opt} ;

(3-2) 根据所述最优阻尼比 ζ_{opt} 获得适合的 (λ_1, λ_2) 组合值,在所述水电机组模型中定义基于转速偏差 $e(t)$ 的泛函积分指标 $J = \int_0^{60} t |e(t)| dt$,将各组 (λ_1, λ_2) 值逐一代入所述水电机组模型中仿真阶跃负荷扰动响应过程;选取令所述泛函积分指标 J 值最小的 (λ_1, λ_2) 组合值作为 λ_1 和 λ_2 的最优整定值;

步骤4根据所述无量纲参数 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 的最优值,利用线性回归法和曲线拟合技术获得所述水电机组调速系统控制参数的最优值。

2. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,在所述步骤1中,定义 $\lambda_1 = \frac{k_p T_w}{T_a}$ 、 $\lambda_2 = \frac{k_i T_w}{k_p}$ 、

$\lambda_3 = \frac{k_d}{k_p T_w}$ 、 $\lambda_4 = \frac{T_y}{T_w}$ 、 $\lambda_5 = \frac{T_a b_p}{T_w}$ 、 $\lambda_6 = \frac{T_w e_n}{T_a}$,其中, k_p 、 k_i 和 k_d 分别表示控制器的比例、积分和微分增益,均是需整定的所述水电机组调速系统控制参数; T_y 表示执行器反应时间常数;

T_a 表示机组惯性时间常数; b_p 表示永态转差系数; e_n 表示发电机综合自调节系数。

3. 如权利要求1或2所述的方法,其特征在于,在所述步骤2中,将无量纲参数 λ_3 的最优值整定为将所述系统稳定条件分为两种稳定条件的临界值。

4. 根据权利要求1或2所述的方法,其特征在于,所述步骤4包括以下子步骤:

(4-1) 定义无量纲参数 λ_1 和 λ_2 的回归模型如下:

$$\begin{cases} \lambda_1^i = \alpha_0 + \alpha_1 \lambda_3^i + \alpha_2 \lambda_6^i + \varepsilon_1^i \\ \lambda_2^i = \beta_0 + \beta_1 \lambda_3^i + \beta_2 \lambda_6^i + \varepsilon_2^i \end{cases}, i=1,2,\dots,54$$

其中, λ_1^i 和 λ_2^i 表示所述步骤3中整定的最优值; λ_3^i 和 λ_6^i 表示 λ_3^i 和 λ_6^i 对应的自变量取值; α_0 、 α_1 、 α_2 、 β_0 、 β_1 和 β_2 表示回归系数; ε_1^i 和 ε_2^i 表示随机误差;

(4-2) 用线性回归法求无量纲参数 λ_1 和 λ_2 的回归方程;

(4-3) 归纳总结所述回归系数 α_0 、 α_1 、 α_2 、 β_0 、 β_1 和 β_2 与无量纲参数 λ_4 的关系,利用曲线拟合的方法求得各个回归系数的拟合方程;

(4-4) 将得到的各回归系数带入到所述回归模型中去,无量纲参数 λ_1 和 λ_2 最终被整理为由无量纲参数 λ_4 、 λ_5 和 λ_6 构成的函数,得到所述水电机组调速系统控制参数的定量整定公

式,进而获得所述水电机组调速系统控制参数的最优值。

一种基于特征参数的水电机组调速系统控制参数整定方法

技术领域

[0001] 本发明属于水轮机调速器优化技术领域,更具体地,涉及一种基于特征参数的水电机组调速系统控制参数整定方法。

背景技术

[0002] 水电机组作为电力系统的重要组成部分,因其具有开、停机速度快,响应迅速,能够快速、灵活地针对电网情况做出调整等优点,所以是理想的调频、调峰和事故备用电源。

[0003] 水电机组调节性能的优劣主要由其调速系统的控制参数决定。但长久以来,控制参数整定仍然缺乏行之有效的方法,主要还是依赖水电站操作人员对特定机组运行状况和规律的经验总结。因此,如何建立一套系统化、通用化的水电机组调速系统控制参数整定方法,成为学者们持续关注的研究热点。

[0004] 尽管众多学者利用劳斯-赫尔维茨稳定判据、状态空间特征值、根轨迹和极点相消法在水轮机调速器控制参数优化领域做出了大量开拓性的工作,并提出了各种经典整定公式,但由于在研究中采用了过于简化的水电机组模型,从而导致这些整定公式在实际工程中的使用效果并不理想,主要起到指导性的作用。

发明内容

[0005] 针对现有技术的以上缺陷或改进需求,本发明提供一种基于特征参数的水电机组调速系统控制参数整定方法,能够根据水电机组的5个特征参数(水流惯性时间常数、机组惯性时间常数、接力器反应时间常数、永态转差系数和发电机综合自调节系数)直接整定出调速系统最优控制参数。

[0006] 本发明提供一种基于特征参数的水电机组调速系统控制参数整定方法,包括以下步骤:

[0007] 步骤1根据水电机组模型建立所述水电机组的闭环特征方程,引入无量纲参数 λ_i 代入所述闭环特征方程,得到所述水电机组的无量纲特征方程,其中, $i=1,2,\dots,6$,定义无量纲时间常数 τ 和无量纲拉普拉斯算子 q 如下:

$$[0008] \quad \tau = \frac{t}{T_w}, \quad q = \frac{d}{d\tau} = T_w s$$

[0009] 其中, t 表示时间; T_w 表示水流惯性时间常数无量纲特征方程; s 表示拉普拉斯算子;

[0010] 步骤2对所述无量纲特征方程应用劳斯-赫尔维茨稳定判据,得到系统稳定条件,整定无量纲参数 λ_3 的最优值;

[0011] 步骤3根据所述无量纲参数 λ_3 的最优值,应用根轨迹法对所述无量纲特征方程进行分析,整定无量纲参数 λ_1 和 λ_2 的最优值;

[0012] 步骤4根据所述无量纲参数 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 的最优值,利用线性回归法和曲线拟合技术获得所述水电机组调速系统控制参数的最优值。

[0013] 总体而言,通过本发明所构思的以上技术方案与现有技术相比,具有以下有益效果:

[0014] 本发明借助线性回归和曲线拟合技术将水轮机PID调速器经典整定公式推广至更一般的情况,由于在分析过程中使用了更为详细的水电机组模型,使其能够根据系统五大特征参数(水流惯性时间常数、机组惯性时间常、接力器反应时间、永态转差系数和发电机综合自调节系数)直接整定出最优控制参数,从而使得本发明方法更具实用价值。

附图说明

[0015] 图1为本发明基于特征参数的水电机组调速系统控制参数整定方法的流程图;

[0016] 图2为本发明水电机组模型框图;

[0017] 图3为本发明根轨迹图;

[0018] 图4(a)为本发明 $\lambda_4=0$ 时 λ_1 的回归平面示意图;

[0019] 图4(b)为本发明 $\lambda_4=0$ 时 λ_2 的回归平面示意图;

[0020] 图5(a)为本发明回归系数 α_i 的拟合图;

[0021] 图5(b)为本发明回归系数 β_i 的拟合图;

[0022] 图6为本发明第一组系数下水电机组响应过程频率曲线图;

[0023] 图7为本发明第二组系数下水电机组响应过程频率曲线图。

具体实施方式

[0024] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合附图及实施例,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。此外,下面所描述的本发明各个实施方式中所涉及到的技术特征只要彼此之间未构成冲突就可以相互组合。

[0025] 本发明提供一种基于特征参数的水电机组调速系统控制参数整定方法,其基本思想为:在水电机组无量纲特征方程的基础上,应用劳斯-赫尔维茨稳定判据和根轨迹法求取调速系统最优控制参数,并用线性回归法和曲线拟合技术获得控制参数的定量整定公式。

[0026] 图1所示为本发明基于特征参数的水电机组调速系统控制参数整定方法的流程图,具体包括以下步骤:

[0027] 步骤1建立水电机组无量纲特征方程。图2所示为本发明水电机组模型框图,其中水电机组是由控制器、执行器、水轮机、压力管道、发电机和负荷组成的复杂系统,图中 x 表示机组转速; x_c 表示给定转速; m_g 表示阻力矩。在本发明实施例中,控制器的传递函数为:

$$\frac{k_d s^2 + k_p s + k_i}{s + b_p k_i}, \text{ 执行器的传递函数为: } \frac{1}{T_y s + 1}, \text{ 水轮机-压力管道的传递函数为: } \frac{1 - T_w s}{1 + 0.5 T_w s},$$

发电机-负荷的传递函数为: $\frac{1}{T_a s + e_n}$, 得到水电机组的开环传递函数如下:

$$[0028] \quad L(s) = \frac{k_d s^2 + k_p s + k_i}{s + b_p k_i} \frac{1}{T_y s + 1} \frac{1 - T_w s}{1 + 0.5 T_w s} \frac{1}{T_a s + e_n} \quad (1)$$

[0029] 其中, s 表示拉普拉斯算子; T_w 表示水流惯性时间常数; T_a 表示机组惯性时间常数;

T_y 表示执行器反应时间常数; b_p 表示永态转差系数; e_n 表示发电机综合自调节系数; k_p 、 k_i 和 k_d 分别表示控制器的比例、积分和微分增益,均是需整定的控制参数。因此,其闭环特征方程为:

$$[0030] \quad 1+L(s)=0 \quad (2)$$

[0031] 定义如下无量纲时间常数 τ 和无量纲拉普拉斯算子 q :

$$[0032] \quad \tau = \frac{\Delta t}{T_w}, \quad q = \frac{\Delta d}{d\tau} = T_w s \quad (3)$$

[0033] 其中, t 表示时间。引入如下无量纲参数 λ_i ($i=1,2,\dots,6$):

[0034]

$$\lambda_1 = \frac{k_p T_w}{T_a}, \quad \lambda_2 = \frac{k_i T_w}{k_p}, \quad \lambda_3 = \frac{k_d}{k_p T_w}, \quad \lambda_4 = \frac{T_y}{T_w}, \quad \lambda_5 = \frac{T_a b_p}{T_w}, \quad \lambda_6 = \frac{T_w e_n}{T_a} \quad (4)$$

[0035] 将以上无量纲参数 λ_i 代入闭环特征方程(2),得到水电机组无量纲特征方程为:

$$[0036] \quad a_0 q^4 + a_1 q^3 + a_2 q^2 + a_3 q + a_4 = 0 \quad (5)$$

[0037] 其中:

$$[0038] \quad a_0 = 0.5\lambda_4$$

$$[0039] \quad a_1 = 0.5 + \lambda_4 + 0.5\lambda_4\lambda_6 + 0.5\lambda_1\lambda_2\lambda_4\lambda_5 - \lambda_1\lambda_3$$

$$[0040] \quad a_2 = 1 + 0.5\lambda_6 + \lambda_1\lambda_3 + \lambda_4\lambda_6 + \lambda_1\lambda_2\lambda_4\lambda_5 + 0.5\lambda_1\lambda_2\lambda_4\lambda_5\lambda_6 - \lambda_1$$

$$[0041] \quad a_3 = \lambda_1 + \lambda_6 + \lambda_1\lambda_2\lambda_5 + 0.5\lambda_1\lambda_2\lambda_5\lambda_6 + \lambda_1\lambda_2\lambda_4\lambda_5\lambda_6 - \lambda_1\lambda_2$$

$$[0042] \quad a_4 = \lambda_1\lambda_2 + \lambda_1\lambda_2\lambda_5\lambda_6$$

[0043] 步骤2应用劳斯-赫尔维茨稳定判据整定 λ_3 的最优值。

[0044] 对水电机组无量纲特征方程(5)应用劳斯-赫尔维茨稳定判据,得到系统稳定的充分必要条件为:

$$[0045] \quad a_1 > 0, \quad a_2 > 0, \quad a_3 > 0, \quad a_4 > 0, \quad a_3(a_1 a_2 - a_0 a_3) - a_1^2 a_4 > 0 \quad (6)$$

[0046] 在假设 $\lambda_5=0$ 和 $\lambda_6=0$ 的情况下,上述稳定条件转化为:

[0047]

$$\begin{cases} \lambda_2 < \frac{\lambda_1 \lambda_4 - A_1 \left[A_2 - \sqrt{A_2^2 - 2\lambda_1 \lambda_4} \right]}{\lambda_1 \lambda_4} & \lambda_3 \leq B \\ \frac{\lambda_1 \lambda_4 - A_1 \left[A_2 + \sqrt{A_2^2 - 2\lambda_1 \lambda_4} \right]}{\lambda_1 \lambda_4} < \lambda_2 < \frac{\lambda_1 \lambda_4 - A_1 \left[A_2 - \sqrt{A_2^2 - 2\lambda_1 \lambda_4} \right]}{\lambda_1 \lambda_4} & \lambda_3 > B \end{cases} \quad (7)$$

[0048] 其中:

$$[0049] \quad A_1 = 0.5 + \lambda_4 - \lambda_1\lambda_3, \quad A_2 = 1.5 + \lambda_4 - \lambda_1$$

$$[0050] \quad B = \frac{2\lambda_4 + 1}{3 + 4\lambda_4 - \sqrt{12\lambda_4^2 + 12\lambda_4}} - \frac{2\sqrt{\lambda_4}}{\sqrt{12\lambda_4 + 12} - 2\sqrt{\lambda_4}}$$

[0051] 由上述公式(7)可以发现,临界值 B 将系统稳定条件分为两种情况,即不同的 λ_3 对应不同的稳定条件。因此,将 λ_3 的最优值整定为该临界值:

$$[0052] \quad \lambda_3 = \frac{2\lambda_4 + 1}{3 + 4\lambda_4 - \sqrt{12\lambda_4^2 + 12\lambda_4}} - \frac{2\sqrt{\lambda_4}}{\sqrt{12\lambda_4 + 12} - 2\sqrt{\lambda_4}} \quad (8)$$

[0053] 步骤3应用根轨迹法整定 λ_1 和 λ_2 的最优值,具体包括以下子步骤:

[0054] (3-1) 根据根轨迹图,设置极点的最优阻尼比 ζ_{opt} 。应用根轨迹法对水电机组无量纲特征方程(5)进行分析,图3是特征方程(5)在 $\lambda_4=0.2$ 、 $\lambda_5=0$ 、 $\lambda_6=0$ 情况下的主导极点根轨迹图,根据上一步骤的讨论,此时微分增益整定为最优值 $\lambda_3=0.36$ 。图中,实线表示 λ_2 在固定取值下,特征根随 λ_1 的变化轨迹,箭头方向是 λ_1 增加时根轨迹的移动方向;同时,当 λ_1 取值固定时,特征根随 λ_2 的变化轨迹在图中用虚线表示。

[0055] 为了使水电机组获得最佳的动态品质,设置极点的最优阻尼比为 ζ_{opt} :

$$[0056] \quad \zeta = \zeta_{opt} \quad (9)$$

[0057] (3-2) 根据最优阻尼比获得适合的 (λ_1, λ_2) 组合值,在水电机组模型中定义基于转速偏差 $e(t)$ 的泛函积分指标 $J = \int_0^{60} t|e(t)|dt$,将各组 (λ_1, λ_2) 值逐一代入模型中仿真阶跃负荷扰动响应过程。借助根轨迹图可以很方便地获得满足上述阻尼比的一系列组合值 (λ_1, λ_2) 。将这些组合值逐一代入水电机组模型,并基于如下转速偏差 $e(t)$ 的泛函积分指标 J ,对水电机组模型在各组 (λ_1, λ_2) 下的阶跃负荷扰动响应过程进行评估:

$$[0058] \quad J = \int_0^{60} t|e(t)|dt \quad (10)$$

[0059] 选取令指标 J 值最小的 (λ_1, λ_2) 组合值作为此时 λ_1 和 λ_2 的最优整定值。根据上述方法,下表1列出了 $\lambda_4=0$ 时, λ_1 和 λ_2 的最优整定值。

[0060]	$\lambda_4=0$	$\lambda_5 \backslash \lambda_6$	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
		0.0	(0.87,0.31)	(0.87,0.33)	(0.89,0.34)	(0.90,0.35)	(0.91,0.37)	(0.93,0.38)
		0.1	(0.84,0.33)	(0.86,0.34)	(0.87,0.35)	(0.88,0.37)	(0.89,0.38)	(0.91,0.39)
		0.2	(0.83,0.34)	(0.85,0.35)	(0.86,0.36)	(0.87,0.37)	(0.88,0.39)	(0.90,0.40)
		0.3	(0.82,0.35)	(0.83,0.36)	(0.85,0.37)	(0.85,0.39)	(0.86,0.40)	(0.88,0.41)
		0.4	(0.81,0.36)	(0.82,0.37)	(0.83,0.38)	(0.84,0.40)	(0.85,0.41)	(0.86,0.42)
		0.5	(0.80,0.37)	(0.81,0.38)	(0.82,0.39)	(0.83,0.40)	(0.84,0.42)	(0.85,0.43)
		0.6	(0.79,0.38)	(0.80,0.39)	(0.81,0.40)	(0.82,0.41)	(0.82,0.43)	(0.83,0.45)
		0.7	(0.78,0.39)	(0.79,0.40)	(0.80,0.41)	(0.80,0.43)	(0.81,0.44)	(0.82,0.45)
		0.8	(0.77,0.40)	(0.78,0.41)	(0.79,0.42)	(0.79,0.44)	(0.79,0.46)	(0.80,0.47)

[0061] 表1

[0062] 重复上述获得 λ_1 和 λ_2 的最优整定值的过程,下表2~表6分别列出了 $\lambda_4=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ 时, λ_1 和 λ_2 的最优整定值。

[0063]	$\lambda_4=0.2$	$\lambda_5 \backslash \lambda_6$	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
		0.0	(0.62,0.23)	(0.63,0.24)	(0.63,0.25)	(0.64,0.26)	(0.64,0.27)	(0.65,0.28)
		0.1	(0.62,0.23)	(0.62,0.25)	(0.63,0.25)	(0.63,0.27)	(0.64,0.27)	(0.64,0.29)
		0.2	(0.61,0.24)	(0.62,0.25)	(0.62,0.26)	(0.62,0.28)	(0.63,0.28)	(0.63,0.30)
		0.3	(0.61,0.24)	(0.61,0.26)	(0.61,0.27)	(0.62,0.28)	(0.62,0.29)	(0.62,0.30)
		0.4	(0.60,0.26)	(0.61,0.26)	(0.61,0.27)	(0.61,0.29)	(0.62,0.29)	(0.62,0.31)
		0.5	(0.60,0.26)	(0.60,0.26)	(0.60,0.29)	(0.60,0.30)	(0.61,0.30)	(0.61,0.32)
		0.6	(0.59,0.27)	(0.59,0.28)	(0.59,0.29)	(0.60,0.30)	(0.60,0.31)	(0.60,0.33)
		0.7	(0.59,0.27)	(0.59,0.28)	(0.59,0.30)	(0.59,0.31)	(0.59,0.32)	(0.60,0.33)
		0.8	(0.58,0.28)	(0.58,0.30)	(0.58,0.31)	(0.58,0.32)	(0.59,0.32)	(0.59,0.34)

[0064] 表2

[0065]	$\lambda_4=0.4$	$\lambda_5 \backslash \lambda_6$	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
		0.0	(0.57,0.20)	(0.57,0.21)	(0.58,0.22)	(0.58,0.23)	(0.59,0.24)	(0.59,0.25)
	0.1	(0.57,0.20)	(0.57,0.22)	(0.57,0.23)	(0.58,0.24)	(0.58,0.25)	(0.59,0.26)	
	0.2	(0.56,0.21)	(0.56,0.22)	(0.57,0.23)	(0.57,0.24)	(0.58,0.25)	(0.58,0.26)	
	0.3	(0.56,0.21)	(0.56,0.23)	(0.57,0.23)	(0.57,0.25)	(0.57,0.26)	(0.58,0.27)	
	0.4	(0.55,0.22)	(0.56,0.23)	(0.56,0.24)	(0.56,0.25)	(0.57,0.27)	(0.57,0.27)	
	0.5	(0.55,0.23)	(0.55,0.24)	(0.56,0.24)	(0.56,0.26)	(0.56,0.27)	(0.57,0.28)	
[0066]	0.6	(0.55,0.23)	(0.55,0.24)	(0.55,0.26)	(0.55,0.27)	(0.56,0.28)	(0.56,0.29)	
	0.7	(0.54,0.24)	(0.55,0.24)	(0.55,0.26)	(0.55,0.27)	(0.55,0.28)	(0.55,0.29)	
	0.8	(0.54,0.24)	(0.54,0.26)	(0.54,0.27)	(0.55,0.27)	(0.55,0.26)	(0.55,0.30)	

[0067] 表3

[0068]	$\lambda_4=0.6$	$\lambda_5 \backslash \lambda_6$	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
		0.0	(0.54,0.18)	(0.54,0.19)	(0.55,0.20)	(0.55,0.21)	(0.56,0.22)	(0.57,0.23)
	0.1	(0.53,0.19)	(0.54,0.20)	(0.55,0.20)	(0.55,0.22)	(0.56,0.23)	(0.57,0.23)	
	0.2	(0.53,0.19)	(0.54,0.20)	(0.54,0.21)	(0.55,0.22)	(0.55,0.23)	(0.56,0.24)	
	0.3	(0.53,0.19)	(0.53,0.20)	(0.54,0.22)	(0.55,0.22)	(0.55,0.24)	(0.56,0.25)	
	0.4	(0.52,0.20)	(0.53,0.21)	(0.53,0.22)	(0.54,0.23)	(0.55,0.24)	(0.55,0.25)	
	0.5	(0.52,0.20)	(0.53,0.21)	(0.53,0.22)	(0.54,0.24)	(0.54,0.24)	(0.55,0.26)	
	0.6	(0.52,0.21)	(0.53,0.21)	(0.53,0.23)	(0.54,0.24)	(0.54,0.25)	(0.55,0.26)	
	0.7	(0.52,0.21)	(0.52,0.22)	(0.53,0.23)	(0.53,0.25)	(0.54,0.25)	(0.54,0.27)	
	0.8	(0.52,0.21)	(0.52,0.23)	(0.52,0.24)	(0.53,0.25)	(0.53,0.26)	(0.54,0.27)	

[0069] 表4

[0070]	$\lambda_4=0.8$	$\lambda_5 \backslash \lambda_6$	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
		0.0	(0.51,0.17)	(0.52,0.18)	(0.53,0.18)	(0.54,0.19)	(0.54,0.20)	(0.55,0.21)
	0.1	(0.51,0.17)	(0.52,0.18)	(0.52,0.19)	(0.53,0.20)	(0.54,0.21)	(0.55,0.22)	
	0.2	(0.51,0.17)	(0.52,0.18)	(0.52,0.19)	(0.53,0.20)	(0.54,0.21)	(0.55,0.22)	
	0.3	(0.51,0.17)	(0.52,0.18)	(0.52,0.20)	(0.53,0.21)	(0.54,0.22)	(0.55,0.22)	
	0.4	(0.50,0.18)	(0.51,0.19)	(0.52,0.20)	(0.53,0.21)	(0.53,0.22)	(0.54,0.23)	
	0.5	(0.50,0.18)	(0.51,0.20)	(0.52,0.20)	(0.53,0.21)	(0.53,0.22)	(0.54,0.23)	
	0.6	(0.50,0.19)	(0.51,0.20)	(0.52,0.20)	(0.52,0.22)	(0.53,0.23)	(0.54,0.24)	
	0.7	(0.50,0.19)	(0.51,0.20)	(0.51,0.21)	(0.52,0.22)	(0.53,0.23)	(0.54,0.24)	
	0.8	(0.50,0.20)	(0.51,0.20)	(0.51,0.22)	(0.52,0.23)	(0.53,0.23)	(0.53,0.24)	

[0071] 表5

[0072]	$\lambda_4=1.0$	$\lambda_5 \backslash \lambda_6$	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
		0.0	(0.49,0.15)	(0.50,0.16)	(0.51,0.17)	(0.52,0.18)	(0.53,0.19)	(0.54,0.20)
	0.1	(0.49,0.15)	(0.50,0.16)	(0.51,0.17)	(0.52,0.19)	(0.53,0.19)	(0.54,0.20)	
	0.2	(0.49,0.16)	(0.50,0.17)	(0.51,0.18)	(0.52,0.19)	(0.53,0.20)	(0.54,0.21)	
	0.3	(0.49,0.16)	(0.50,0.17)	(0.51,0.18)	(0.52,0.19)	(0.53,0.20)	(0.54,0.21)	
	0.4	(0.49,0.16)	(0.50,0.17)	(0.51,0.18)	(0.52,0.19)	(0.53,0.20)	(0.54,0.21)	
	0.5	(0.49,0.17)	(0.50,0.17)	(0.51,0.18)	(0.52,0.19)	(0.53,0.21)	(0.54,0.22)	
	0.6	(0.49,0.17)	(0.50,0.18)	(0.51,0.19)	(0.52,0.20)	(0.53,0.21)	(0.54,0.22)	
	0.7	(0.49,0.17)	(0.50,0.18)	(0.51,0.19)	(0.52,0.20)	(0.53,0.21)	(0.54,0.22)	
	0.8	(0.49,0.18)	(0.49,0.19)	(0.50,0.20)	(0.52,0.20)	(0.52,0.22)	(0.53,0.23)	

[0073] 表6

[0074] 步骤4利用线性回归法和曲线拟合技术获得调速系统控制参数的最优值,具体包括以下子步骤:

[0075] (4-1) 定义 λ_1 和 λ_2 的回归模型如下:

$$[0076] \quad \begin{cases} \lambda_1^i = \alpha_0 + \alpha_1 \lambda_5^i + \alpha_2 \lambda_6^i + \varepsilon_1^i \\ \lambda_2^i = \beta_0 + \beta_1 \lambda_5^i + \beta_2 \lambda_6^i + \varepsilon_2^i \end{cases}, i=1,2,\dots,54 \quad (11)$$

[0077] 其中, λ_1^i 和 λ_2^i 表示步骤3中最优整定值; λ_5^i 和 λ_6^i 表示最优整定值 λ_1^i 和 λ_2^i 对应的自变量取值; α_0 、 α_1 、 α_2 、 β_0 、 β_1 和 β_2 表示回归系数; ε_1^i 和 ε_2^i 表示随机误差;

[0078] (4-2) 根据表1中的数据,用线性回归法可以求得 $\lambda_4=0$ 时, λ_1 和 λ_2 的回归方程为:

$$[0079] \quad \lambda_4=0 \text{ 时}, \begin{cases} \lambda_1 = 0.86 - 0.13\lambda_5 + 0.49\lambda_6 \\ \lambda_2 = 0.31 + 0.10\lambda_5 + 0.65\lambda_6 \end{cases} \quad (12)$$

[0080] 图4(a)、(b)所示分别为本发明 $\lambda_4=0$ 时 λ_1 、 λ_2 的回归平面示意图,可以看出该平面与表1中的数据点很好地切合在一起。

[0081] 类似的,根据表2~表6中的数据, λ_1 和 λ_2 的回归方程分别为:

$$[0082] \quad \lambda_4=0.2 \text{ 时}, \begin{cases} \lambda_1 = 0.62 - 0.06\lambda_5 + 0.15\lambda_6 \\ \lambda_2 = 0.22 + 0.07\lambda_5 + 0.55\lambda_6 \end{cases} \quad (13)$$

$$[0083] \quad \lambda_4=0.4 \text{ 时}, \begin{cases} \lambda_1 = 0.57 - 0.04\lambda_5 + 0.16\lambda_6 \\ \lambda_2 = 0.19 + 0.05\lambda_5 + 0.54\lambda_6 \end{cases} \quad (14)$$

$$[0084] \quad \lambda_4=0.6 \text{ 时}, \begin{cases} \lambda_1 = 0.53 - 0.03\lambda_5 + 0.29\lambda_6 \\ \lambda_2 = 0.17 + 0.04\lambda_5 + 0.53\lambda_6 \end{cases} \quad (15)$$

$$[0085] \quad \lambda_4=0.8 \text{ 时}, \begin{cases} \lambda_1 = 0.51 - 0.01\lambda_5 + 0.37\lambda_6 \\ \lambda_2 = 0.16 + 0.03\lambda_5 + 0.48\lambda_6 \end{cases} \quad (16)$$

$$[0086] \quad \lambda_4=1.0 \text{ 时}, \begin{cases} \lambda_1 = 0.49 - 0.01\lambda_5 + 0.49\lambda_6 \\ \lambda_2 = 0.14 + 0.03\lambda_5 + 0.50\lambda_6 \end{cases} \quad (17)$$

[0087] (4-3) 综合上述分析结果,表7总结了回归方程(12)~(17)的所有回归系数,显然,其数值依赖于 λ_4 的取值。为进一步归纳出回归系数 α_i 和 β_i 与 λ_4 的关系,利用曲线拟合技术求得各个回归系数的拟合方程,其结果见表7最后一列。图5(a)、(b)所示分别为本发明回归系数 α_i 、 β_i 的拟合图,可以看出,每条曲线都几乎平滑地穿过所有回归系数点,拟合效果较为理想。

λ_4	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	拟合曲线
α_0	0.86	0.62	0.57	0.53	0.51	0.49	$\frac{0.43\lambda_4 + 0.14}{\lambda_4 + 0.17}$
$-\alpha_1$	0.13	0.06	0.04	0.03	0.01	0.01	$\frac{-0.02\lambda_4 + 0.04}{\lambda_4 + 0.31}$
[0088] α_2	0.49	0.15	0.16	0.29	0.37	0.49	$\frac{1.41\lambda_4^2 - 0.57\lambda_4 + 0.12}{\lambda_4^2 + 0.71\lambda_4 + 0.25}$
β_0	0.31	0.22	0.19	0.17	0.16	0.14	$\frac{0.10\lambda_4 + 0.09}{\lambda_4 + 0.28}$
β_1	0.10	0.07	0.05	0.04	0.03	0.03	$\frac{0.0028\lambda_4 + 0.04}{\lambda_4 + 0.42}$
β_2	0.65	0.55	0.54	0.53	0.48	0.50	$\frac{0.46\lambda_4 + 0.16}{\lambda_4 + 0.24}$

[0089] 表7

[0090] (4-4) 这样, λ_1 和 λ_2 最终被整理为由自变量 λ_4 、 λ_5 和 λ_6 构成的函数。结合步骤(2)中整定的 λ_3 最优值, λ_1 、 λ_2 和 λ_3 的定量整定公式如下:

$$\begin{cases}
 \lambda_1 = \frac{0.43\lambda_4 + 0.14}{\lambda_4 + 0.17} - \frac{-0.02\lambda_4 + 0.04}{\lambda_4 + 0.31} \lambda_5 + \frac{1.41\lambda_4^2 - 0.57\lambda_4 + 0.12}{\lambda_4^2 + 0.71\lambda_4 + 0.25} \lambda_6 \\
 \lambda_2 = \frac{0.10\lambda_4 + 0.09}{\lambda_4 + 0.28} + \frac{0.0028\lambda_4 + 0.04}{\lambda_4 + 0.42} \lambda_5 + \frac{0.46\lambda_4 + 0.16}{\lambda_4 + 0.24} \lambda_6 \\
 \lambda_3 = \frac{2\lambda_4 + 1}{3 + 4\lambda_4 - \sqrt{12\lambda_4^2 + 12\lambda_4}} - \frac{2\sqrt{\lambda_4}}{\sqrt{12\lambda_4 + 12} - 2\sqrt{\lambda_4}}
 \end{cases} \quad (18)$$

[0092] 由公式(4)可知, λ_4 、 λ_5 和 λ_6 的具体数值是由水电机组五个系数 T_w 、 T_a 、 T_y 、 b_p 和 e_n 唯一确定, 根据这五个系数便可以直接从整定公式(18)中计算出 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 的最优整定值, 从而进一步求得调速系统最优控制参数为:

$$[0093] \quad k_p = \frac{\lambda_1 T_a}{T_w}, \quad k_i = \frac{\lambda_1 \lambda_2 T_a}{T_w^2}, \quad k_d = \lambda_1 \lambda_3 T_a \quad (19)$$

[0094] 接下来, 给出了两组水电机组系数值, 其都是在各自典型值的范围内任意取值, 将在这两组系数值的基础上, 利用本发明提出的整定公式对调速系统控制参数进行整定, 并通过与经典整定公式进行比较以展示本发明方法的优越性。

[0095] 在本发明实施例中, 经典整定公式采用以下文献中的研究结论:

[0096] Hagihara S, Yokota H, Goda K, et al. Stability of a hydraulic turbine generating unit controlled by P.I.D.governor. IEEE Trans.on Power Apparatus and Systems, 1979, (6): 2294-2298.

[0097] 两组水电机组系数值如下, 其中第一组系数刻意忽略了执行器的动态特性。

[0098] 第一组系数值: $T_y = 0$, $T_w = 0.9$, $T_a = 8.8$, $b_p = 0.02$, $e_n = 0.6$

[0099] 第二组系数值: $T_y = 0.2$, $T_w = 1.2$, $T_a = 10.3$, $b_p = 0.04$, $e_n = 0.3$

[0100] 表8分别列出了在第一组系数下, 本发明整定公式和经典整定公式整定出的最优控制参数。当水电机组调速系统分别设置这两组最优控制参数时, 系统在10%额定负荷阶

跃扰动下的响应过程如图6所示,同时表中还分别总结了水电机组响应过程的动态品质指标,包括:最大频率偏差 ΔF_{\max} 、调节时间 T_s ($\Delta = \pm 0.1\text{Hz}$)和振荡次数 N 。不难发现,在第一组系数下,两种整定公式整定出的最优控制参数非常接近,控制效果都较为理想。

	k_p	k_i	k_d	ΔF_{\max} (Hz)	T_s (s)	N
[0101] 本发明公式整定值	8.512	3.544	2.554	0.806	2.9	0.5
经典公式整定值	9.044	3.392	2.713	0.789	2.8	0.5

[0102] 表8

[0103] 第二组系数与第一组的最大区别是执行器反应时间常数 T_y 不为零。在这种情况下,本发明公式整定出的最优控制参数与经典公式整定值有较大差异,见表9。主要原因在于经典整定公式在分析过程中忽略了执行器的动态特性,这使得其在 T_y 不为零的情况下使水电机组产生了一个较为振荡的响应过程,如图7所示,可见,其整定的控制参数不合适。相比之下,本发明提出的整定公式由于考虑了 T_y 的影响,因此整定出的最优控制参数仍然为系统提供了优秀的调节品质。考虑到 T_y 的取值可以通过现场试验较为准确的测得,这表明本发明提出的整定公式能够更好地应用于工程实际。

	k_p	k_i	k_d	ΔF_{\max} (Hz)	T_s (s)	N
[0104] 本发明公式整定值	5.440	1.294	2.247	1.149	6.0	0.5
[0105] 经典公式整定值	8.154	2.149	3.262	1.197	14.8	3

[0106] 表9

[0107] 本领域的技术人员容易理解,以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

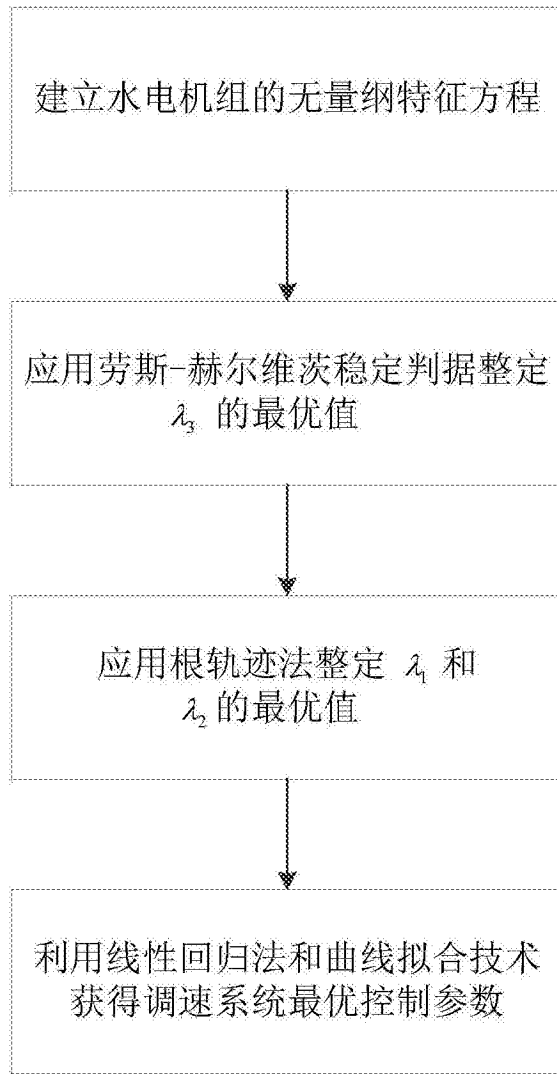


图1

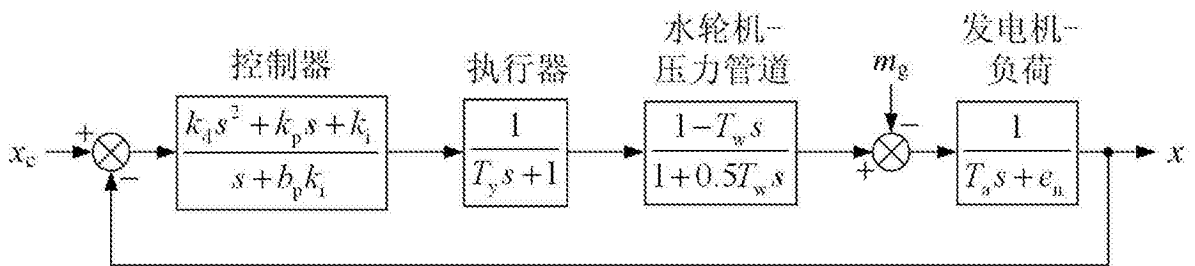


图2

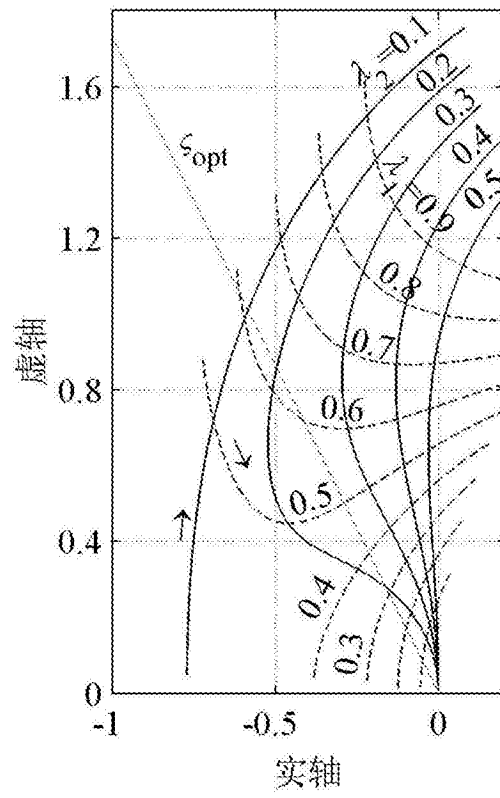


图3

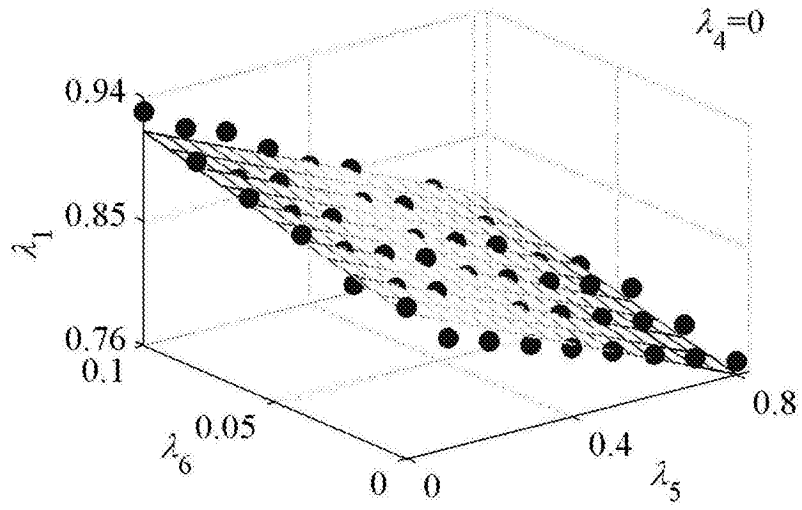


图4(a)

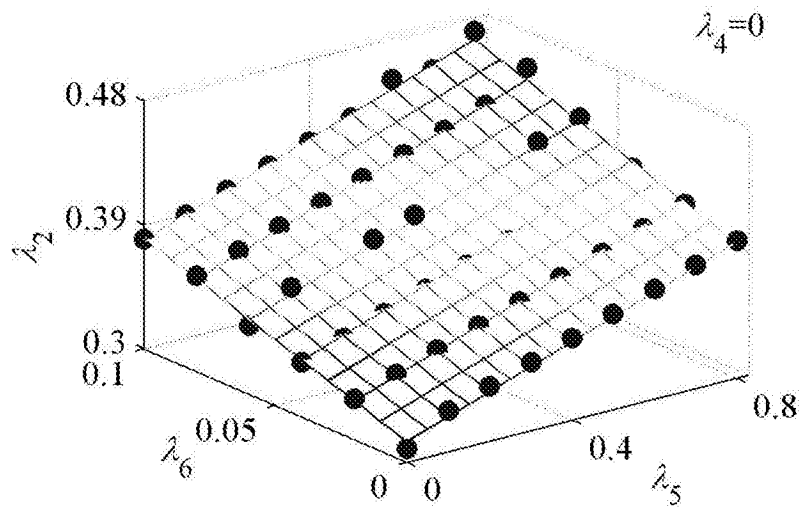


图4 (b)

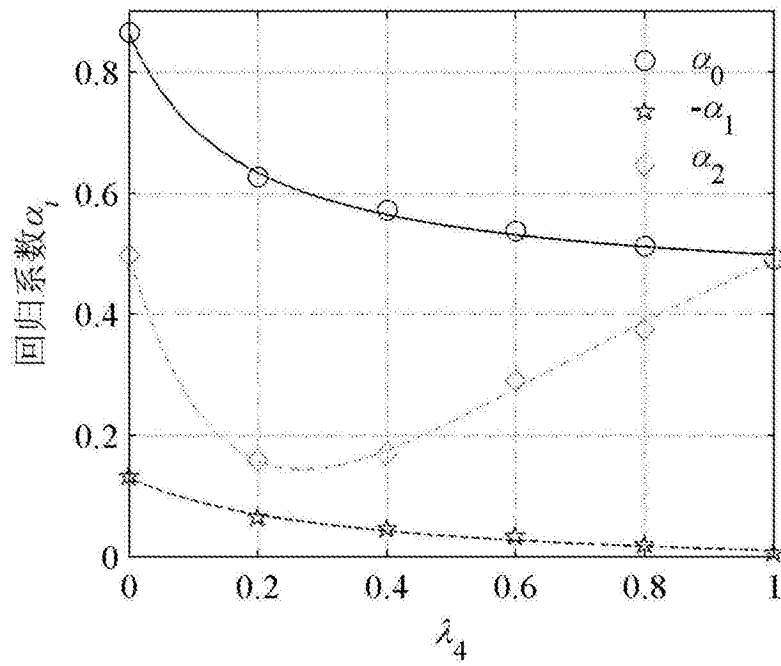


图5 (a)

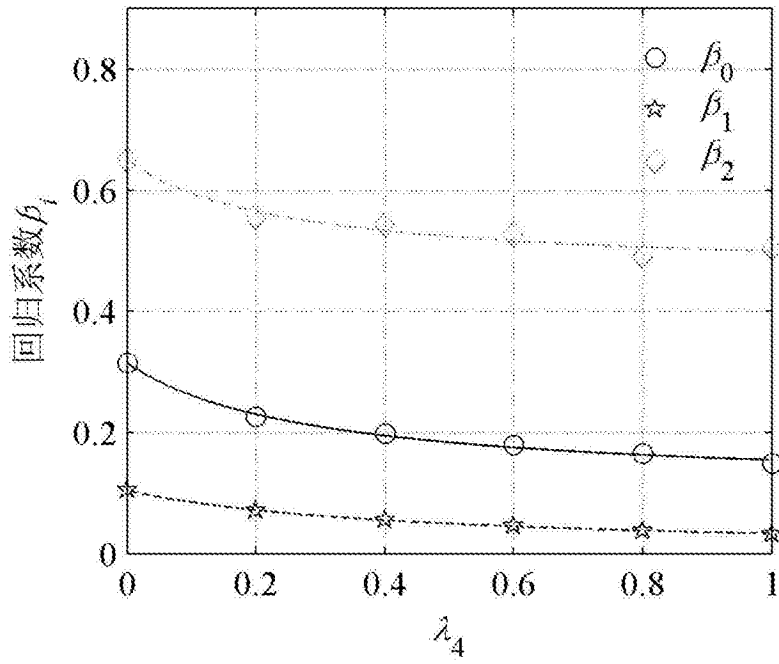


图5 (b)

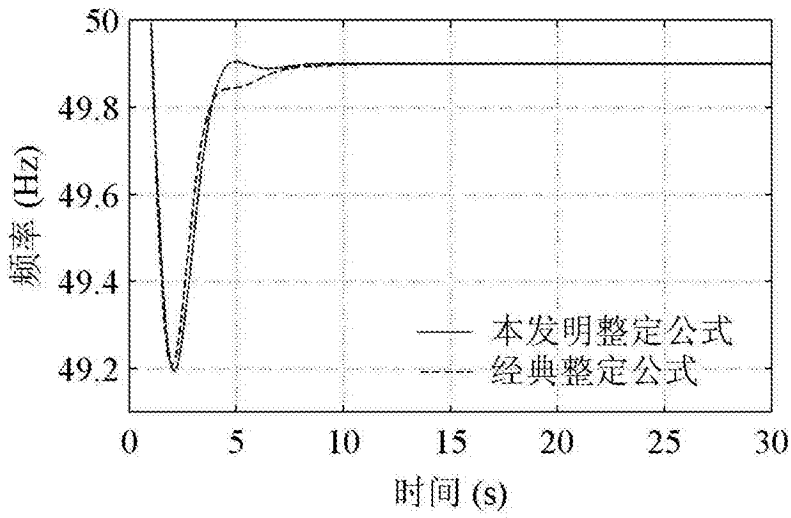


图6

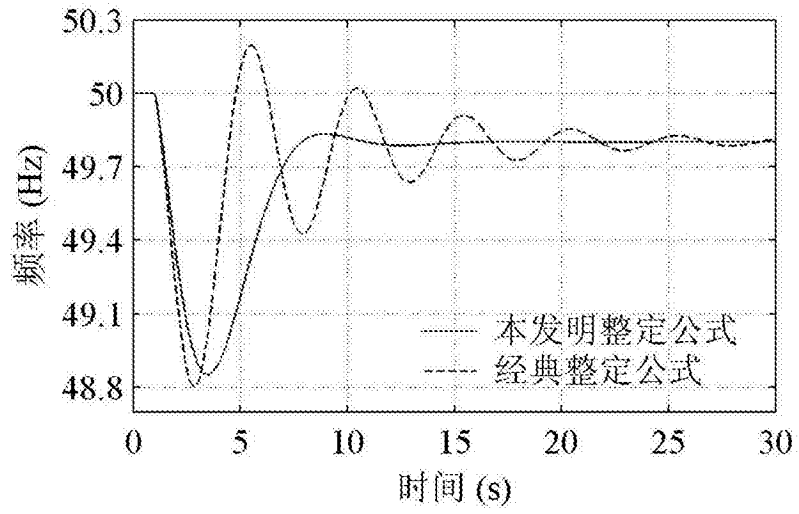


图7