



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105138739 B

(45)授权公告日 2019.02.12

(21)申请号 201510464042.5

(22)申请日 2015.07.30

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 105138739 A

(43)申请公布日 2015.12.09

(73)专利权人 南方电网科学研究院有限责任公司

地址 510080 广东省广州市越秀区东风东路水均岗6、8号西塔13-20楼

专利权人 中国南方电网有限责任公司电网技术研究中心
西南交通大学

(72)发明人 陈刚 范成围 杨诚 伍文城
黄冠标 王晓茹

(74)专利代理机构 广州三环专利商标代理有限公司 44202

代理人 何传锋

(51)Int.Cl.
G06F 17/50(2006.01)
H02J 3/00(2006.01)

(56)对比文件
CN 104333005 A,2015.02.04,
CN 103590969 A,2014.02.19,
JP 特开2002-233195 A,2002.08.16,
温步瀛.计及调速器死区影响的两区域互联电力系统AGC研究.《电工技术学报》.2010,第25卷(第9期),

审查员 王莹

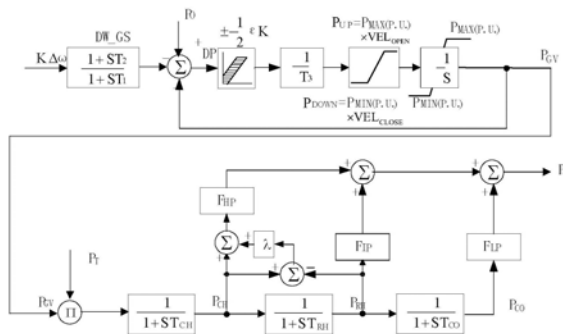
权利要求书2页 说明书11页 附图4页

(54)发明名称

一种计及死区效应的电力系统最低频率快速计算方法

(57)摘要

本发明提供了一种计及死区效应的电力系统最低频率快速计算方法,其包括如下步骤:A、获取相关模型参数;B、简化调速器-原动机模型;C、建立用于频率偏差计算的系统等值模型;D、计算扰动后系统最低频率。本发明的方法将死区特性线性化,能定量描述含死区调速系统的输入输出关系,解决了其他计算方法无法考虑调速器死区的问题,减小了最低频率计算的误差。



1. 一种计及死区效应的电力系统最低频率快速计算方法,其特征在于,该方法包括如下步骤:

A、获取相关模型参数

输入电力系统模型,包括所有机组的发电机、调速器与原动机模型以及模型的参数,扰动功率 Δp_L ;

B、简化调速器-原动机模型

将每台机组的调速器-原动机模型简化为传递函数为 $G_i(s) = \frac{N_i(b_i, A, k_i)}{1 + sT_i}$ 的一阶模型,

其中 $N_i(b_i, A, k_i)$ 为包含调速器单位调节功率 k_i 、调速器死区 b_i 、以及扰动后系统惯性中心最大频率偏差 A 的函数;时间常数 T_i 通过最小二乘法拟合在确定阶跃输入下的原始调速器-原动机模型的响应曲线确定;所述步骤B具体包括如下步骤:

B1、将发电机组 i 的调速器-原动机模型简化为一阶模型,传递函数为

$$G_i(s) = \frac{N_i(b_i, A, k_i)}{1 + sT_i}$$

其中 $N_i(b_i, A, k_i)$ 为包含调速器单位调节功率 k_i 、调速器死区 b_i 、以及扰动后系统惯性中心最大频率偏差 A 的函数,前两个量都通过步骤A获取的参数得到;

B2、死区线性化

对于含死区的非线性调速器-原动机系统,输入与输出之间的关系利用间隙特性进行描述,利用描述函数法进行线性化;

B3、机组 i 的调速器-原动机系统的频率阶跃响应

根据步骤A中获得的模型传递函数和参数建立机组 i 的调速器-原动机的数学模型,将该模型的频率阶跃输入值设置为 $0.01pu$,记录机械功率输出随时间变化的曲线;

B4、拟合响应曲线确定时间常数 T_i

B5、利用步骤B2、步骤B3,获得所有机组的一阶简化模型惯性时间常数;

C、建立用于频率偏差计算的系统等值模型

基于用于负荷频率控制分析的典型系统等值模型进行修改;将系统频率对调速器的反馈环节断开,用随时间线性变化的频率偏差 $\Delta \omega(t)$ 作为新的调速器输入;每台机组的调速器-原动机模型用步骤B中的一阶简化模型替代;忽略负荷的频变效应,所有发电机的惯性等值为惯性中心的值;所述步骤C具体包括如下步骤:

C1、解耦系统对调速器的频率反馈;

C2、简化调速器-原动机模型;

D、计算扰动后系统最低频率

基于步骤C中建立的系统等值模型,根据步骤A中获取的参数和扰动功率 Δp_L 迭代求解系统惯性中心的最低频率。

2. 根据权利要求1所述的快速计算方法,其特征在于,所述步骤A具体包括如下步骤:

A1、获取发电机组 i 的参数与配置调速器-原动机模型

根据电力系统时域仿真动态数据,确定发电机组 i 的容量 S_i 、惯性时间常数 M_i ,以及该机组的调速器-原动机传递函数模型;获取该调速器的死区大小 b_i ,单位调节功率 k_i ;

A2、获取扰动功率 Δp_L ：最低频率的产生通常是由于切机故障产生的，因此稳态时被切除发电机的出力 P_{Gi} 就是扰动功率大小。

3. 根据权利要求1所述的快速计算方法，其特征在于，所述步骤D具体包括如下步骤：

D1、根据频率偏差的计算式 $M_{eq} \frac{d\Delta\omega}{dt} = -\Delta p_L + \sum_{i=1}^m C_i \cdot \frac{\Delta p_L}{M_{eq}} \cdot t_{min}$ ，迭代求解 C_i ，其中 M_{eq} 是系统惯性中心的惯性时间常数， $\Delta\omega$ 为频率偏差值， Δp_L 为扰动功率， t_{min} 为到达最低频率的时间；

D2、最低频率计算

由步骤D1求解出的 C_i 值，可以计算最低频率时的频率偏差值为

$$\Delta\omega_{min} = \frac{\Delta p_L}{2 \sum_{i=1}^m C_i} ,$$

最终最低频率由 $f_{min} = f_0 (1 - \Delta\omega_{min})$ 得到。

一种计及死区效应的电力系统最低频率快速计算方法

技术领域

[0001] 本发明应用于电力系统仿真领域,具体涉及一种计及死区效应的电力系统最低频率快速计算方法。

背景技术

[0002] 随着我国电网规模的逐渐扩大,频率稳定越来越成为电力规划部门关心的重要问题之一。我国电力系统存在远距离、大规模输电的情况,一旦大容量输电通道被破坏、大容量机组被切除等,很容易导致系统频率的大幅下降,甚至引发频率崩溃。因此,快速计算扰动后系统的最低频率,对于有效实施紧急控制措施防止系统频率跌落有重要意义。

[0003] 调速器对频率变化有至关重要的影响,调速器对发电机出力的控制决定了系统的有功功率平衡,其响应速度决定了系统最低频率的水平和出现时间,而调速器死区是客观存在的,不适当的死区设置都对系统有不良影响。现有的频率计算方法均未考虑调速器死区的影响,造成了与实际情况误差较大的情况,不利于系统频率安全。另一方面,调速器死区的存在为系统带来强烈的非线性问题,如何处理含死区的调速系统、定量考虑死区对最低频率的影响是亟待解决的问题。

[0004] 综上,含死区的调速系统在实际电力系统中广泛存在,死区的大小对最低频率的影响较大,建立数学模型定量描述死区特性是提高最低频率计算准确性的有效方法。

发明内容

[0005] 针对现有技术的缺点,本发明的目的是提供一种计及死区效应的电力系统最低频率快速计算方法。

[0006] 为了实现上述目的,本发明提供了一种计及死区效应的电力系统最低频率快速计算方法,其包括如下步骤:

[0007] A、获取相关模型参数

[0008] 输入电力系统模型,包括所有机组的发电机、调速器与原动机模型以及模型的参数,扰动功率 ΔP_L ;

[0009] B、简化调速器-原动机模型

[0010] 将每台机组的调速器-原动机模型简化为传递函数为 $G_i(s) = \frac{N_i(b_i, A, k_i)}{1+sT_i}$ 的一阶模

型,其中 $N_i(b_i, A, k_i)$ 为包含调速器单位调节功率 k_i 、调速器死区 b_i 、以及扰动后系统惯性中心最大频率偏差 A 的函数;时间常数 T_i 通过最小二乘法拟合在确定阶跃输入下的原始调速器-原动机模型的响应曲线确定;

[0011] C、建立用于频率偏差计算的系统等值模型

[0012] 基于用于负荷频率控制分析的典型系统等值模型进行修改;将系统频率对调速器的反馈环节断开,用随时间线性变化的频率偏差 $\Delta \omega(t)$ 作为新的调速器输入;每台机组的调速器-原动机模型用步骤B中的一阶简化模型替代;忽略负荷的频变效应,所有发电机的

惯性等值为惯性中心的值；

[0013] D、计算扰动后系统最低频率

[0014] 基于步骤C中建立的系统等值模型，根据步骤A中获取的参数和扰动功率 ΔP_L 迭代求解系统惯性中心的最低频率。

[0015] 快速准确地计算扰动后电力系统的最低频率，对于有效实施紧急控制措施防止发生频率崩溃有重要意义。最低频率发生在一次调频的过程中，调速器对于最低频率起了重要的决定作用，传统的最低频率预测方法都忽略了调速器的死区或没有计及死区的作用，这使得计算出的最低频率存在误差。本发明提出了一种计及调速器死区效应的电力系统扰动后最低频率快速计算方法，该方法能够定量考虑死区对最低频率的影响，提高了电力系统中切机故障后的最低频率计算的准确性。

[0016] 本发明推导出的考虑调速器死区的扰动后最低频率计算方法，能够通过迭代计算快速得出结果，可以方便地用于在线应用。

[0017] 本发明的方法将死区特性线性化，能定量描述含死区调速系统的输入输出关系，解决了其他计算方法无法考虑调速器死区的问题，减小了最低频率计算的误差。

[0018] 本发明提供了一种定量描述调速器死区特性的频率偏差计算模型，基于该模型的最低频率计算方法能够处理死区带来的非线性问题，使本发明的方法能更有效地应用于实际系统中，减小因忽略死区而带来的计算误差。

[0019] 根据本发明另一具体实施方式，步骤A具体包括如下步骤：

[0020] A1、获取发电机组i的参数与配置调速器-原动机模型

[0021] 根据电力系统时域仿真动态数据，确定发电机组i的容量 S_i 、惯性时间常数 M_i ，以及该机组的调速器-原动机传递函数模型，特别地，获取该调速器的死区大小 b_i ，单位调节功率 k_i ；

[0022] A2、获取扰动功率 ΔP_L ：最低频率的产生通常是由于切机故障产生的，因此稳态时被切除发电机的出力 P_{Gi} 就是扰动功率大小；

[0023] 上述获取模型和参数的方法通过电力系统时域仿真的动态模型数据即可获得，数据量较小，任何投运的实际电力系统均有相应的动态数据。

[0024] 根据本发明另一具体实施方式，步骤B具体包括如下步骤：

[0025] B1、将发电机组i的调速器-原动机模型简化为一阶模型，传递函数为

$$[0026] \quad G_i(s) = \frac{N_i(b_i, A, k_i)}{1 + sT_i}$$

[0027] 其中 $N_i(b_i, A, k_i)$ 为包含调速器单位调节功率 k_i 、调速器死区 b_i 、以及扰动后系统惯性中心最大频率偏差A的函数，前两个量都通过A步获取的参数得到；

[0028] B2、死区线性化

[0029] 对于含死区的非线性调速器-原动机系统，输入与输出之间的关系可以利用间隙特性进行描述，如图1所示，可以利用描述函数法进行线性化。

[0030] 输出与输入的关系为 $Y=F(X)$ ，非线性函数 $F(X)$ 可以用傅里叶级数展开，并仅取前两项得，

$$[0031] \quad F(X) = N^0 + N \cdot XL$$

[0032] 式中

$$[0033] \quad N^0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cdot d(\omega t)$$

$$[0034] \quad N = \frac{1}{\pi A} \int_0^{2\pi} f(x) \sin \omega t \cdot d(\omega t)$$

[0035] 利用死区特性的典型函数描述函数可以得到上式满足以下关系：

$$[0036] \quad \begin{cases} N^0 = 0 \\ N(b, A, k) = \frac{2k}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{b}{A}\right) + \frac{b}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{b}{A}\right)^2} \right] \end{cases} \quad (1)$$

[0037] 本发明在处理死区特性时,采用描述函数法将死区线性化,可以做到定量计算死区对最低频率的影响,这是其他最低频率计算方法所不具有的。

[0038] B3、机组i的调速器-原动机系统的频率阶跃响应

[0039] 根据A步中获得的模型传递函数和参数建立机组i的调速器-原动机的数学模型,给该模型值为0.01pu的频率阶跃输入,记录机械功率输出随时间变化的曲线;

[0040] B4、拟合响应曲线确定时间常数 T_i

[0041] 令 $A=0.01$,根据式(1)计算一阶模型传递函数的分子项 $N_i(b_i, A, k_i)$,并设置0.01pu的频率阶跃输入,即

$$[0042] \quad \Delta\omega(s) = \frac{0.01}{s}$$

[0043] 可得到一阶模型的输出

$$[0044] \quad \Delta P_{Gi}(s) = \frac{N_i(b_i, A, k_i)}{1 + sT_i} \cdot \Delta\omega(s) \quad (2)$$

[0045] 经过拉普拉斯反变换可得时域中含参数的输出

$$[0046] \quad \Delta P_{Gi}(t, T_i) = N_i(b_i, A, k_i) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_i}} \right) \quad (3)$$

[0047] 通过最小二乘法利用上式拟合B3步中获得的响应曲线,最终确定该机组的惯性时间常数 T_i ;

[0048] B5、利用步骤B2、步骤B3,获得所有机组的一阶简化模型惯性时间常数;

[0049] 本发明按以上简化方法可以处理系统中存在不同调速系统的情况,并且能够定量考虑含死区的调速系统的传递函数,简化后的调速器-原动机模型不但能够方便地应用于多机系统计算中,还简化了计算提高了计算速度。

[0050] 根据本发明另一具体实施方式,步骤C具体包括如下步骤:

[0051] C1、解耦系统对调速器的频率反馈

[0052] 传统的用于负荷频率控制的系统等值模型如图2所示,

[0053] M_{eq} 是系统惯性中心的惯性时间常数

$$[0054] \quad M_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^m M_i S_i}{\sum_{i=1}^m S_i}$$

[0055] D为负荷的频变系统,断开系统对调速器频率反馈环节,并令调速器输入为

$$[0056] \quad \Delta\omega(t) = \frac{\Delta p_L}{M_{eq}} \cdot t \quad (4)$$

[0057] 修改后的等值模型如图3所示

[0058] C2、简化调速器-原动机模型

[0059] 将原调速器-原动机模型用B步中的一阶模型替代,并且忽略负荷的频变效应,系统等值模型变为图4所示。

[0060] 此时调速器-原动机系统的输出为

$$[0061] \quad \Delta P_{Gi}(t) = N_i(b_i, A, k_i) \cdot \frac{\Delta p_L}{M_{eq}} \cdot (t - T_i + T_i e^{-t/T_i}) \quad (5)$$

[0062] 进一步令 $\Delta P_{Gi}(t)$ 简化为随时间线性变化的函数,即

$$[0063] \quad \Delta P_{Gi}(t) = C_i \cdot \frac{\Delta p_L}{M_{eq}} \cdot t$$

[0064] 当到达最低频率时,上面两式应相等,即

$$[0065] \quad N_i(b_i, A, k_i) \cdot \frac{\Delta p_L}{M_{eq}} \cdot \left(t_{\min} - T_i + T_i \cdot e^{-\frac{t_{\min}}{T_i}} \right) = C_i \cdot \frac{\Delta p_L}{M_{eq}} \cdot t_{\min}$$

[0066] t_{\min} 为到达最低频率的时间,由上式可得到 C_i 的表达式

$$[0067] \quad C_i = N_i(b_i, A, k_i) \cdot \left(1 - \frac{T_i}{t^*} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t^*}{T_i}} \right) \right) \quad (6)$$

[0068] 由此得到用于频率偏差计算的等值模型如图5所示,m为切机后系统内的发电机数量;

[0069] 该等值模型通过将系统频率对调速系统的反馈开环处理,将频率偏差输入线性化,简化了发电机转动方程;并且该模型不用考虑系统结构和网络方程,避免了复杂的矩阵运算。

[0070] 根据本发明另一具体实施方式,步骤D具体包括如下步骤:

[0071] D1、迭代求解 C_i

[0072] 根据图5所示的模型,频率偏差的计算式为

$$[0073] \quad M_{eq} \frac{d\Delta\omega}{dt} = -\Delta p_L + \sum_{i=1}^m C_i \cdot \frac{\Delta p_L}{M_{eq}} \cdot t_{\min} \quad (7)$$

[0074] 求解式(7)可以得到

$$[0075] \quad \Delta\omega(t) = \frac{-\Delta p_L}{M_{eq}} \cdot t + \frac{1}{2M_{eq}} \sum_{i=1}^m C_i \cdot \frac{\Delta p_L}{M_{eq}} \cdot t^2 \quad (8)$$

[0076] 由于在最大频率偏差处 $\frac{d\Delta\omega}{dt} = 0$ ，因此可以得到

$$[0077] \quad t_{\min} = \frac{M_{eq}}{\sum_{i=1}^m C_i} \quad (9)$$

[0078] 式(6)中包含最大频率偏差A,将式(9)代入式(8)可以得到 $\Delta\omega(t_{\min})$ 的值,这就是最大频率偏差,即

$$[0079] \quad A = \Delta\omega(t_{\min}) = \Delta\omega_{\max} = \frac{\Delta p_L}{2 \sum_{i=1}^m C_i} \quad (10)$$

[0080] 通过上式推导,可以得到以下方程组

$$[0081] \quad \begin{cases} C_1 = N_1 \cdot \left(1 - \frac{T_1}{t_{\min}} + T_1 \cdot e^{-\frac{t_{\min}}{T_1}} \right) \\ M \\ C_m = N_m \cdot \left(1 - \frac{T_m}{t_{\min}} \left(1 - e^{-\frac{t_{\min}}{T_m}} \right) \right) \\ N_i = \frac{k_i}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin \left(1 - \frac{b_i}{A} \right) + 2 \left(1 - \frac{b_i}{A} \right) \sqrt{2A \left(1 - \frac{b_i}{2A} \right)} \right] \\ A = \frac{\Delta p_L}{2 \sum_{i=1}^m C_i}, t_{\min} = \frac{M_{eq}}{\sum_{i=1}^m C_i} \end{cases} \quad (11)$$

[0082] 方程组(11)可以通过迭代求解,最终计算出 C_i 值;

[0083] D2、最低频率计算

[0084] 由D1步求解出的 C_i 值,可以计算最低频率时的频率偏差值为

$$[0085] \quad \Delta\omega_{\min} = \frac{\Delta p_L}{2 \sum_{i=1}^m C_i} \quad (12)$$

[0086] 最终最低频率由 $f_{\min} = f_0 (1 - \Delta\omega_{\min})$ 得到。

[0087] 与现有技术相比,本发明具备如下有益效果:

[0088] 本发明的方法将死区特性线性化,能定量描述含死区调速系统的输入输出关系,解决了其他计算方法无法考虑调速器死区的问题,减小了最低频率计算的误差。

[0089] 下面结合附图对本发明作进一步的详细说明。

附图说明

[0090] 图1是含死区的调速器-汽轮机间隙特性图;

- [0091] 图2是频率分析的系统等值模型图；
- [0092] 图3是开环的系统等值模型图；
- [0093] 图4是一阶模型的开环系统等值模型图；
- [0094] 图5是一阶模型的开环系统等值模型图；
- [0095] 图6是实施例1中, IEEE9节点的算例系统结构图, 系统包括3台发电机, 3个负荷节点, 3个联络节点(不含负荷)；
- [0096] 图7是实施例1中, 调速器-原动机系统GS-TB模型的传递函数图；
- [0097] 图8是实施例1中, G1机组调速器-原动机模型的0.01pu频率阶跃响应曲线和一阶简化模型拟合曲线。

具体实施方式

[0098] 实施例1

[0099] 本实施例以IEEE9节点标准算例系统为算例演示具体实施方式, 测试系统结构图如图6所示, 其包括如下步骤:

[0100] A、获取相关模型参数

[0101] 输入电力系统模型, 包括所有机组的发电机、调速器与原动机模型以及模型的参数, 扰动功率 ΔP_L ;

[0102] 获取相关参数的具体作法为:

[0103] A1、获取发电机组i的参数与配置调速器-原动机模型

[0104] 根据电力系统时域仿真动态数据, 确定发电机组i的容量 S_i 、惯性时间常数 M_i , 以及该机组的调速器-原动机传递函数模型, 特别地, 获取该调速器的死区大小 b_i , 单位调节功率 k_i ;

[0105] A2、获取扰动功率 ΔP_L : 最低频率的产生通常是由于切机故障产生的, 因此稳态时被切除发电机的出力 P_{Gi} 就是扰动功率大小。

[0106] B、简化调速器-原动机模型

[0107] 将每台机组的调速器-原动机模型简化为传递函数为 $G_i(s) = \frac{N_i(b_i, A, k_i)}{1 + sT_i}$ 的一阶

模型, 其中 $N_i(b_i, A, k_i)$ 为包含调速器单位调节功率 k_i 、调速器死区 b_i 、以及扰动后系统惯性中心最大频率偏差 A 的函数; 时间常数 T_i 通过最小二乘法拟合在确定阶跃输入下的原始调速器-原动机模型的响应曲线确定。

[0108] 上述简化机组i的调速器-原动机模型, 具体作法如下:

[0109] B1、将发电机组i的调速器-原动机模型简化为一阶模型, 传递函数为

$$[0110] \quad G_i(s) = \frac{N_i(b_i, A, k_i)}{1 + sT_i}$$

[0111] 其中 $N_i(b_i, A, k_i)$ 为包含调速器单位调节功率 k_i 、调速器死区 b_i 、以及扰动后系统惯性中心最大频率偏差 A 的函数, 前两个量都通过A步获取的参数得到;

[0112] B2、死区线性化

[0113] 对于含死区的非线性调速器-原动机系统, 输入与输出之间的关系可以利用间隙特性进行描述, 如图1所示, 可以利用描述函数法进行线性化。

[0114] 输出与输入的关系为 $Y=F(X)$,非线性函数 $F(X)$ 可以用傅里叶级数展开,并仅取前两项得,

[0115] $F(X) = N^0 + N \cdot XL$

[0116] 式中

$$[0117] \quad N^0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cdot d(\omega t)$$

$$[0118] \quad N = \frac{1}{\pi A} \int_0^{2\pi} f(x) \sin \omega t \cdot d(\omega t)$$

[0119] 利用死区特性的典型函数描述函数可以得到上式满足以下关系:

$$[0120] \quad \begin{cases} N^0 = 0 \\ N(b, A, k) = \frac{2k}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{b}{A}\right) + \frac{b}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{b}{A}\right)^2} \right] \end{cases} \quad (1)$$

[0121] B3、机组i的调速器-原动机系统的频率阶跃响应

[0122] 根据A步中获得的模型传递函数和参数建立机组i的调速器-原动机的数学模型,给该模型值为0.01pu的频率阶跃输入,记录机械功率输出随时间变化的曲线;

[0123] B4、拟合响应曲线确定时间常数 T_i

[0124] 为了拟合B3步中的0.01pu的频率阶跃输入下的原调速器-原动机响应曲线,令 $A=0.01$,根据式(1)计算一阶模型传递函数的分子项 $N_i(b_i, A, k_i)$,并设置0.01pu的频率阶跃输入,即

$$[0125] \quad \Delta\omega(s) = \frac{0.01}{s}$$

[0126] 可得到一阶模型的输出

$$[0127] \quad \Delta P_{Gi}(s) = \frac{N_i(b_i, A, k_i)}{1 + sT_i} \cdot \Delta\omega(s) \quad (2)$$

[0128] 经过拉普拉斯反变换可得时域中含参数的输出

$$[0129] \quad \Delta P_{Gi}(t, T_i) = 0.01 \cdot N_i(b_i, A, k_i) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_i}} \right) \quad (3)$$

[0130] 通过最小二乘法利用上式拟合B3步中获得的响应曲线,最终确定该机组的惯性时间常数 T_i ;

[0131] B5、利用B2、B3步中的步骤,获得所有机组的一阶简化模型惯性时间常数。

[0132] C、建立用于频率偏差计算的系统等值模型

[0133] 基于用于负荷频率控制分析的典型系统等值模型进行修改;将系统频率对调速器的反馈环节断开,用随时间线性变化的频率偏差 $\Delta\omega(t)$ 作为新的调速器输入;每台机组的调速器-原动机模型用B步中的一阶简化模型替代;忽略负荷的频变效应,所有发电机的惯性等值为惯性中心的值。

[0134] 建立用于频率偏差计算的系统等值模型,具体作法如下:

[0135] C1、解耦系统对调速器的频率反馈

[0136] 传统的用于负荷频率控制的系统等值模型如图2所示，

[0137] M_{eq} 是系统惯性中心的惯性时间常数

$$[0138] \quad M_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^m M_i S_i}{\sum_{i=1}^m S_i}$$

[0139] D为负荷的频变系统，断开系统对调速器频率反馈环节，并令调速器输入为

$$[0140] \quad \Delta\omega(t) = \frac{\Delta p_L}{M_{eq}} \cdot t \quad (4)$$

[0141] 修改后的等值模型如图3所示。

[0142] C2、简化调速器-原动机模型

[0143] 将原调速器-原动机模型用B步中的一阶模型替代，并且忽略负荷的频变效应，系统等值模型变为图4所示。

[0144] 由上图的传递函数可得调速器-原动机系统的输出为

$$[0145] \quad \Delta P_{Gi}(t) = N_i(b_i, A, k_i) \cdot \frac{\Delta p_L}{M_{eq}} \cdot (t - T_i + T_i e^{-t/T_i}) \quad (5)$$

[0146] 式(5)描述的调速器输出的变化率在初始时为0，稳态时达到 $N_i(b_i, A, k_i) \cdot \frac{\Delta p_L}{M_{eq}}$ ，在系统达到最低频率过程中，调速器输出变化近似为线性变化，因此进一步令 $\Delta P_{Gi}(t)$ 简化为随时间线性变化的函数，即

$$[0147] \quad \Delta P_{Gi}(t) = C_i \cdot \frac{\Delta p_L}{M_{eq}} \cdot t$$

[0148] C_i 应是一个介于0与 $N_i(b_i, A, k_i) \cdot \frac{\Delta p_L}{M_{eq}}$ 的值，当到达最低频率时，上面两式应相等，

即

$$[0149] \quad N_i(b_i, A, k_i) \cdot \frac{\Delta p_L}{M_{eq}} \cdot \left(t_{\min} - T_i + T_i \cdot e^{-\frac{t_{\min}}{T_i}} \right) = C_i \cdot \frac{\Delta p_L}{M_{eq}} \cdot t_{\min}$$

[0150] t_{\min} 为到达最低频率的时间，由上式可得到 C_i 的表达式

$$[0151] \quad C_i = N_i(b_i, A, k_i) \cdot \left(1 - \frac{T_i}{t^*} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t^*}{T_i}} \right) \right) \quad (6)$$

[0152] 由此得到用于频率偏差计算的等值模型如图5所示， m 为切机后系统内的发电机数量；

[0153] D、计算扰动后系统最低频率

[0154] 基于C步中建立的系统等值模型，根据A步中获取的参数和扰动功率 Δp_L 迭代求解系统惯性中心的最低频率。

[0155] 计算扰动后系统最低频率,具体作法如下:

[0156] D1、迭代求解 C_i

[0157] 根据图5所示的模型,频率偏差的计算式为

$$[0158] \quad M_{eq} \frac{d\Delta\omega}{dt} = -\Delta p_L + \sum_{i=1}^m C_i \cdot \frac{\Delta p_L}{M_{eq}} \cdot t \quad (7)$$

[0159] 求解式(7)可以得到

$$[0160] \quad \Delta\omega(t) = \frac{-\Delta p_L}{M_{eq}} \cdot t + \frac{1}{2M_{eq}} \sum_{i=1}^m C_i \cdot \frac{\Delta p_L}{M_{eq}} \cdot t^2 \quad (8)$$

[0161] 由于在最大频率偏差处 $\frac{d\Delta\omega}{dt} = 0$, 因此可以得到

$$[0162] \quad t_{\min} = \frac{M_{eq}}{\sum_{i=1}^m C_i} \quad (9)$$

[0163] 式(6)中包含最大频率偏差A,将式(9)代入式(8)可以得到 $\Delta\omega(t_{\min})$ 的值,这就是最大频率偏差,即

$$[0164] \quad A = \Delta\omega(t_{\min}) = \Delta\omega_{\max} = \frac{\Delta p_L}{2 \sum_{i=1}^m C_i} \quad (10)$$

[0165] 通过上式推导,可以得到以下方程组

$$[0166] \quad \begin{cases} C_1 = N_1 \cdot \left(1 - \frac{T_1}{t_{\min}} + T_1 \cdot e^{-\frac{t_{\min}}{T_1}} \right) \\ M \\ C_m = N_m \cdot \left(1 - \frac{T_m}{t_{\min}} \left(1 - e^{-\frac{t_{\min}}{T_m}} \right) \right) \\ N_i = \frac{k_i}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin \left(1 - \frac{b_i}{A} \right) + 2 \left(1 - \frac{b_i}{A} \right) \sqrt{2A \left(1 - \frac{b_i}{2A} \right)} \right] \\ A = \frac{\Delta p_L}{2 \sum_{i=1}^m C_i}, t_{\min} = \frac{M_{eq}}{\sum_{i=1}^m C_i} \end{cases} \quad (11)$$

[0167] 方程组(11)可以通过迭代求解,最终计算出 C_i 值;

[0168] D2、最低频率计算

[0169] 由D1步求解出的 C_i 值,可以计算最低频率时的频率偏差值为

$$[0170] \quad \Delta\omega_{\max} = \frac{\Delta p_L}{2 \sum_{i=1}^m C_i} \quad (12)$$

[0171] 最终最低频率由 $f_{\min} = f_0 (1 - \Delta\omega_{\max})$ 得到。

[0172] 仿真实验：

[0173] 采用IEEE9节点标准系统对本发明的方法进行测试，系统包含3台发电机，3个联络节点，3个负荷节点，系统结构图如图6所示。G1-G3发电机的调速器和原动机都采用汽轮机调速器模型GS和串联组合、单再热器汽轮机模型TB，模型传递函数图如图7所示，模型参数如表1和表2所示。

[0174]

T ₁	T ₂	T ₃	VEL _{open}	VEL _{close}	T _{CH}
0	0	0.5	2.0	2.0	0.2
F _{HP}	T _{RH}	F _{IP}	T _{CO}	F _{LP}	λ
0.333	10.0	0.667	0	0	0

[0175] 表1:G1-G3机组的调速器-原动机系统统一固定参数

[0176]

ID	M	S	k
G1	19.1	247.5	20
G2	13.3	192	25

[0177]

G3	4.7	128	27.8
----	-----	-----	------

[0178] 表2:G1-G3发电机惯性、额定容量、单位调节功率

[0179] 利用MATLABR2012软件中的simulink工具箱建立GS-TB的模型，通过设置输入0.01，得到各机组的调速器-原动机响应曲线，并利用一阶简化模型去拟合该响应曲线最终得到各机组的时间常数T₁~T₃。即使是同一个调速器-原动机模型，对于不同的调速器死区，都需要进行0.01pu的频率阶跃响应实验以确定一阶简化模型的时间常数。图8的实线是G1机组的频率阶跃响应曲线，虚线为一阶简化模型的拟合曲线，结合表3可以看出死区大小对拟合的时间常数存在影响。

[0180]

死区大小 (pu)	0.003	0.004	0.005	0.006	0.008
T ₁ (s)	6.3409	6.4381	6.5354	6.6283	6.8040

[0181] 表3:G1一阶简化模型在不同死区的拟合时间常数

[0182] 负荷采用恒功率负荷模型，扰动设置为在0时刻在节点BUSA上增加50MW有功功率，

则扰动功率 $\Delta p_L = \frac{50}{S_1 + S_2 + S_3}$ ，以系统发电机总容量为基准。为了检验算法的有效性，分别

设置不同的调速器死区，比较时域仿真与计算结果的差异。

[0183] 仿真结果与本实施例方法的对比结果如表4所示。前3个情境下的各机组死区相同并且逐渐增大，最低频率也逐渐降低，本文方法计算出的频率偏差与时域仿真结果误差最小能够达到0.003Hz，十分接近。后3个情境的各机组死区均不相同，计算误差保持在0.05Hz

左右,证明本发明方法对机组间不同死区大小的情况同样适用。

[0184]

No	死区设置(pu)			时域仿真		本实施例方法	
	G1	G2	G3	$\Delta f_{\max}(\text{Hz})$	$t^*(\text{s})$	$\Delta f_{\max}(\text{Hz})$	$t_{\min}(\text{s})$
1	0	0	0	-0.543	3.30	-0.490	3.09
2	0.003	0.003	0.003	-0.617	3.36	-0.560	3.53
3	0.006	0.006	0.006	-0.693	3.80	-0.664	4.19

[0185]

4	0.008	0.008	0.008	-0.742	3.87	-0.739	4.66
5	0.001	0.003	0.002	-0.585	3.32	-0.529	3.34
6	0.004	0.003	0.005	-0.647	3.77	-0.590	3.72
7	0.005	0.004	0.006	-0.672	3.80	-0.625	3.94

[0186] 表4:G1-G3机组在不同死区下的系统扰动后最低频率

[0187] 虽然本发明以较佳实施例揭露如上,但并非用以限定本发明实施的范围。任何本领域的普通技术人员,在不脱离本发明的发明范围内,当可作些许的改进,即凡是依照本发明所做的同等改进,应为本发明的范围所涵盖。

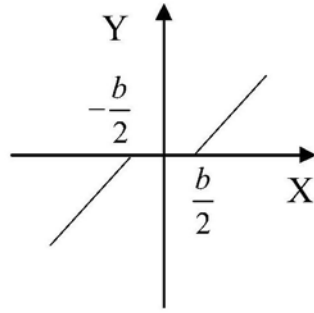


图1

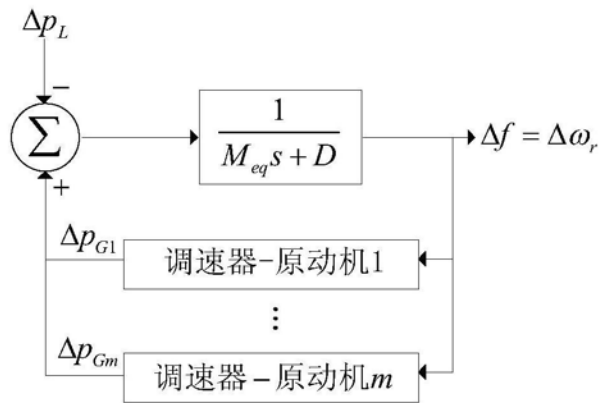


图2

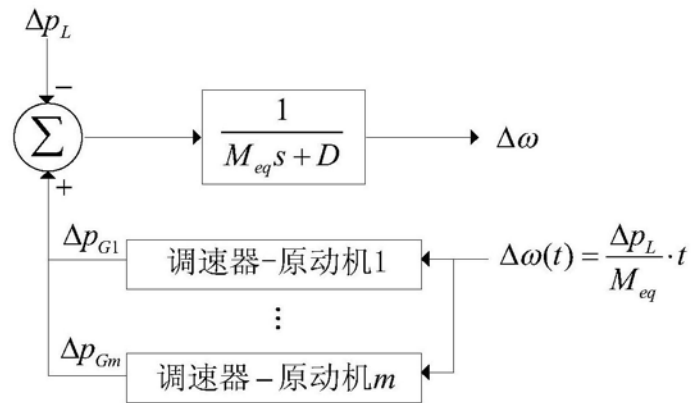


图3

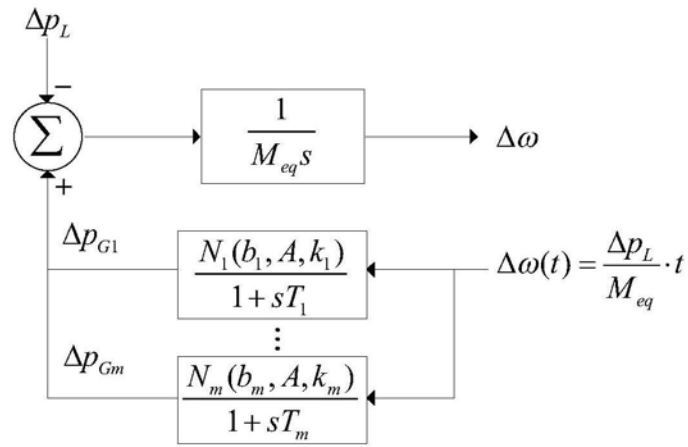


图4

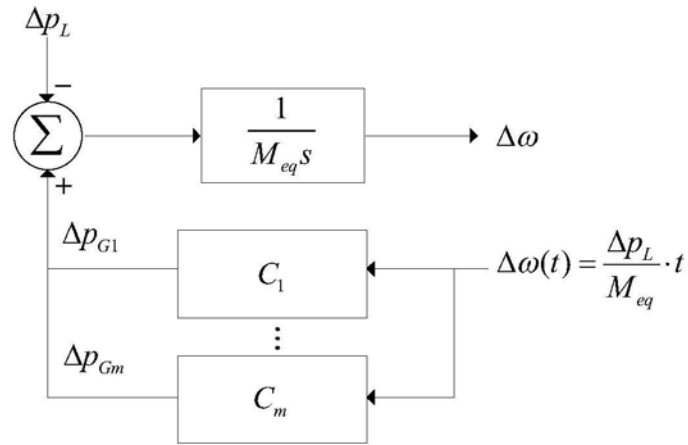


图5

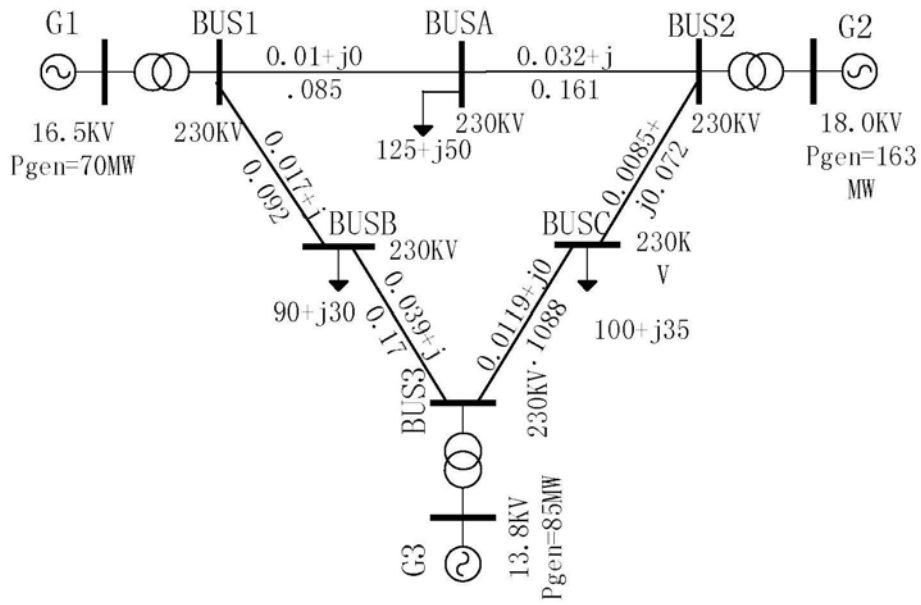


图6

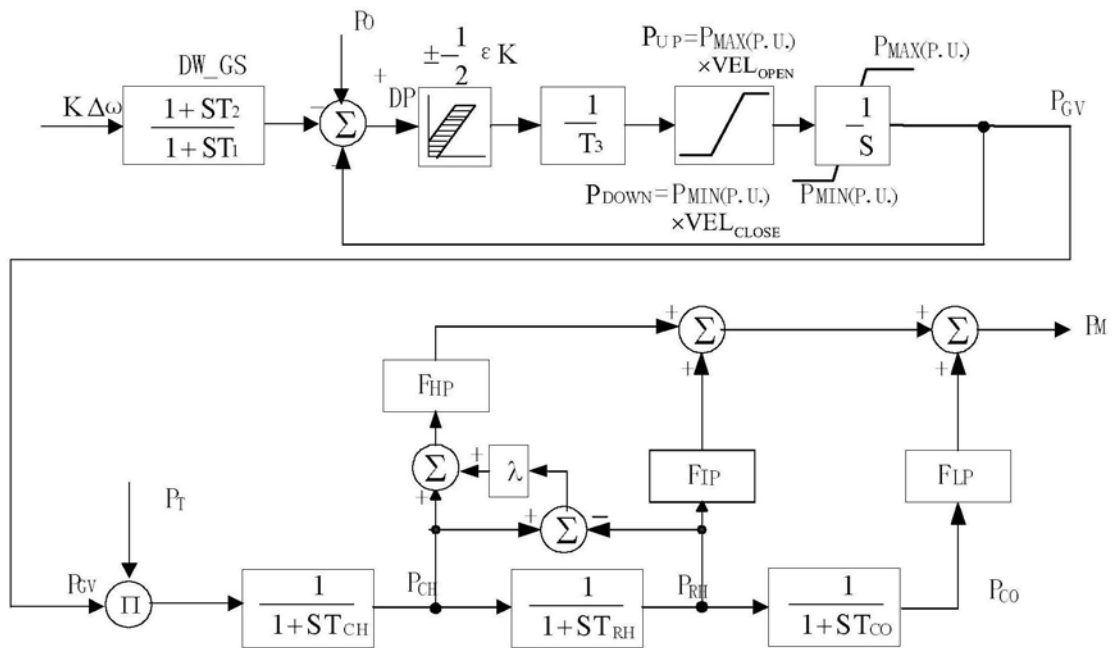


图7

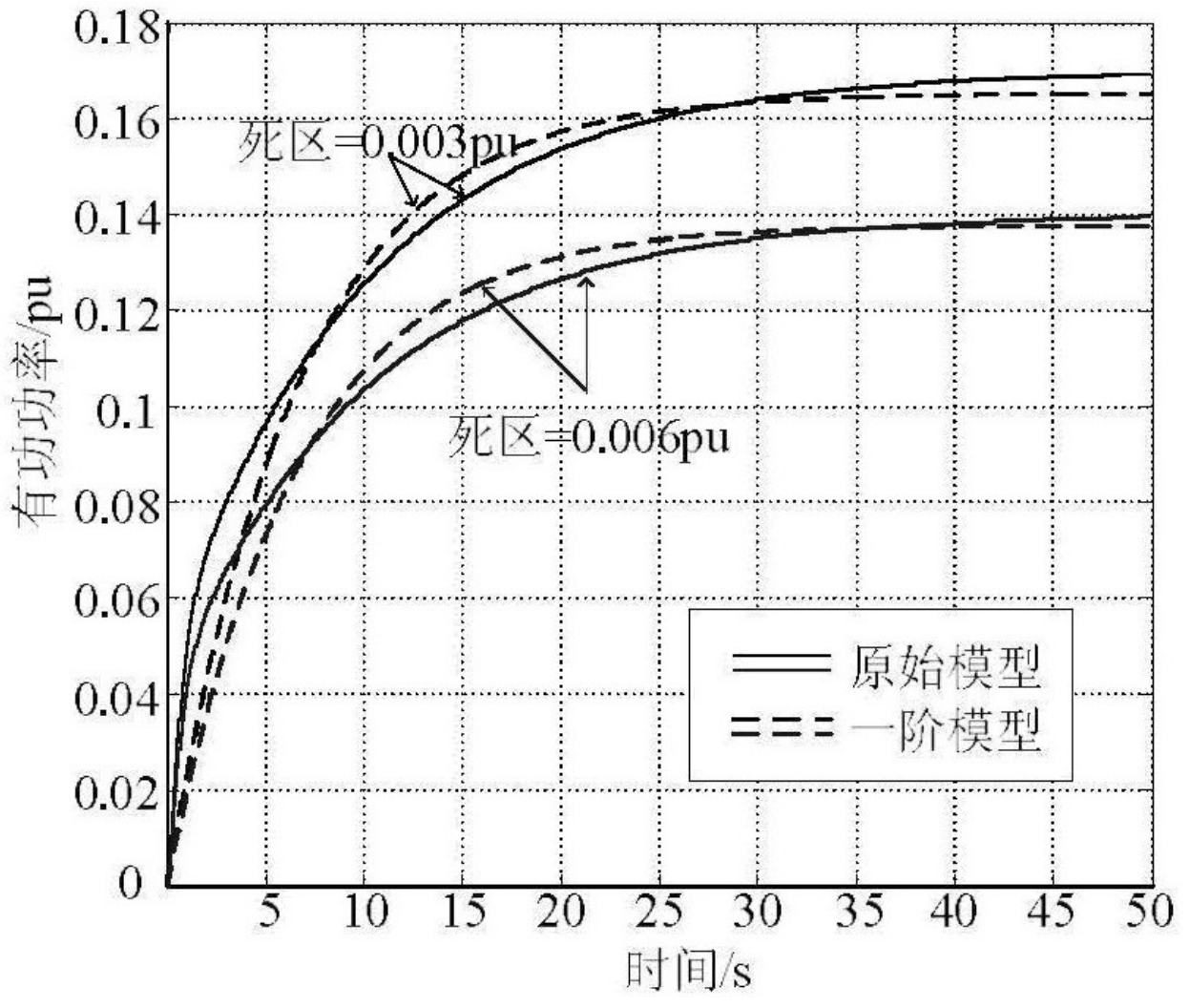


图8