

基于调速系统等值模型的电力系统 发生扰动后最低频率预测

罗启珩, 王晓茹, 刘金强, 闻 达

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 611756)

摘要:电力系统发生扰动后的最低频率预测是电力系统频率安全稳定分析的重要内容。提出一种基于调速系统一阶等值模型的电力系统发生扰动后最低频率预测模型。在传统的平均频率响应模型的基础上,将各调速系统的动态模型等值为一阶模型,并对调速系统的反馈输入进行不同形式的线性化近似,进而实现对平均频率响应闭环模型框架的开环处理,最终根据最低频率出现时刻的边界条件,建立耦合系统最大频率偏差的非线性代数方程。通过求解非线性代数方程组即可得到最低频率。通过与PSS/E中10机39母线系统的仿真结果进行比较,证明了所提算法能够快速、准确地计算得到系统发生扰动后的最低频率。

关键词:电力系统;最低频率预测;调速系统;一阶等值模型;线性化近似;开环;非线性代数方程

中图分类号:TM 712

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201908011

0 引言

频率是电能质量评估的三大指标之一,是电力系统运行中需要控制的重要参数之一^[1]。频率反映了电力系统有功功率供需之间的关系,当出现有功缺额时,系统频率将下降;当出现有功盈余时,系统频率将上升。在孤岛系统中,功率扰动引起比较大的频率偏差很常见,如果发生大型传统发电机脱机等较大的故障,系统可能出现快速频率跌落甚至遭遇频率崩溃^[2-3]。最低频率是频率监视的关键参量,也是频率控制决策的依据,因此能够准确快速地预测电力系统发生扰动后的最低频率,这对系统频率稳定态势在线评估、频率保护与控制设计具有重要的意义^[4-7]。

在以往的文献中,通过建立电力系统中各元件的数学模型及系统的网络方程,对建立的非线性微分代数方程组进行求解,可以得到发生扰动后系统的频率响应,这是全状态时域仿真法^[8]。全状态时域仿真法因其计算复杂度很高,一般用于离线计算分析中^[5]。在线频率预测根据预测对象可分为稳态频率预测和动态频率预测,其中稳态频率预测目前已经发展了较成熟的体系。文献[9]提出了基于广域量测的交直流混联系统发生扰动后的稳态频率预测算法,通过广域量测系统得到发生扰动后瞬间系统数据,建立了交直流混联系统的稳态预测方程,利用牛顿-拉夫逊法求解得到发生扰动后系统的稳态频率。相较于稳态频率预测而言,动态频率预测因涉及更多、更复杂的元件,其预测难度较大。目前系统发生扰动后的动态频率预测主要有等值模型法、网络线性化方法、人工智能方法这3类方法。其中人工智能法近期发展迅速,文献[10]提出了基于 v -支持向量回归(v -SVR)的电力系

统发生扰动后最低频率预测方法。等值模型法的建模简单,计算速度快,在频率分析与控制领域中得到了应用广泛。典型的等值模型法中平均系统频率(ASF)模型^[11]与系统频率响应(SFR)模型^[12]应用最为广泛。文献[13-15]在估计旋转备用量和限制负荷重连的数量等工作中用到了文献[12]提出的模型,结果证明了其模型的可用性。文献[16]基于ASF模型提出将每台调频机组的详细调速系统模型等值为一阶模型,利用频率变化初始斜率对发生扰动后的最低频率进行简化计算,但是忽略了负荷阻尼,并且在简化计算中将引入的中间变量看作常数,使得其精确度远远下降。

本文在分析上述方法特点的基础上,基于调速系统一阶模型提出了系统发生扰动后的最低频率计算方法。该方法考虑了发电机转子阻尼,打开ASF闭环模型并对调速系统的反馈输入进行不同形式的线性化近似,在研究中对不同形式的线性化方式进行了简化计算和比较。将所得结果与PSS/E实际系统的仿真结果进行比较,证明了该方法结果的准确性。所提方法具有计算量小、速度快、准确度高等优点,可以有效地应用于电力系统发生扰动后的最低频率在线预测。

1 调速系统一阶等值频率模型

1.1 经典系统的频率模型

ASF模型^[11]假设将系统所有发电机组的调速器原动机系统的机械输出施加于一个等值转子上,该转子是系统中所有发电机进行转子等值聚合所得,同时假设发电机转子的所有阻尼由单个阻尼因子 D 代替。ASF模型如图1所示。图中, ΔP_L 为系统发生扰动后出现的不平衡功率; $\Delta P_{Gi}(i=1,2,\dots,N)$ 为在出现频率偏差后发电机 i 在调速器的作用下原动机增加的功率;

ΔP_G 为出现频率偏差后在调速器的作用下原动机增加的总功率; H 为系统等值转子惯性时间常数; D 为系统发电机转子阻尼系数。

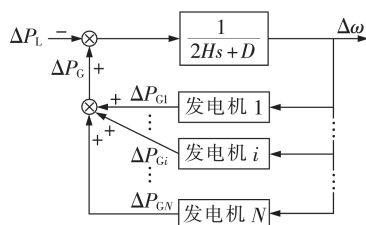


图1 ASF模型

Fig.1 Model of ASF

ASF模型的阶数随系统中发电机组数量的变化而变化,发电机组数量越多,则其模型阶数越多。利用ASF计算电力系统发生扰动后最低频率的难度大、计算成本高。

P. M. Anderson提出的SFR模型^[12]见图2。在ASF模型的基础上,假设整个电力系统的频率统一,并且以一个再热环节调速系统等效所有机组的调频控制,以此将系统转化为一个单机模型。图中, F_H 为等值高压缸做功比例; T_R 为等值再热时间常数; R 为调差系数。

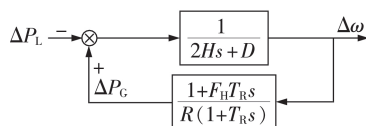


图2 SFR模型

Fig.2 Model of SFR

SFR模型为二阶模型,通过模型可以直接计算得到电力系统发生扰动后频率动态响应的解析表达式。SFR模型的结构简单,计算量小,能够快速预测得到最低频率。然而该模型要求所有发电机组必须为再热式蒸汽机类型,所有调速器原动机模型必须相同,如果存在其他类型,则该模型不适用。因此SFR模型具有较差的泛化性和精度。

1.2 调速系统一阶等值频率模型

在考虑了上述经典系统频率模型后,本文考虑在ASF模型的基础上将调速系统的动态模型等值为一阶模型。由于系统发生扰动后最低频率出现的时间一般为5s内,本文通过拟合调速系统动态模型前5s的数据得到调速系统一阶模型是可行的^[16]。将调速系统等值为一阶模型也成为了后文打开ASF闭环模型的必要条件。调速系统的一阶模型如式(1)所示。

$$\Delta P_G = -\frac{K}{1 + Ts} \Delta \omega \quad (1)$$

其中, K 为增益; T 为惯性时间常数。惯性时间常数 T 决定了系统反应速度的快慢,增益 K 决定了最终稳态值与输入信号的倍数关系。本文将采用最小二乘法对调速系统动态模型的阶跃响应数据进行拟合,从而得到调速系统一阶模型中增益 K 和惯性时

间常数 T 的值。

在实际系统中,调速系统的阶数不同,一阶等值系统往往不能特别准确地体现调速系统的动态特性,因此在实际系统中应注意使一阶等值系统的动态特性尽量与实际系统一致。一般情况下,电力系统中出现最低频率的时间大约为发生功率扰动后的3~4s,故在拟合求参的过程中只取调速系统动态模型阶跃响应前5s的数据。

在本文中,根据调速系统的阶跃响应数据,利用最小二乘法对数据进行一阶等值后,再取调速系统和一阶等值系统阶跃响应数据的平均值进行一阶等值,使得最终一阶系统的动态特性曲线能够更好地逼近调速系统的动态特性曲线。

图3为10机39母线系统中发电机 G_4 单元调速系统动态模型(IEEEG1 PSS/E模型见附录A中图A1)的阶跃响应及其一阶等值系统的阶跃响应曲线。可以看出,一阶等值系统的阶跃响应与发电机 G_4 单元调速系统动态模型的阶跃响应曲线相近,在3~5s基本重合。由于计算最低频率时只关心调速系统在最低频率出现时间之前的作用,所以这种拟合所得的一阶系统能较好地描述调速系统。

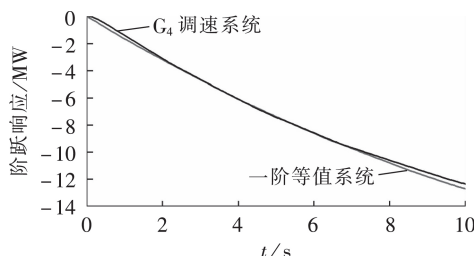


图3 G_4 调速系统及其一阶等值系统的阶跃响应

Fig.3 Step response of G_4 's governor system and its equivalent first-order system

将所有调速系统的一阶等值模型代入ASF模型,则可得到调速系统一阶等值系统的频率响应(FASF)模型,如图4所示。

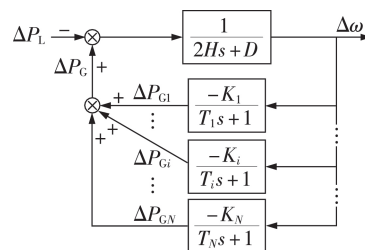


图4 FASF闭环模型

Fig.4 Closed-loop model of FASF

2 最低频率计算方法

2.1 打开闭环

由图4可得频率响应的表达式为:

$$\Delta\omega = -\frac{1}{(2Hs+D)+\sum_{i=1}^N \frac{K_i}{T_i s+1}} \Delta P_L \quad (2)$$

可以看出,方程的阶数与发电机组的数量有关,计算难度高。

将调速系统进行一阶等值后,其输出是由频率偏差量的惯性积分产生的,滞后于频率的变化。在出现最低频率前,影响调速系统输出的是频率前几秒的衰减量,由于其时间很短,因此本文考虑将调速系统的输入信号线性化,以一个一次函数代替。在此情况下,实现了调速系统与扰动后系统惯性环节的解耦,将闭环变化为开环,开环模型如图5所示。图中, $m_{\Delta\omega}$ 为调速系统输入信号线性化的斜率。

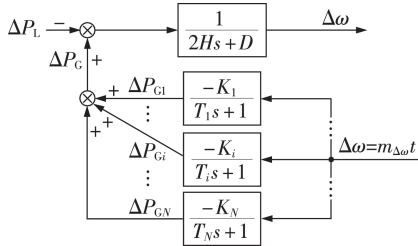


图5 FASF开环模型

Fig.5 Open-loop model of FASF

2.2 频率响应初始斜率的线性输入

发生扰动后的瞬间,调速系统由于惯性没有动作,由图5可以得到发生扰动后瞬间频率响应的频域表达式为:

$$\Delta\omega = -\frac{1}{2Hs+D} \Delta P_L \quad (3)$$

由式(3)可得瞬时频率响应的时域表达式为:

$$\begin{cases} \Delta\omega(t) = \frac{\Delta P_L}{D} e^{-Dt/(2H)} - \frac{\Delta P_L}{D} \\ \frac{d\Delta\omega}{dt} = -\frac{\Delta P_L}{2H} e^{-Dt/(2H)} \end{cases} \quad (4)$$

值得注意的是,式(4)不能直接用于计算发生功率扰动后电力系统的最大频率偏差(实际系统中的调速系统在频率发生变化后动作以改变输出功率进而调节频率)。可以看出,频率偏差 $\Delta\omega$ 的初始值为0,其初始斜率为 $-\Delta P_L/(2H)$ 。在最低频率出现之前可将调速系统的输入视为恒定的线性输入,本文考虑以频率响应的初始斜率代替其线性斜率,即:

$$m_{\Delta\omega} = -\Delta P_L/(2H) \quad (5)$$

将式(5)代入调速系统的一阶模型可以得到发生功率扰动后每台原动机输出功率的变化量为:

$$\Delta P_{Gi}(t) = -K_i m_{\Delta\omega} (t - T_i + T_i e^{-t/T_i}) \quad (6)$$

式(6)给出了调速系统反馈输入线性化后系统发生扰动后每台原动机的功率增加量。

根据图5所示FASF开环模型,可以得到发生扰动

后频率响应的时域微分方程为:

$$2H \frac{d\Delta\omega}{dt} + D\Delta\omega = -\Delta P_L + \sum_{i=1}^N \Delta P_{Gi} \quad (7)$$

将式(6)代入式(7)并进行求解,便可以得到发生扰动后频率响应表达式,假设时间为 $t_{\max}$ 时,系统出现最大频率偏差为 $\Delta\omega_{\max}$,根据求解得到的发生扰动后频率响应表达式可得式(8),详细推导过程见附录B。

$$\begin{aligned} \Delta\omega_{\max} = & \left(\sum_{i=1}^N \frac{K_i \Delta P_L}{D^2} + \sum_{i=1}^N \frac{K_i T_i \Delta P_L}{2HD} - \sum_{i=1}^N \frac{K_i T_i^2}{DT_i - 2H} \frac{\Delta P_L}{2H} + \right. \\ & \left. \frac{\Delta P_L}{D} \right) e^{-Dt_{\max}/(2H)} + \sum_{i=1}^N K_i \frac{\Delta P_L}{2HD} t_{\max} - \sum_{i=1}^N K_i \frac{\Delta P_L}{D^2} - \\ & \sum_{i=1}^N K_i T_i \frac{\Delta P_L}{2HD} + \sum_{i=1}^N \frac{K_i T_i^2}{DT_i - 2H} \frac{\Delta P_L}{2H} e^{-t_{\max}/T_i} - \frac{\Delta P_L}{D} \end{aligned} \quad (8)$$

而当出现最大频率偏差时, $d\Delta\omega/dt=0$,由式(7)可以得到:

$$D\Delta\omega_{\max} + \Delta P_L + \sum_{i=1}^N K_i m_{\Delta\omega} (t_{\max} - T_i + T_i e^{-t_{\max}/T_i}) = 0 \quad (9)$$

式(8)、(9)组成含有未知数 $t_{\max}$ 和 $\Delta\omega_{\max}$ 的二元二次非线性方程组,可以利用牛顿法进行求解。

需注意的是,求解方程所得 $\Delta\omega_{\max}$ 为标么值,最低频率为:

$$f_{\min} = f + f\Delta\omega_{\max} \quad (10)$$

2.3 频率响应截线斜率的线性输入

实际生产中由于调速系统的作用,发生扰动后系统频率的动态响应是非线性的,如图6所示。

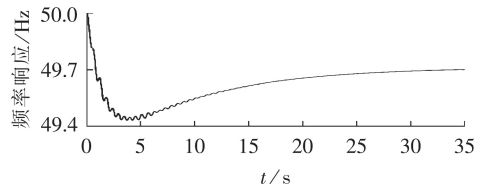


图6 机组G₂脱机后系统的频率响应

Fig.6 Frequency response of system after off-line of G₂

由图6可以看出,频率动态响应的衰减斜率是逐渐降低的,而在2.2节中将调速系统的输入信号用频率衰减初始斜率为斜率的一次函数代替,因此,2.2节中的假设实际上增大了调速系统的真实输入。这里假设调速系统的线性输入斜率为原点与出现最低频率点的斜率,则有:

$$m_{\Delta\omega} = \Delta\omega_{\max}/t_{\max} \quad (11)$$

同样地,将式(11)代入调速系统的一阶模型可以得到:

$$\Delta P_{Gi} = -K_i m_{\Delta\omega} (t - T_i + T_i e^{-t/T_i}) \quad (12)$$

其余的推导过程与2.2节相似,以下只给出非线

性方程组,如式(13)所示,推导过程见附录C。

$$\left\{ \begin{aligned} & D\Delta\omega_{\max} + \Delta P_L + \sum_{i=1}^N K_i m_{\Delta\omega} (t_{\max} - T_i + T_i e^{-t_{\max}/T_i}) = 0 \\ & \left(\frac{\Delta P_L}{D} t_{\max} + \sum_{i=1}^N \frac{K_i T_i^2 \Delta\omega_{\max}}{DT_i - 2H} - \sum_{i=1}^N \frac{K_i T_i \Delta\omega_{\max}}{D} - \right. \\ & \quad \left. \sum_{i=1}^N \frac{2K_i H \Delta\omega_{\max}}{D^2} \right) e^{-Dr_{\max}/(2H)} - \frac{\Delta P_L}{D} t_{\max} - \\ & \quad \sum_{i=1}^N K_i \frac{\Delta\omega_{\max} t_{\max}}{D} - \Delta\omega_{\max} t_{\max} - \\ & \quad \sum_{i=1}^N \frac{K_i T_i^2 \Delta\omega_{\max}}{DT_i - 2H} e^{-t_{\max}/T_i} + \sum_{i=1}^N \frac{K_i T_i \Delta\omega_{\max}}{D} + \\ & \quad \sum_{i=1}^N \frac{2K_i H \Delta\omega_{\max}}{D^2} = 0 \end{aligned} \right. \quad (13)$$

利用牛顿法可以求解式(13),求解得到 $\Delta\omega_{\max}$ 后将其代入式(10)可得最低频率。

3 算例分析

本文采用PSS/E 10机39母线系统对所提方法进行验证。该系统总发电容量为10000 MW,共有旋转备用3808 MW。所有发电机组的惯量时间常数和调速系统等效过一阶系统的参数如表1所示(表中 D 、 T 、 K 为标么值),各调速系统模型的原始模型参数见附录A中表A1。

表1 发电机组的惯性时间常数及其一阶等值参数

Table 1 Inertia time constants of generators and its first-order equivalent parameters

机组	H/s	D	T	K	机组	H/s	D	T	K
G_1	4.20	2	1.79	20.24	G_6	3.48	2	16.84	28.61
G_2	3.03	2	12.23	19.30	G_7	2.64	2	9.20	22.16
G_3	3.58	2	16.24	28.28	G_8	2.43	2	12.85	29.84
G_4	2.86	2	14.00	24.86	G_9	3.45	2	9.95	26.85
G_5	2.60	2	10.65	20.95	G_{10}	3.50	2	15.26	26.92

表2为不同发电机脱机后,由不同简化计算方法得到的最低频率与PSS/E仿真得到的最低频率。其中ASF模型的仿真步长为0.01 s,在仿真开始后1 s时设置发电机脱机故障,仿真至扰动后10 s。

由表2的结果可以看出基于一阶模型的各种简化计算方法的精确程度,其中利用截线斜率线性化的计算方法的精确度最高,其精确度远远高于文献[16]所提方法(忽略阻尼的简化方法)的精确度。

本文利用牛顿-拉夫逊法求解非线性代数方程组,对初值的设定很敏感。初值的选取不仅仅影响求解的速度,当初值选取不当时甚至可能导致不收敛。实际系统中,由于不同系统发生扰动后的最低频率和到达最低频率的时间不同,因此利用本文所提方法进行预测时选取的初值也不同。在实际生产中,初值可

表2 简化模型与PSS/E的仿真结果

Table 2 Simulative results of simplified models and PSS/E

脱机 机组	缺失 功率 / MW	最低频率 / Hz					
		PSS/E 仿真	一阶模型			ASF 模型	SFR 模型
			忽略 阻尼	初始 斜率	截线 斜率		
G ₂	572.83	49.44	49.49	49.53	49.41	49.41	49.44
G ₃	650.00	49.32	49.42	49.46	49.33	49.33	49.36
G ₄	632.00	49.36	49.44	49.48	49.35	49.35	49.38
G ₇	560.00	49.41	49.50	49.53	49.42	49.42	49.45
G ₉	830.00	49.10	49.26	49.31	49.13	49.14	49.17

以根据历史数据或仿真数据进行选取。根据PSS/E仿真结果,设定初值 $\Delta\omega_{\max 0} = -0.01$ p.u., $t_{\max 0} = 5$ s,仿真结果显示收敛性很好。

在MATLAB R2015a上运行基于一阶模型的简化计算方法(以截线斜率为例)与ASF模型的传递函数,重复运行100次,得到一阶模型的平均计算时间为0.0005 s,ASF模型的平均计算时间为0.1 s,可以看出一阶模型的计算速度相较于ASF模型的计算速度提升了约200倍,满足在线预测的要求。

4 结论

本文提出了基于调速系统一阶等值模型的发生扰动后电力系统最低频率的计算方法。根据调速系统的延时效应及调速系统输入线性化将ASF闭环模型变为开环模型。分别讨论了将调速系统输入线性化斜率设为频率衰减初始斜率、截线斜率这2种情况,通过PSS/E时域仿真对计算结果进行了验证,结果显示应用线性化斜率为截线斜率的简化计算方法的精度很高。

仿真结果显示本文所提方法中应用截线斜率的简化计算方法的精度与ASF模型的精度大致相同,相较于其他模型的精度皆有所提升,计算速度相较于ASF模型提升了约200倍。本文所提电力系统发生扰动后最低频率的预测方法能在不失过多精度的情况下极大地提高预测速度。此方法可以在线进行,其计算速度和精度有助于电力系统低频减载、旋转备用等。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 高翔,严正,李瑞超. 现代电网频率控制技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010:3-12.
- [2] 高翔,庄侃沁,孙勇. 西电网“11.4”大停电事故的启示[J]. 电网技术,2007,31(1):25-31.
GAO Xiang, ZHUANG Kanqin, SUN Yong. Lessons and enlightenment from blackout occurred in UCTE grid on November 4, 2006[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 25-31.
- [3] Australian Energy Market Operator. Black system South Australia 28 September 2016: final report [R]. [S.L.]: Australian Energy Market Operator, 2016.
- [4] 刘克天,王晓茹,薄其滨. 基于广域量测的电力系统扰动后最

- 低频率预测[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2188-2195.
- LIU Ketian, WANG Xiaoru, BO Qibin. Minimum frequency prediction of power system after disturbance based on the WAMS data[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2188-2195.
- [5] 刘克天, 王晓茹. 基于广域量测数据的电力系统动态频率分析方法[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2201-2206.
- LIU Ketian, WANG Xiaoru. A wide-area measurement data based method for power system dynamic frequency analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2201-2206.
- [6] 张薇, 王晓茹, 廖国栋. 基于广域量测数据的电力系统自动切负荷紧急控制算法[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 69-73.
- ZHANG Wei, WANG Xiaoru, LIAO Guodong. Automatic load shedding emergency control algorithm of power system based on wide-area measurement data[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 69-73.
- [7] 张恒旭, 李常刚, 刘玉田, 等. 电力系统动态频率分析与应用研究综述[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 169-176.
- ZHANG Hengxu, LI Changgang, LIU Yutian, et al. Reviews on power system dynamic frequency analysis and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 169-176.
- [8] GIDO I, FERNANDEZ-BERNAL F, CENTENO P, et al. Maximum frequency deviation calculation in small isolated power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(4): 1731-1738.
- [9] 胡益, 王晓茹, 艾鹏, 等. 基于广域量测的交直流混联系统发生扰动后稳态频率预测算法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 35-42.
- HU Yi, WANG Xiaoru, AI Peng, et al. Prediction algorithm of steady-state frequency after disturbance for hybrid AC / DC power system based on wide area measurement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 35-42.
- [10] 薄其滨, 王晓茹, 刘克天. 基于 v -SVR的电力系统扰动后最低频率预测[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(7): 83-88.
- BO Qibin, WANG Xiaoru, LIU Ketian. Minimum frequency prediction based on v -SVR for post-disturbance power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7): 83-88.
- [11] CHAN M, DUNLOP R, SCHWEPPE F. Dynamic equivalents for average system frequency behavior following major disturbances[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1972, PAS-91(4): 1637-1642.
- [12] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(3): 720-729.
- [13] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. An adaptive method for setting underfrequency load shedding relays[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(2): 647-655.
- [14] HUANG S J, HUANG C C. An adaptive load shedding method with time-based design for isolated power systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2000, 22(1): 51-58.
- [15] TERZIJA V V. Adaptive underfrequency load shedding based on the magnitude of the disturbance estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1260-1266.
- [16] EGIDO I, FERNANDEZ-BERNAL F, CENTENO P, et al. Maximum frequency deviation calculation in small isolated power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(4): 1731-1738.

作者简介:



罗启珩

罗启珩(1994—),男,四川成都人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行与控制(E-mail: 243421373@qq.com);

王晓茹(1962—),女,重庆人,教授,博士研究生导师,研究方向电网保护和安全稳定控制、新能源并网与智能电网(E-mail: x_r_wang@163.com);

刘金强(1994—),男,山东济宁人,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制;

闻达(1994—),男,山东德州人,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制。

Minimum frequency prediction of power system after disturbance based on equivalent model of governor system

LUO Qiheng, WANG Xiaoru, LIU Jinqiang, WEN Da

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: The minimum frequency prediction of power system after disturbance is an important part of power system frequency safety and stability analysis. A minimum frequency prediction model of power system after disturbance based on the first-order equivalent model of governor system is proposed. On the basis of the traditional average frequency response model, the dynamic model of each governor system is equivalent to the first-order model, and different types of linearized approximation of the governor system's feedback input are carried out to realize the open-loop processing of the closed-loop model framework of average frequency response. Finally, according to the boundary conditions of minimum frequency occurrence time, the nonlinear algebraic equation of the maximum frequency deviation of the coupled system is established, by solving which, the minimum frequency is obtained. By comparing the calculative results of the proposed model with the simulative results of 10-machine 39-bus system in PSS/E, it is proved that the proposed model can quickly and accurately calculate the minimum frequency of power system after disturbance.

Key words: electric power systems; minimum frequency prediction; governor system; first-order equivalent model; linearized approximation; open-loop; nonlinear algebraic equations

附录 A

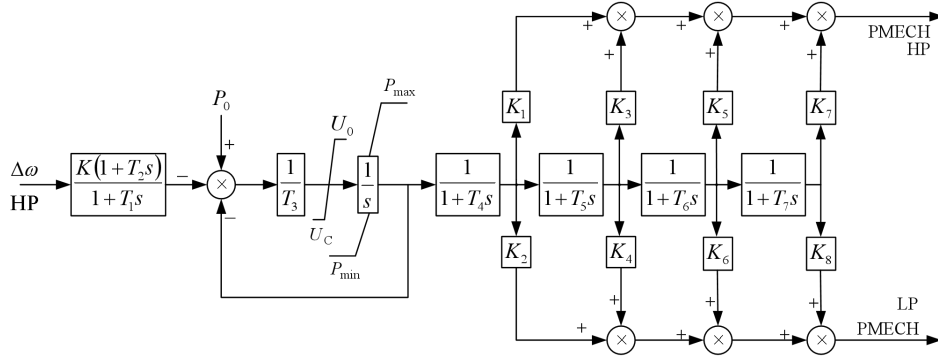


图 A1 汽轮机调速系统通用模型 (IEEE1 PSS/E 模型)
Fig.A1 General model of steam turbine governor system(IEEE1 PSS/E model)

表 A1 汽轮机调速系统数据

Table A1 Data of team turbine governor system							
机组	PSS/E 模型	K	T ₃	T ₄	K ₁	T ₁ , T ₂ , T ₃ , K ₂ —K ₈	
G ₁	IEEEG1	20	0.2	1.6	1	0	
G ₂	IEEEG1	20	0.3	12	1	0	
G ₃	IEEEG1	20	0.3	10	1	0	
G ₄	IEEEG1	20	0.24	10.18	1	0	
G ₅	IEEEG1	20	0.12	9.79	1	0	
G ₆	IEEEG1	20	0.3	10.25	1	0	
G ₇	IEEEG1	20	0.2	7.68	1	0	
G ₈	IEEEG1	20	0.4	7	1	0	
G ₉	IEEEG1	20	0.38	6.1	1	0	
G ₁₀	IEEEG1	20	0.28	10	1	0	

附录 B

将式 (5)、(6) 代入式 (7) 可得:

$$2H \frac{d\Delta\omega}{dt} + D\Delta\omega = -\Delta P_L + \sum_{i=1}^N K_i \frac{\Delta P_L}{2H} (t - T_i + T_i e^{-t/T_i}) \Rightarrow$$

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} + \frac{D}{2H} \Delta\omega = -\frac{\Delta P_L}{2H} + \sum_{i=1}^N K_i \frac{\Delta P_L}{4H^2} (t - T_i + T_i e^{-t/T_i})$$

利用常数变易法可求得通解:

$$\Delta\omega = C e^{\frac{-D}{2H}t} + e^{\frac{-D}{2H}t} \int \left[-\frac{\Delta P_L}{2H} + \frac{\Delta P_L}{4H^2} \sum_{i=1}^N K_i (t - T_i + T_i e^{-t/T_i}) \right] e^{\frac{D}{2H}t} dt =$$

$$C e^{\frac{-D}{2H}t} + \left[\left(\sum_{i=1}^N \frac{K_i \Delta P_L t}{2HD} - \frac{\Delta P_L}{D} - \sum_{i=1}^N \frac{K_i \Delta P_L}{D^2} - \sum_{i=1}^N \frac{K_i T_i \Delta P_L}{2HD} \right) e^{\frac{D}{2H}t} + \sum_{i=1}^N \frac{K_i T_i^2 \Delta P_L}{(DT_i - 2H)2H} e^{\frac{DT_i - 2H}{2HT_i}t} \right] e^{\frac{-D}{2H}t} =$$

$$C e^{\frac{-D}{2H}t} - \frac{\Delta P_L}{D} + \sum_{i=1}^N K_i \frac{\Delta P_L}{2HD} t - \sum_{i=1}^N K_i \frac{\Delta P_L}{D^2} - \sum_{i=1}^N K_i T_i \frac{\Delta P_L}{2HD} + \sum_{i=1}^N \frac{K_i T_i^2 \Delta P_L}{(DT_i - 2H)2H} e^{\frac{-t}{T_i}}$$

其中, C 为常数。

当 $t=0$ 时, $\Delta\omega=0$, 可得:

$$C = \frac{\Delta P_L}{D} + \sum_{i=1}^N K_i \frac{\Delta P_L}{D^2} + \sum_{i=1}^N K_i T_i \frac{\Delta P_L}{2HD} - \sum_{i=1}^N \frac{K_i T_i^2 \Delta P_L}{(DT_i - 2H)2H}$$

代入可得:

$$\Delta\omega = \left(\sum_{i=1}^N K_i \frac{\Delta P_L}{D^2} + \sum_{i=1}^N K_i T_i \frac{\Delta P_L}{2HD} - \sum_{i=1}^N \frac{K_i T_i^2}{DT_i - 2H} \frac{\Delta P_L}{2H} + \frac{\Delta P_L}{D} \right) e^{\frac{-D}{2H}t} + \sum_{i=1}^N K_i \frac{\Delta P_L}{2HD} t - \sum_{i=1}^N K_i \frac{\Delta P_L}{D^2} \sum_{i=1}^N K_i T_i \frac{\Delta P_L}{2HD} + \sum_{i=1}^N \frac{K_i T_i^2}{DT_i - 2H} \frac{\Delta P_L}{2H} e^{\frac{-t}{T_i}} - \frac{\Delta P_L}{D}$$

令出现最大频率偏差时的时间 $t=t_{\max}$ ，最大频率偏差 $\Delta\omega = \Delta\omega_{\max}$ ，则可得到式（8）：

$$\Delta\omega_{\max} = \left(\sum_{i=1}^N \frac{K_i \Delta P_L}{D^2} + \sum_{i=1}^N \frac{K_i T_i \Delta P_L}{2HD} - \sum_{i=1}^N \frac{K_i T_i^2}{DT_i - 2H} \frac{\Delta P_L}{2H} + \frac{\Delta P_L}{D} \right) e^{\frac{-Dt_{\max}}{2H}} + \sum_{i=1}^N K_i \frac{\Delta P_L}{2HD} t_{\max} - \sum_{i=1}^N K_i \frac{\Delta P_L}{D^2} \sum_{i=1}^N K_i T_i \frac{\Delta P_L}{2HD} + \sum_{i=1}^N \frac{K_i T_i^2}{DT_i - 2H} \frac{\Delta P_L}{2H} e^{\frac{-t_{\max}}{T_i}} - \frac{\Delta P_L}{D}$$

附录 C

将式（11）、（12）代入式（7）可得：

$$2H \frac{d\Delta\omega}{dt} + D\Delta\omega = -\Delta P_L - \sum_{i=1}^N K_i m_{\Delta\omega} (t - T_i + T_i e^{-t/T_i}) \Rightarrow$$

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} + \frac{D}{2H} \Delta\omega = -\frac{\Delta P_L}{2H} - \frac{m_{\Delta\omega}}{2H} \sum_{i=1}^N K_i (t - T_i + T_i e^{-t/T_i})$$

利用常数变易法可求得通解：

$$\Delta\omega = C e^{\frac{-D}{2H}t} + e^{\frac{-D}{2H}t} \int \left[-\frac{\Delta P_L}{2H} - \frac{m_{\Delta\omega}}{2H} \sum_{i=1}^N K_i (t - T_i + T_i e^{-t/T_i}) \right] e^{\frac{D}{2H}t} dt =$$

$$C e^{\frac{-D}{2H}t} + \left[\left(\sum_{i=1}^N \frac{2H m_{\Delta\omega} K_i}{D^2} + \sum_{i=1}^N \frac{K_i T_i m_{\Delta\omega}}{D} - \frac{\Delta P_L}{D} - \sum_{i=1}^N \frac{K_i t m_{\Delta\omega}}{D} \right) e^{\frac{D}{2H}t} - m_{\Delta\omega} \sum_{i=1}^N \frac{K_i T_i^2 \Delta P_L}{(DT_i - 2H)} e^{\frac{DT_i - 2H}{2HT_i}t} \right] e^{\frac{-D}{2H}t} =$$

$$C e^{\frac{-D}{2H}t} - \frac{\Delta P_L}{D} + \frac{m_{\Delta\omega}}{D} \sum_{i=1}^N K_i t + \frac{2H m_{\Delta\omega}}{D^2} \sum_{i=1}^N K_i + \frac{m_{\Delta\omega}}{D} \sum_{i=1}^N K_i T_i - m_{\Delta\omega} \sum_{i=1}^N \frac{K_i T_i^2}{DT_i - 2H} e^{\frac{-t}{T_i}}$$

当 $t=0$ 时， $\Delta\omega=0$ ，可得：

$$C = \frac{\Delta P_L}{D} - \frac{2H m_{\Delta\omega}}{D^2} \sum_{i=1}^N K_i - \frac{m_{\Delta\omega}}{D} \sum_{i=1}^N K_i T_i + m_{\Delta\omega} \sum_{i=1}^N \frac{K_i T_i^2}{DT_i - 2H}$$

代入可得：

$$\Delta\omega = \left(\frac{\Delta P_L}{D} - \frac{2H m_{\Delta\omega}}{D^2} \sum_{i=1}^N K_i - \frac{m_{\Delta\omega}}{D} \sum_{i=1}^N K_i T_i + m_{\Delta\omega} \sum_{i=1}^N \frac{K_i T_i^2}{DT_i - 2H} \right) e^{\frac{-D}{2H}t} - \frac{\Delta P_L}{D} + \frac{m_{\Delta\omega}}{D} \sum_{i=1}^N K_i t +$$

$$\frac{2H m_{\Delta\omega}}{D^2} \sum_{i=1}^N K_i + \frac{m_{\Delta\omega}}{D} \sum_{i=1}^N K_i T_i - m_{\Delta\omega} \sum_{i=1}^N \frac{K_i T_i^2}{DT_i - 2H} e^{\frac{-t}{T_i}}$$

令出现最大频率偏差时的时间 $t=t_{\max}$ ，最大频率偏差 $\Delta\omega = \Delta\omega_{\max}$ ，则可得到：

$$\Delta\omega_{\max} = \left(\frac{\Delta P_L}{D} - \frac{2H m_{\Delta\omega}}{D^2} \sum_{i=1}^N K_i - \frac{m_{\Delta\omega}}{D} \sum_{i=1}^N K_i T_i + m_{\Delta\omega} \sum_{i=1}^N \frac{K_i T_i^2}{DT_i - 2H} \right) e^{\frac{-D}{2H}t_{\max}} - \frac{\Delta P_L}{D} + \frac{m_{\Delta\omega}}{D} \sum_{i=1}^N K_i t_{\max} +$$

$$\frac{2H m_{\Delta\omega}}{D^2} \sum_{i=1}^N K_i + \frac{m_{\Delta\omega}}{D} \sum_{i=1}^N K_i T_i - m_{\Delta\omega} \sum_{i=1}^N \frac{K_i T_i^2}{DT_i - 2H} e^{\frac{-t_{\max}}{T_i}}$$

又 $m_{\Delta\omega} = \frac{\Delta\omega_{\max}}{t_{\max}}$ ，化简可得：

$$\left(\frac{\Delta P_L}{D} t_{\max} - \frac{2H m_{\Delta\omega}}{D^2} \sum_{i=1}^N K_i - \frac{\Delta\omega_{\max}}{D} \sum_{i=1}^N K_i T_i + \sum_{i=1}^N \frac{K_i T_i^2 \Delta\omega_{\max}}{DT_i - 2H} \right) e^{\frac{-D}{2H}t_{\max}} - \frac{\Delta P_L}{D} t_{\max} - \frac{m_{\Delta\omega}}{D} \sum_{i=1}^N K_i t_{\max} +$$

$$\frac{2H \Delta\omega_{\max}}{D^2} \sum_{i=1}^N K_i + \frac{\Delta\omega_{\max}}{D} \sum_{i=1}^N K_i T_i - \Delta\omega_{\max} \sum_{i=1}^N \frac{K_i T_i^2}{DT_i - 2H} e^{\frac{-t_{\max}}{T_i}} - \Delta\omega_{\max} t_{\max} = 0$$

而当出现最大频率偏差时， $d\omega/dt=0$ ，由式（7）可以得到：

$$D\Delta\omega_{\max} + \Delta P_L + \sum_{i=1}^N K_i m_{\Delta\omega} (t_{\max} - T_i + T_i e^{-t_{\max}/T_i}) = 0$$

由此可得式（13）。